

Instytut Telekomunikacji, Teleinformatyki i Akustyki
Raport nr I28/P-017/07

**BADANIE PROGÓW WYSTĘPOWANIA
ZJAWISKA RESIDUUM**

Adam Mielczarek

PRACA DOKTORSKA

PROMOTOR: prof. dr hab. inż. Andrzej Dobrucki

Słowa kluczowe: próg powstawania zjawiska residuum, zjawisko residuum,
wysokość residualna, wysokość dźwięku złożonego

Chciałbym wyrazić szczególne podziękowania Promotorowi – prof. dr hab. inż. Andrzejowi Dobruckiemu za poświęcony czas i opiekę nad tą pracą

Dziękuję również dr inż. Maurycemu J. Kinowi i doc. Januszowi Renowskiemu za liczne konsultacje i cenne uwagi dotyczące realizacji tej pracy

Podziękowania kieruję również do wszystkich pozostałych osób, które przyczyniły się do powstania i kształtu tej pracy

Wrocław, Listopad 2007

SPIS TREŚCI

WPROWADZENIE	6
OBJAŚNIENIA TERMINOLOGICZNE.....	9
1. PRZEGLĄD BADAŃ NAD ZJAWISKIEM RESIDUUM.....	11
1.1 TEORIE PERCEPCJI WYSOKOŚCI DŹWIĘKU	11
1.2 ODKRYCIE ZJAWISKA RESIDUUM. WCZESNE POGLĄDY NA TEMAT WYSOKOŚCI TONÓW I DŹWIĘKÓW ZŁOŻONYCH.....	12
1.3 ROZWÓJ BADAŃ NAD ZJAWISKIEM RESIDUUM	15
1.3.1 MODELE OPARTE NA ANALIZIE POBUDZENIA.....	15
1.3.2 MODELE OPARTE NA ANALIZIE STRUKTURY CZASOWEJ.....	20
1.3.3 MODELE WIDMOWO-CZASOWE	23
1.3.4 INNE MODELE WYSOKOŚCI.....	28
1.3.5 BADANIA, KTÓRE WYWARŁY NAJWIĘKSZY WPŁYW NA TWORZENIE SIĘ TEORII I MODELI PERCEPCJI WYSOKOŚCI DŹWIĘKU	31
1.3.5.1 ROZDZIELCZOŚĆ CZĘSTOTLIWOŚCIOWA ORGANU SŁUCHU.....	31
1.3.5.2 OBSZAR WYSTĘPOWANIA RESIDUUM	33
1.3.5.3 REJON DOMINUJĄCY WYSTĘPOWANIA ZJAWISKA RESIDUUM	34
1.3.5.4 ROLA NIELINIOWOŚCI SŁUCHU W PERCEPCJI ZJAWISKA RESIDUUM	35
1.3.5.5 I i II EFEKT PRZESUNIĘCIA WYSOKOŚCI RESIDUALNEJ.....	37
1.3.5.6 ROLA MECHANIZMÓW CENTRALNYCH W PERCEPCJI RESIDUUM.....	41
1.3.5.7 PODSUMOWANIE	43
2. TEZA PRACY	44
3. PRZYJĘTE WARUNKI EKSPERYMENTÓW I ICH UZASADNIENIE.....	47
3.1 METODA POMIAROWA	47
3.2 BODZIEC PORÓWNAWCZY	49
3.3 BODZIEC WZORCOWY	49
3.4 DOKŁADNOŚĆ WYZNACZENIA PROGU WYSTĘPOWANIA ZJAWISKA RESIDUUM O OKREŚLONEJ WYSOKOŚCI RESIDUALNEJ	50
3.5 ZAKRES CZĘSTOTLIWOŚCIOWY BADAŃ	51

BADANIE PROGÓW WYSTĘPOWANIA ZJAWISKA RESIDUUM

3.6 SPOSÓB PREZENATACJI BODŹCÓW	52
3.7 EKIPA ODSŁUCHOWA	52
4. APARATURA	53
4.1 UKŁAD POMIAROWY	53
4.2 OPIS UKŁADU POMIAROWEGO.....	54
5. WYZNACZENIE PROGU WYSTĘPOWANIA ZAJWISKA RESIDUUM DLA DWUTONÓW HARMONICZNYCH O WYSOKOŚCI RESIDUALNEJ ODPOWIADAJĄCEJ CZĘSTOTLIWOŚCI BRAKUJĄCEJ SKŁADOWEJ PODSTAWOWEJ TYCH DWUTONÓW.....	55
5.1 BODZIEC WZORCOWY	55
5.2 EKIPA ODSŁUCHOWA	55
5.3 PROCEDURA POMIAROWA.....	55
5.4 WYNIKI.....	57
5.5 DYSKUSJA.....	67
5.6 PODSUMOWANIE	68
6. WYZNACZENIE PROGU WYSTĘPOWANIA ZAJWISKA RESIDUUM DLA DWUTONÓW NIEHARMONICZNYCH O WYSOKOŚCI RESIDUALNEJ ODPOWIADAJĄCEJ CZĘSTOTLIWOŚCI BRAKUJĄCEJ SKŁADOWEJ PODSTAWOWEJ TYCH DWUTONÓW.....	69
6.1 BODZIEC WZORCOWY	69
6.2 EKIPA ODSŁUCHOWA	69
6.3 PROCEDURA POMIAROWA.....	69
6.4 WYNIKI.....	69
6.5 DYSKUSJA.....	78
6.6 PODSUMOWANIE	79
7. WYZNACZENIE PROGU WYSTĘPOWANIA ZAJWISKA RESIDUUM DLA TRÓJTONÓW HARMONICZNYCH O WYSOKOŚCI RESIDUALNEJ ODPOWIADAJĄCEJ CZĘSTOTLIWOŚCI BRAKUJĄCEJ SKŁADOWEJ PODSTAWOWEJ TYCH TRÓJTONÓW.....	80
7.1 BODZIEC WZORCOWY	80
7.2 EKIPA ODSŁUCHOWA	80

BADANIE PROGÓW WYSTĘPOWANIA ZJAWISKA RESIDUUM

7.3 PROCEDURA POMIAROWA	80
7.4 WYNIKI	81
7.5 DYSKUSJA	92
7.6 PODSUMOWANIE	95
8. WYZNACZENIE PROGU WYSTĘPOWANIA ZJAWISKA RESIDUUM DLA TRÓJTONÓW NIEHARMONICZNYCH O WYSOKOŚCI RESIDUALNEJ ODPOWIADAJĄCEJ CZĘSTOTLIWOŚCI BRAKUJĄCEJ SKŁADOWEJ PODSTAWOWEJ TYCH TRÓJTONÓW.....	96
8.1 BODZIEC WZORCOWY	96
8.2 EKIPA ODSŁUCHOWA	96
8.3 PROCEDURA POMIAROWA	96
8.4 WYNIKI	97
8.5 DYSKUSJA	108
8.6 PODSUMOWANIE	109
9. PODSUMOWANIE	110
LITERATURA	112
DODATEK	124

WPROWADZENIE

Wysokość dźwięku jest tą cechą wrażenia słuchowego, która pozwala uszeregować percypowane dźwięki, od niskich do wysokich, na skali muzycznej [4]. W przypadku tonu prostego jest ona wprost związana z jego częstotliwością [121][176] tzn. im większa częstotliwość tym percypowana wysokość tonu prostego jest wyższa. Na percypowaną wysokość tonu prostego wpływają również takie czynniki jak: natężenie [172][173], czas trwania [172] oraz obecność dźwięków zakłócających proces postrzegania wysokości [28]. Należy jednak podkreślić, że to właśnie częstotliwość jest czynnikiem dominującym w procesie określania wysokości tonu prostego.

W przypadku dźwięków złożonych o wysokości decyduje ich częstotliwość podstawowa. Sposób określania tej częstotliwości determinowany jest przez obecność lub brak składowej podstawowej dźwięku złożonego. Przy obecności składowej podstawowej wielotonu, jego częstotliwość podstawowa wywołująca wrażenie wysokości, jest utożsamiana głównie z częstotliwością składowej podstawowej [4]. W przypadku jej braku, o wysokości decyduje subiektywnie tworzony składnik [156][157][158][160], który nosi nazwę wysokości residualnej. Ponieważ dźwięk złożony jest postrzegany przez ucho ludzkie jako suma wrażeń pochodzących od pojedynczych jego składowych (tonów prostych) lub grupy składowych [16][160], to na jego wysokość, podobnie jak w przypadku tonu prostego, wpływają również takie czynniki jak: czas trwania [41][58], poziom składowych [111][181] i obecność dźwięków zakłócających [42][68].

Wrażenie wysokości dźwięku złożonego jest jednak zagadnieniem bardziej skomplikowanym. Okazuje się bowiem, iż przy obecności składowej podstawowej wielotonu, odtwarzana jest jednocześnie składowa residualna [156], choć jej poziom jest mniejszy od poziomu składowej podstawowej (w granicach -5 dB do -15 dB w zależności od liczby i częstotliwości składowych [55][198]). Mimo iż w takim przypadku składowa podstawowa dominuje w procesie określania wysokości, to składowa residualna wspomaga ten proces. Ponadto, na podstawie eksperymentów Schoutena [156][157][158] stwierdzono, że składowa residualna jest subiektywnie odróżnialna (na podstawie różnicy barwy) od składowej podstawowej danego wielotonu lub od składowej podstawowej wprowadzanej przez nieliniowość słuchu dla wysokich poziomów dźwięku. Wydaje się trafne stwierdzenie

Moore'a dotyczące wysokości dźwięków złożonych: „ *W ogólności residuum jest najbardziej znaczącym atrybutem dźwięku złożonego i dlatego wysokość całego dźwięku określona jest przez wysokość residuum*” [114].

Nie jest więc zaskoczeniem, że zjawisko odtwarzania przez system słuchowy brakującej składowej podstawowej wielotonu, na podstawie informacji zaczerpniętej z harmonicznym, ale nie wynikającej z nieliniowości słuchu, zwane zjawiskiem residuum, jest niezwykle ważnym aspektem życia codziennego [107]. Interesujący jest fakt, że to odtwarzanie składowej podstawowej dzieje się niezależnie od nas, gdyż nie jesteśmy w stanie wyłączyć tej właściwości naszego systemu słuchowego.

Wobec powyższego faktu, wytwarzanie wirtualnego składnika [181] znalazło praktyczne zastosowanie w różnych dziedzinach naszego życia. Szczególnie ważną rolę odgrywa w systemach, w których pasmo odbieranych dźwięków może być ograniczone od strony małych częstotliwości. Subiektywnie odtwarzane wysokości residualne powodują rozszerzenie tego pasma w dół, co znajduje praktyczne zastosowanie np. przy poszerzaniu pasma zestawów głośnikowych. Najnowsze prace wskazują, że dolna częstotliwość graniczna zestawu głośnikowego może być zmniejszona nawet o 1,5 oktawy poprzez zaimplementowanie dodatkowych algorytmów wspomagających subiektywne wytwarzanie wysokości residualnych [96][184]. Można więc zauważyć, że zjawisko residuum wpływa nie tylko na przyjemność odbieranych dźwięków (wzbogacenie barwy), ale ze względu na swoją tonalność [88] wspomaga również w istotny sposób percepcję melodii [178][19].

Oprócz aspektu estetycznego residuum odgrywa niezwykle ważną rolę w związku ze zrozumiałością mowy. Jednym z ważniejszych, a może najważniejszych sposobów wykorzystania zjawiska residuum jest zastosowanie algorytmów wspomagających wytwarzanie wysokości residualnych w aparatach słuchowych [32], co daje wymierne korzyści w polepszeniu zrozumiałości mowy i tym samym komfortu psychicznego osoby protezowanej. Innym wykorzystaniem zjawiska residuum jest odtworzenie poprzez organ słuchu częstotliwości formantowych samogłosek, zniekształconych przez tor transmisyjny aparatu telefonicznego, co również wpływa znacząco na polepszenie zrozumiałości mowy.

Ze względu na znaczący wpływ zjawiska residuum na postrzeganie rzeczywistości, zasadnym wydaje się wyznaczenie progów powstawania tego zjawiska, czyli określenie dla jakiego poziomu poszczególnych składowych tworzących pobudzenie nastąpi jednoznaczna percepcja określonej wysokości residualnej. Określenie warunków, w których słuchacz zaczyna percypować wysokość residualną, pomoże w lepszym zrozumieniu mechanizmów odpowiedzialnych za jej powstawanie. Lecz nie tylko sfera poznawcza jest

powodem zajęcia się tym problemem, ale przede wszystkim praktyczne implikacje. Wykorzystanie wiedzy o progach powstawania danej wysokości residualnej, chociażby w procesorach dźwięku aparatów słuchowych, powinno przyczynić się do jeszcze wierniejszego przetwarzania informacji o dźwięku docierającym do słuchacza, w stopniu jak najbardziej zbliżonym do rzeczywistego funkcjonowania organu słuchu.

OBJAŚNIENIA TERMINOLOGICZNE

analityczny sposób słuchania – słuchanie dźwięku w sposób pozwalający na określenie wysokości poszczególnych składowych wielotonu [62]

błąd oktaowy – określenie wysokości wielotonu o oktawę wyżej od wartości wynikającej z jego częstotliwości podstawowej

częstotliwość podstawowa wielotonu – wypadkowa wielkość określana przez system słuchowy na podstawie informacji o składowych dźwięku złożonego. Odpowiedzialna za wywołanie wrażenia wysokości dźwięku złożonego. W przypadku dźwięków naturalnych (instrumenty muzyczne, odgłosy natury) równa jest częstotliwości składowej podstawowej wielotonu. Przy braku składowej podstawowej równa jest częstotliwości dominującej składowej residualnej wytworzonej przez system słuchowy

częstotliwość residualna – wielkość charakterystyczna dla danej składowej residualnej, odpowiedzialna za wywołanie wrażenia wysokości składowej residualnej

częstotliwość składowej podstawowej wielotonu – wielkość charakterystyczna dla składowej podstawowej wielotonu, odpowiedzialna za wywołanie wrażenia wysokości składowej podstawowej wielotonu

dominująca składowa residualna – składowa residualna, która wywołuje największy wpływ spośród wszystkich składowych residualnych na wytworzenie wypadkowego wrażenia wysokości wielotonu

dominująca składowa wielotonu - składowa o największej amplitudzie. W przypadku wielotonów naturalnych (instrumenty muzyczne, odgłosy natury) utożsamiana ze składową podstawową danego wielotonu. W przypadku wielotonów równoamplitudowych utożsamiana ze składową o najmniejszej częstotliwości

pobudzenie - fala akustyczna docierająca do ucha słuchacza

składowa podstawowa – w tej pracy termin używany w sensie składowej pierwszego rzędu szeregu Fouriera przebiegu okresowego; fizyczny składnik dźwięku złożonego, którego częstotliwość jest wspólną podwielokrotnością częstotliwości wszystkich składowych wielotonu i zbliżona jest do różnicy częstotliwości pomiędzy składowymi wielotonu

składowa residualna – składowa wytworzona subiektywnie, której częstotliwość jest podwielokrotnością częstotliwości występujących w pobudzeniu, wywołująca wrażenie

wysokości residualnej odpowiadającej częstotliwości brakującej składowej podstawowej wielotonu. Dla danego wielotonu może zostać wytworzonych kilka składowych residualnych

składowa wielotonu – fizyczne drganie sinusoidalne współtworzące wieloton

syntetyczny sposób słuchania - słuchanie dźwięku jako całości, co pozwala na określenie wysokości wielotonu [62]

wysokość wielotonu – wrażenie słuchowe wywołane poprzez dany wieloton o określonej częstotliwości podstawowej. Związana z syntetycznym sposobem słuchania wielotonów

wysokość residualna – wrażenie słuchowe wywołane poprzez składową residualną

wysokość wirtualna – w tej pracy termin używany zamiennie z terminem wysokości residualnej. Wprowadzony przez Terhardta [181] w celu odróżnienia składowych wytwarzanych subiektywnie przez system słuchowy (residualnych) od fizycznych składowych wielotonu istniejących w jego widmie. Związana z syntetycznym sposobem słuchania dźwięku

wysokość spektralna – w tej pracy termin używany zamiennie z terminem wysokości składowej wielotonu. Wprowadzony przez Terhardta dla określenia wysokości tonu prostego jako składnika wielotonu. Związana z analitycznym trybem słuchania dźwięku

wzorzec pobudzenia – odpowiedź błony podstawnej na działanie wejściowej fali akustycznej

zjawisko residuum – wytworzenie przez system słuchowy składowych residualnych

1. PRZEGLĄD BADAŃ NAD ZJAWISKIEM RESIDUUM

1.1 TEORIE PERCEPCJI WYSOKOŚCI DŹWIĘKU

Na podstawie dotychczasowego stanu badań wyróżnić można dwie główne teorie percepcji wysokości dźwięku: teorię miejsca oraz teorię czasową. Teoria miejsca zwana również teorią lokalizacyjną opiera się na dwóch podstawowych założeniach:

1. W uchu wewnętrznym bodziec podlega analizie widmowej. Wynikiem tej analizy jest określenie częstotliwości danego bodźca i pobudzenie odpowiedniego miejsca, skojarzonego z tą częstotliwością, na błonie podstawnej. Następnie pobudzone miejsce błony podstawnej pobudza neurony o danej częstotliwości charakterystycznej. Na podstawie tej informacji określana jest częstotliwość bodźca.
2. Wysokość bodźca jest ściśle związana z wzorcem pobudzenia wywołanym przez ten bodziec. W miejscu pobudzenia błony podstawnej tworzy się maksimum i to ono określa wysokość danego bodźca.

Pierwszy postulat jest bardzo dobrze potwierdzony poprzez liczne eksperymenty dotyczące przetwarzania informacji w uchu wewnętrznym, które przedstawiają błonę podstawną jako zestaw filtrów pasmowo-przepustowych [37][40][48][49][124][126][131][134][166]. Sygnał z określonego filtra słuchowego trafia do określonej grupy neuronów nerwu słuchowego. Dzięki temu sygnały wyjściowe z danej grupy neuronów odzwierciedlają aktywność ściśle określonych miejsc błony podstawnej [80][87][130]. W ten sposób przyporządkowanie częstotliwość-miejsce na błonie podstawnej jest zachowane również w nerwie słuchowym.

Drugi postulat został udokumentowany poprzez obserwację ruchów błony podstawnej ludzi [5] oraz zwierząt [80][152]. Przyjmuje się, że dla tonu wysokość odpowiada położeniu maksymalnego pobudzenia błony podstawnej. W przypadku dźwięków złożonych zdania są podzielone i postulat ten budzi kontrowersje. Dla tego typu bodźców na błonie podstawnej obserwuje się wiele maksimumów, a największe z nich nie zawsze odpowiada częstotliwości podstawowej pobudzenia.

Teoria czasowa opiera się na związku wysokości pobudzenia z czasowym przebiegiem impulsów neuronowych wywołanych przez to pobudzenie. Okazuje się, że wyładowanie neuronowe pojawia się dla określonej fazy fali pobudzającej (synchroniczność fazowa) [80][150], a interwał czasowy pomiędzy sąsiadującymi wyładowaniami jest okresem tej fali.

Na podstawie tej informacji określana jest częstotliwość pobudzenia, która wywołuje wrażenie jego wysokości. Jednak synchroniczność fazowa zanika powyżej częstotliwości 5 kHz [123][149]. Następuje rozciągnięcie czasu wyładowań neuronowych na całą długość fali pobudzającej i w ten sposób informacja o wysokości staje się niejednoznaczna.

Obie teorie sprawdzają się znakomicie dla tonów prostych. W przypadku dźwięków złożonych teorie te napotykać na trudności w wyjaśnieniu percepcji wysokości. Szczególnie jest to widoczne w przypadku tych dźwięków złożonych, w których nieobecna jest składowa podstawowa. O wysokości takiego typu dźwięków decyduje dominująca składowa residualna. Na podstawie teorii miejsca nie można wyjaśnić percepcji składowych residualnych, gdyż brak jest pobudzenia miejsca błony podstawnej odpowiedzialnej za percepcję wysokości tych składowych. W przypadku teorii czasowej, dla składowych nierozróżnialnych słuchem, interwały czasowe pomiędzy sąsiadującymi wyładowaniami neuronowymi, nie zawierają okresu brakującej składowej podstawowej. Brak jest określonego sposobu ekstrakcji wspólnego okresu wyładowań. Dlatego też, aby udoskonalić te teorie, wprowadzono modele percepcji wysokości residualnych, które pozwalają na wyjaśnienie mechanizmów percepcji tych wysokości.

Aby jednak mówić o modelach percepcji zjawiska residuum, należy zacząć od przedstawienia historii badań dotyczących tego zjawiska.

1.2 ODKRYCIE ZJAWISKA RESIDUUM. WCZESNE POGLĄDY NA TEMAT WYSOKOŚCI TONÓW I DŹWIĘKÓW ZŁOŻONYCH

Pierwsze udokumentowane doniesienia o zjawisku residuum datują się na rok 1841. Eksperyment Seebecka [160] dotyczył percepcji wysokości tonów i dźwięków złożonych. W eksperymencie wykorzystano syrenę akustyczną z obracającymi się dyskami, w których znajdowały się otwory w odległościach znacznie większych od ich średnicy. Strumień powietrza przechodzący przez otwory w dyskach był przerywany poprzez przerwy między nimi. Percypowana wysokość tonu odpowiadała liczbie otworów przecinających strumień powietrza w jednostce czasu. Na podstawie wyników tego eksperymentu wysnuto wnioski, że wysokość tonu jest związana z periodycznością fali akustycznej. W kolejnym eksperymencie odległości pomiędzy kolejnymi otworami nie były stałe. Odległość zmieniała się i pomiędzy kolejnymi otworami wynosiła odpowiednio a oraz b , lub a , b oraz c . Okazało się, że ucho potrafi ciąg nieregularnych pulsów pogrupować w dwa lub trzy regularne ciągi. Ponadto percypowana wysokość, przy dużych różnicach odległości pomiędzy otworami,

odpowiadała wysokości percypowanej dla dysku z odległością pomiędzy otworami odpowiednio $a+b$ lub $a+b+c$. Gdy różnica pomiędzy odległościami była mała, ucho nie brało pod uwagę różnic pomiędzy poszczególnymi pulsami. Dzięki temu percypowana wysokość odpowiada wrażeniu wywołanemu przez obracający się dysk z odległością pomiędzy otworami odpowiednio $\frac{1}{2}(a+b)$ lub $\frac{1}{3}(a+b+c)$. Wyniki eksperymentu potwierdziły słuszność wniosku o wpływie periodyczności fali akustycznej na percypowaną wysokość również dla dźwięków złożonych.

Dwa lata później, w 1843 roku, Ohm na podstawie wprowadzonego przez siebie prawa akustycznego podważył wyniki otrzymane przez Seebecka. Według akustycznego prawa Ohma [121] do wywołania określonego wrażenia wysokości odpowiadającego częstotliwości f , potrzebna jest fala sinusoidalna o danej amplitudzie, częstotliwości i fazie:

$$A \sin(2\pi ft + \varphi) \rightarrow \text{wrażenie wysokości} \quad (1)$$

Wprowadzając do akustyki prawo Fouriera, Ohm udowodnił, że dźwięk wytworzony przez syrenę zawiera składowe sinusoidalne, które korespondują z percypowanymi wysokościami. W ten sposób próbował zaprzeczyć wynikom otrzymanym przez Seebecka. Nie mógł jednak dowieść, dlaczego dźwięk złożony ze składowych sinusoidalnych wywołuje wrażenie wysokości, które nie jest fizycznie reprezentowane w sygnale pobudzającym. Nie mogąc wyjaśnić tego zjawiska nazwał je „złudzeniem akustycznym”.

W odpowiedzi na zarzuty Ohma, Seebeck na podstawie dalszych eksperymentów [161][162] stwierdził, że dla wysokich numerów harmonicznyc, które bardzo trudno rozróżnić jako osobne składowe, dźwięk percypowany jest jako całość i posiada jedną, określoną wysokość. Wyniki tych eksperymentów były pierwszym dowodem na istnienie zjawiska residuum, choć w tamtych czasach badacze nie przypisali mu żadnej nazwy.

Ponadto Seebeck, polemizując z Ohmem stwierdził, że ucho ludzkie samo wybiera sposób, w jaki analizuje dany dźwięk: albo analizuje go jako całość lub jako poszczególne składowe. Nie da się narzucić danego typu analizy. To stwierdzenie dało podstawy do pracy Helmholtza, w 1863 roku, w której opisuje dwa typy słuchania dźwięków: tryb analityczny odpowiadający poglądom Ohma, czyli wsłuchiwanie się w składowe dźwięku złożonego oraz tryb syntetyczny, czyli percepcja dźwięku jako całości.

Kontrowersje pomiędzy Ohmem a Seebeckiem doprowadziły do powstania dwóch teorii percepcji dźwięku: teorii miejsca (Ohm) oraz teorii czasowej (Seebeck) w pierwotnych ich postaciach.

Dalszym następstwem kontrowersji dotyczących wysokości dźwięków złożonych były badania dotyczące wysokości tonów przerywanych. Bardzo szczegółowe opracowanie tego tematu zostało opublikowane przez Königa w 1876 roku [83]. Doświadczenie polegało na określeniu wysokości strugi powietrza wytwarzanej przez obracający się dysk z otworami umieszczonymi w jednakowej odległości. Podobnie jak w eksperymencie Seebecka, wysokość związana była z liczbą otworów przecinających strugę powietrza w jednostce czasu, oznaczoną jako x . Ponadto przed wirującym dyskiem umieszczono drgający kamerton. Zauważono, że jeśli częstotliwość drgań kamertonu była całkowitą wielokrotnością (n -krotnością) częstotliwości przerywania strugi powietrza przez obracający się dysk ($n \cdot x$), to percypowana wysokość odpowiadała częstotliwości przerywania strugi powietrza. Natomiast przy wzroście n zwiększała się siła i wyrazistość percypowanej wysokości przerywanego tonu. Podobne eksperymenty zostały przeprowadzone również przez innych badaczy [25][63]. Doprowadziły one do potwierdzenia spostrzeżeń Seebecka, że percypowana wysokość tonu, czy też dźwięków złożonych, związana jest z periodycznością fali akustycznej. Ponadto wykazano z całą pewnością, że obecność fizycznego drgania w pobudzeniu nie jest konieczna do wytworzenia wrażenia wysokości. W takim przypadku wysokość jest tworzona przez wyższe harmoniczne.

Zwolennicy teorii Ohma (Schaeffer [153], Everett [30], Abraham [1][2][3]) tłumaczyli wyniki otrzymane przez Königa faktem występowania tonu różnicowego, który zostaje wprowadzony przez zjawiska nieliniowe. Dopiero eksperymenty przeprowadzone przez Hermanna [64] doprowadziły do podważenia teorii o wpływie tonu różnicowego na percepcję wysokości tonu przerywanego. Jego spostrzeżenia dotyczyły faktu, iż dla tonu o częstotliwości f przerywanego z częstotliwością g , następuje przesunięcie percypowanej wysokości tonu o około 10-20% przy warunku $f \neq n \cdot g$. Jednoznacznie świadczyło to o braku wpływu tonu różnicowego na percypowaną wysokość, która powinna być rozpatrywana w aspekcie percepcji periodyczności fali pobudzającej.

O niedocenianiu wyników doświadczeń Hermanna może świadczyć eksperyment Fletchera [36], który badał wysokość wielotonów o usuniętych dolnych harmonicznym. Wrażenie wysokości takiego wielotonu odpowiadało wysokości brakującej składowej, której odtworzenie tłumaczył poprzez wpływ tonu różnicowego. Wkład Fletchera w tworzenie percepcji wysokości dźwięków złożonych było o tyle znaczący, iż to właśnie on wprowadził pojęcie „brakującej składowej” i zauważył, że ton różnicowy wywołujący wrażenie wysokości jest wprowadzany przez nieliniowość słuchu.

Podsumowując dotychczasowe rozważania można stwierdzić, że przeprowadzone eksperymenty wniosły ogromny wkład w tworzenie teorii percepcji wysokości dźwięków oraz, jak się później okaże, dały podstawy do tworzenia modeli uściślających percepcję wysokości dźwięków złożonych, szczególnie wysokości residualnych. W dalszym ciągu jednak narastały różnice w ocenie wyników danych eksperymentalnych.

1.3 ROZWÓJ BADAŃ NAD ZJAWISKIEM RESIDUUM

1.3.1 MODELE OPARTE NA ANALIZIE POBUDZENIA

Rozbieżności w analizie danych eksperymentalnych doprowadziły do powstania dwóch zasadniczych klas modeli wyjaśniających powstawanie wysokości residualnych, które uzupełniały teorie percepcji dźwięków złożonych. Jedną z tych klas tworzą modele oparte na analizie pobudzenia. Ze względu na zwrócenie szczególnej uwagi na proces przetwarzania dźwięku przez błonę podstawną, modele te są ściśle powiązane z teorią miejsca percepcji wysokości dźwięków złożonych. Powstało kilka tego typu modeli różniących się od siebie precyzją i sposobem określenia wysokości dźwięku złożonego, lecz pewne charakterystyczne założenia są wspólne dla każdego z nich.

Niedoskonałość pierwszych modeli [183][188] nie pozwalała na precyzyjne oszacowania wysokości dźwięków złożonych. Analiza ograniczała się do określenia częstotliwości pojedynczych składowych dźwięku złożonego i na podstawie tej informacji następowało określenie percypowanej wysokości. Niestety te modele nie precyzowały, w jaki sposób ta wysokość jest określana. Whitfield w swojej pracy stwierdza, że „wysokość związana jest z pewną średnią ważoną wszystkich składowych” i „sposób określania tej średniej jest złożony”.

Znacznie bardziej dokładne rozważania prezentowane są w pracy Wallisera [186]. Pomimo iż nie podaje on mechanizmów odpowiedzialnych za percepcję dźwięków złożonych, to podaje sposób jej określania. W pierwszym kroku określana jest wysokość odpowiadająca różnicy częstotliwości pomiędzy składowymi. Dla składowych, których odległość widmowa jest duża, wysokość ta jest określana na podstawie różnicy wysokości pomiędzy rozseparowanymi składowymi. Dla składowych położonych blisko siebie w dziedzinie częstotliwości, wysokość jest określana na podstawie wrażenia chropowatości. W drugim kroku analizy poszukuje się subiektywnej podharmonicznej

najniższej składowej dźwięku złożonego. Wysokość tej subiektywnej podharmonicznej powinna w jak największym stopniu odpowiadać wysokości określonej w kroku pierwszym. Jeszcze dokładniejsze mechanizmy określania wysokości dźwięku złożonego, a w szczególności składowych residualnych, opisuje w swoim modelu Terhardt [179][180]. W pierwszym kroku analizy określone są tzw. wysokości spektralne, które tworzone są na podstawie informacji o wysokości poszczególnych składowych dźwięku złożonego:

$$H_n = \frac{f_n}{(1 + v_L + v_M)} \quad (2)$$

gdzie:

f_n [Hz] – częstotliwość n -tej składowej

H_n – spektralna wysokość otrzymana ze składowej o numerze n i częstotliwości f_n

v_L – przesunięcie wysokości wywołane wpływem poziomu składowej

v_M - przesunięcie wysokości wywołane maskowaniem przez inne składowe

Przesunięcia te zostały oszacowane na podstawie eksperymentów psychoakustycznych i wyrażają się zależnościami:

$$v_L = 2 \cdot 10^{-4} (L_n - 60) \cdot \left(\frac{f_n}{1000} - 2 \right) \quad (3)$$

gdzie:

L_n [dB] – poziom n -tej składowej

f_n [Hz] – częstotliwość n -tej składowej

$$v_M = 1.5 \cdot 10^{-2} \exp\left(\frac{-\Delta L'_n}{20}\right) \cdot \left(3 - \ln \frac{f_n}{1000}\right) + 3 \cdot 10^{-2} \exp\left(\frac{-\Delta L''_n}{20}\right) \cdot \left(0.36 + \ln \frac{f_n}{1000}\right) \quad (4)$$

gdzie:

$\Delta L'_n$ [dB] – zmiana poziomu n -tej składowej poprzez wpływ poziomu niższej sąsiadującej składowej

$\Delta L''_n$ [dB] – zmiana poziomu n -tej składowej poprzez wpływ poziomu wyższej sąsiadującej składowej

Jak łatwo zauważyć, w modelu zwrócono szczególną uwagę na kontekst widmowy, poziom składowych oraz wzajemne maskowanie się poszczególnych składowych. Czynniki te wpływają na przesunięcie się wysokości spektralnych, w stosunku do wysokości tonów prostych, a więc determinują również wysokość składowych wirtualnych.

Oczywistym więc jest, że w tym modelu założono całkowite rozseparowanie składowych dźwięku złożonego, a więc model określa wysokość poprawnie tylko do siedmiu

pierwszych składowych dźwięku złożonego [131][134]. W drugim kroku określone są podharmoniczne poszczególnych składowych dźwięku złożonego:

$$H_m = H_1 \cdot m \cdot (1 + v_m - v_1) \quad (5)$$

gdzie:

m – numer podharmonicznej

v_m - przesunięcie wysokości m -tej podharmonicznej wywołane wpływem przesunięcia wysokości pierwszej składowej

v_1 - przesunięcie wysokości pierwszej składowej

Przy założeniu, że pobudzenie zawiera wiele harmonicznnych oraz biorąc pod uwagę równania (3) i (4) powyższe przesunięcia wysokości mogą być wyrażone zależnościami:

$$v_1 = -\frac{10^2}{f_1^2} \quad (6)$$

gdzie:

f_1 [Hz] – częstotliwość pierwszej składowej

$$v_m = 10^{-3} [18 + 2.5m - (50 - 7m) \frac{f_1}{1000}] \quad (7)$$

Powstanie wysokości wirtualnych związane jest z koincydencją podharmonicznych dominującej składowej z podharmonicznymi pozostałych składowych pobudzenia. Siła koincydencji dla podharmonicznych poszczególnych składowych sprawdzana jest zależnością

$$\text{Int}[(1 + \delta) \cdot m \frac{f_r}{f_q}] \geq (1 - \delta) \cdot m \frac{f_r}{f_q} \quad (8)$$

gdzie:

Int – operacja wyznaczająca wartość całkowitą z liczby dziesiętnej

δ – obszar koincydencji podharmonicznych, zwykle wybierany z zakresu 0.01-0.05

f_r [Hz] – częstotliwość podharmonicznej wziętej do procesu określenia koincydencji

f_q [Hz] – częstotliwość dominującej składowej

W ten sposób określany jest parametr m dla dominującej składowej dźwięku złożonego, który określa podharmoniczną, która w jak największym stopniu koincyduje z podharmonicznymi pozostałych składowych. Na podstawie tej informacji określana jest nominalna wysokość wirtualna danego pobudzenia:

$$H = \frac{f_q}{m} [1 + v_q - 10^{-3} [18 + 2.5m - (50 - 7m) \cdot \frac{f_q}{m \cdot 1000} + 0.1 (\frac{f_q}{m \cdot 1000})^{-2}] \quad (9)$$

gdzie:

v_q – sumaryczne przesunięcie wysokości dominującej składowej opisanej zależnościami (3) i (4)

W przypadku kilku wytworzonych wysokości residualnych (kilku wartości parametru m) pod uwagę brana jest składowa wirtualna, która w jak największym stopniu koincyduje z innymi subharmonicznymi. Stopień koincydencji jest określany przez równanie (8).

Tak więc za percepcję wysokości dźwięku złożonego odpowiedzialna jest wysokość residualna związana z dominującą składową danego wielotonu, a nie najniższą składową jak to miało miejsce w modelu Wallisera. Według Terhardta dominujące składowe są rozróżnialne jako pojedyncze składowe i występują w zakresie 500 – 1500 Hz. Ponadto w modelu tym zwrócono szczególną uwagę na fazę uczenia się określania wysokości wirtualnych [178], która pozwala na łatwiejsze i bardziej precyzyjne przyporządkowanie wysokości wirtualnych do danych składowych dźwięku złożonego, co jest szczególnie ważne w aspekcie percepcji sygnału mowy.

W tym samym czasie Goldstein [44] przedstawił swój model percepcji wysokości dźwięków złożonych. Podejście do sygnału pobudzającego układ słuchowy, przedstawione w tej pracy, różniło się zdecydowanie od poglądów przedstawionych we wcześniejszych pracach innych badaczy. Goldstein przedstawia model centralnego procesora, który szacuje wysokość na podstawie informacji o częstotliwościach poszczególnych składowych dźwięku złożonego. Zakłada się rozróżnialność składowych danego pobudzenia oraz kolejność występowania harmonicznym, co jest warunkiem koniecznym do poprawności oszacowania wysokości pobudzenia. Częstotliwości poszczególnych składowych prezentowane są jako zmienne losowe o rozkładzie normalnym (f_k, σ_k) . Przykładowo dla danego dwutonu o częstotliwościach składowych f_1 i f_2 zachodzi transformacja częstotliwości składowych w zmienne losowe:

$$\begin{aligned} f_1 &\rightarrow G(f_1, \sigma_1) \\ f_2 &\rightarrow G(f_2, \sigma_2) \end{aligned} \quad (10)$$

gdzie rozkład statystyczny danej składowej dany jest zależnością

$$G(f_k, \sigma_k) \equiv (2\pi\sigma_k^2)^{-\frac{1}{2}} \exp\left[-(x_k - f_k)^2 / 2\sigma_k^2\right] \quad (11)$$

natomiast odchylenie standardowe dla danej częstotliwości aproksymowane jest na podstawie wcześniejszych eksperymentów psychoakustycznych [45][46][47] i zależne jest od częstotliwości składowej pobudzenia

$$\sigma_k = \sigma(f_k) \quad (12)$$

Wysokość szacowana jest na podstawie największego prawdopodobieństwa wystąpienia danej składowej residualnej, która określana jest na podstawie informacji o kolejnych składowych. Dla podanego dwutonu określa się maksymalną wartość prawdopodobieństwa funkcji (13) ze względu na zmienną n :

$$L_{\max} = \frac{1}{(2\pi)^{\frac{1}{2}} \sigma_1} \exp\left[-\frac{(x_1 - nf_0)^2}{2\sigma_1^2}\right] \cdot \frac{1}{(2\pi)^{\frac{1}{2}} \sigma_2} \exp\left\{-\frac{[x_2 - (n+1)f_0]^2}{2\sigma_2^2}\right\} \quad (13)$$

gdzie:

f_0 [Hz] – szukana częstotliwość residualna

$n, n+1$ – numer składowych pobudzenia

Natomiast f_0 szacuje się przy pomocy zależności:

$$f_0 = \frac{(x_1/n)^2 + [x_2/(n+1)]^2}{x_1/n + x_2/(n+1)} \quad (14)$$

Można stwierdzić, że działanie procesora sprowadza się do znalezienia wspólnej podharmonicznej dla wszystkich składowych dźwięku złożonego, która jak najdokładniej pasuje do danego zestawu składowych.

W 1973 roku zostaje opublikowany jeszcze jeden model percepcji dźwięków złożonych. Wightman [192] w swojej pracy przedstawia dwustopniowy proces określania wysokości, który oparty jest o dwustopniową transformację widma sygnału pobudzającego. W pierwszym kroku bodziec (17) zamieniany jest na tzw. „peryferyjny bodziec pobudzenia”, który odpowiada widmu mocy pobudzenia (18) w pasmach krytycznych.

$$f(t) = \sum_{i=1}^n \cos \omega_i t \quad (17)$$

gdzie:

n – liczba składowych dźwięku złożonego

$$|F(\omega)|^2 = \sum_{i=1}^n \pi^2 \delta(\omega - \omega_i) \quad (18)$$

Operacja ta odpowiada analizie widmowej dokonywanej przez błonę podstawną. W drugim kroku analizy wykonuje się transformację Fouriera widma mocy.

$$R(\tau) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \sum_{i=1}^n \pi^2 \delta(\omega - \omega_i) \cos \omega \tau d\omega \quad (19)$$

Operacje te można porównać do obliczenia funkcji autokorelacji z przebiegu czasowego pobudzenia. Ten sposób analizy prowadzi do zagubienia informacji o fazie składowych. O percypowanej wysokości decydują maksima wypadkowej funkcji autokorelacji.

Jako zdecydowany zwolennik teorii miejsca percepcji dźwięku, Wightman ogranicza rozważania tylko do funkcji autokorelacji działającej w dziedzinie częstotliwości, uważając za najważniejszy etap analizy częstotliwościowej sygnału dokonującej się w ślimaku. Nie bierze pod uwagę czasowej jej postaci, czyli liczenia autokorelacji wprost z definicji:

$$R(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T f(t)f(t - \tau)dt \quad (20)$$

Ponadto w modelu nie jest brana pod uwagę czasowa struktura wyładowań neuronowych, choć zaszyte są informacje o strukturze tonotopowej neuronów i średniej częstotliwości wyładowań. Pomimo, że model nie ogranicza się w działaniu do składowych rozróżnialnych słuchem, to ze względu na fakt, iż nie bierze pod uwagę czasowej struktury wyładowań neuronowych, nie może być zaliczony do grupy modeli analizy struktury czasowej.

Podsumowując powyższe rozważania można stwierdzić, że modele analizy pobudzenia powstały jako uzupełnienie teorii miejsca percepcji wysokości dźwięków złożonych. Z powodu braku pobudzenia tego punktu błony podstawnej, który powinien być odpowiedzialny za percypowaną wysokość brakującej składowej podstawowej, powstały modele, które bazują na określeniu częstotliwości poszczególnych składowych pobudzenia i znalezieniu wspólnej podharmonicznej odpowiedzialnej za powstanie wypadkowego wrażenia wysokości dźwięku złożonego. Szczególnym złożeniem tej klasy modeli jest całkowita rozseparowalność składowych dźwięku, które ogranicza rozważania do siedmiu pierwszych składowych dźwięku złożonego [134]. W rozważanych modelach zakłada się, że wysokość residualna nie jest tworzona przez składowa nierozróżnialne słuchem.

Pomimo, że sposób określania wspólnej dominującej składowej wirtualnej różni się w zależności od zastosowanej metody, to wysokości oszacowane w poszczególnych modelach są prawie identyczne z błędem nie większym niż rozdzielczość częstotliwościowa organu słuchu.

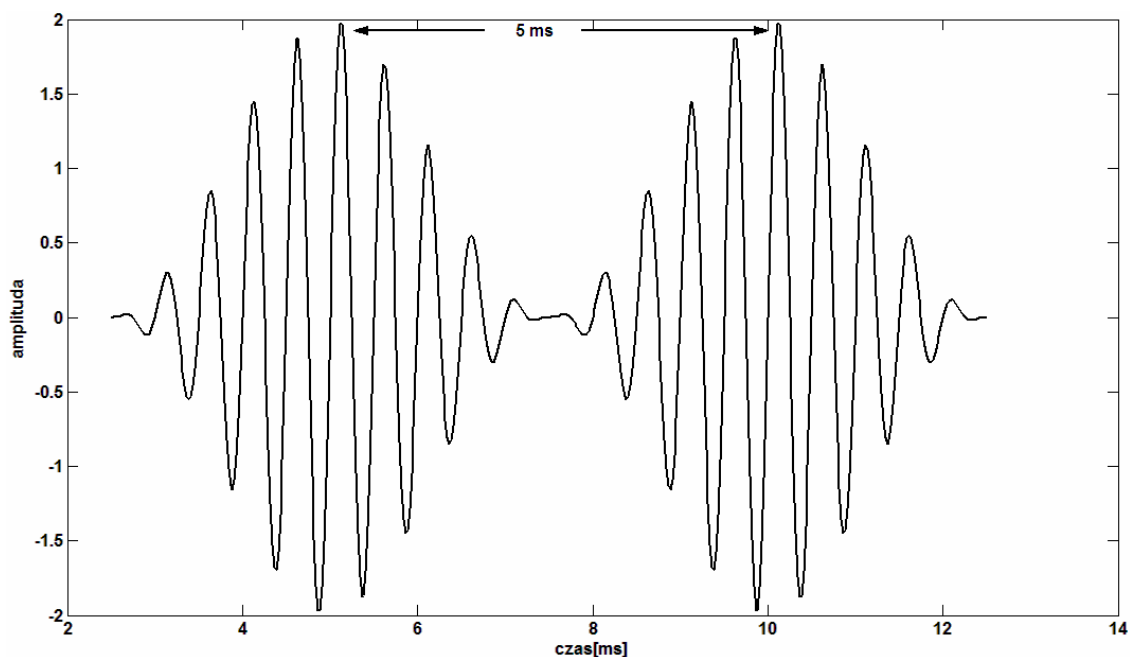
1.3.2 MODELE OPARTE NA ANALIZIE STRUKTURY CZASOWEJ

Drugi sposób podejścia do wysokości dźwięków złożonych reprezentują poglądy, które powstały jako rozwinięcie teorii czasowej percepcji wysokości dźwięków złożonych. Tworzą one klasę modeli opartych na czasowej strukturze wyładowań neuronowych. Zanim jednak zaczęto analizować przebiegi wyładowań neuronowych, Schouten [155][156][157][158] przeprowadził serię eksperymentów, które są uważane za najważniejsze dowody na poprawność założeń tej klasy modeli. Używając syreny akustycznej [155][156]

Schouten badał wysokość ciągu impulsów o czasie trwania 0.25 ms , które powtarzały się periodycznie, co 5 ms . Okazało się, że percypowana wysokość takiego pobudzenia odpowiada częstotliwości powtarzania się impulsów 200 Hz . Wprowadzenie tonu o częstotliwości 206 Hz nie powodowało powstania dudnień, co świadczyło o braku składowej o częstotliwości równej 200 Hz . W drugim eksperymencie [157] Schouten badał wysokości wielotonów o dużej liczbie składowych. Natomiast w trzeciej pracy [158] podaje wyjaśnienia obserwowanych zjawisk i odnosi je do modeli opartych na analizie pobudzenia. Z powyższych prac wyciągnięto następujące wnioski:

- Wysokość dźwięku złożonego oparta jest na percepcji periodyczności sygnału pobudzającego
- Składowe o małych częstotliwościach są percypowane oddzielnie
- Składowe o dużych częstotliwościach nie są percypowane jako osobne składowe, ale jako jeden składnik, nazwany residuum, którego wysokość określona jest przez periodyczność sygnału pobudzającego i odpowiada częstotliwości brakującej składowej podstawowej pobudzenia
- Składowa residualna nie jest odtwarzana na podstawie tonu różnicowego

Spostrzeżenia Schoutena doprowadziły do powstania poglądu, iż wysokość dźwięku złożonego, w którym brak jest składowej podstawowej determinowana jest przez składnik residualny, który może być tworzony tylko przez wysokie harmoniczne. Percypowana wysokość jest związana z periodycznością wypadkowej fali pobudzenia, co pokazuje rys. 1.



Rys. 1. Struktura czasowa trójtynu otrzymanego na drodze modulacji amplitudowej składowej $f=2000\text{ Hz}$ składową modulującą $g=200\text{ Hz}$

Rola periodyczności wypadkowej fali pobudzenia jako składnika determinującego percypowaną wysokość została potwierdzona w wielu niezależnych eksperymentach, dotyczących głównie wysokości periodycznie powtarzanych impulsów tonów. Niezależnie od częstotliwości tonów wysokość tego rodzaju pobudzeń zawsze kojarzona była z wypadkową periodycznością fali, czyli z częstotliwością powtórzeń impulsów tonów [24][31][169][182]. Te same spostrzeżenia dotyczą eksperymentów, w których impulsy tonów zastąpiono sygnałem szumowym [9][112].

Kolejna praca Schoutena z 1962 roku [159], stanowiąca kontynuację prac z lat 1938 – 1940, jeszcze precyzyjniej określała sposób określania wysokości dźwięku złożonego:

- Informacja o wysokości dźwięku jest określona przez strukturę czasową fali pobudzającej
- Odległość czasowa pomiędzy lokalnymi maksimami położonymi w pobliżu maksimów obwiedni pobudzenia jest odwrotnością percypowanej wysokości residualnej, która określa percypowaną wysokość dźwięku złożonego
- Wytwarzanie przez wysokie harmoniczne wysokości residualnej związane jest z ich oddziaływaniem na błonie podstawnej i wytworzenie na niej takiego przebiegu, który odpowiada sumarycznej fali pobudzenia

Wbrew pozorom ta niewielka różnica w interpretacji (lokalne maksima w pobliżu maksimów obwiedni) spowodowała przełom w badaniach nad wysokością dźwięków nieharmonicznych, co zostanie omówione w dalszej części pracy.

Na podstawie prac Schoutena oraz innych badaczy (de Boer, Ritsma, Engel, Smoorenburg, Patterson i inni) został stworzony model, który wiązał percypowaną wysokość dźwięku złożonego z jego przebiegiem czasowym. Ze względu na zgodność przewidywań modelu z wynikami otrzymywanymi na drodze eksperymentu psychoakustycznego, model struktury czasowej pobudzenia przetrwał przez kilka następnych lat i doskonale tłumaczył sposób określania wysokości dźwięku złożonego przez układ słuchowy.

Dopiero badania nad zachowaniami się błony podstawnej pod wpływem różnego rodzaju pobudzeń [5][80][152] oraz połączenie ich z zachowaniem się wyładowań neuronowych nerwu słuchowego [80][87][123][149][150] doprowadziło do powstania ostatecznej wersji modelu percepcji wysokości dźwięków złożonych. Okazało się, że percypowana wysokość dźwięków złożonych jest wyznaczona poprzez odwrotność odległości czasowej pomiędzy kolejnymi wyładowaniami neuronowymi, które występują dla subtelnych maksimów w strukturze czasowej pobudzenia błony podstawnej. Odległości te odpowiadają odległościom pomiędzy subtelnymi maksimami w pobliżu maksimów

obwiedni fali wejściowej dla wysokich numerów harmoniczych [74]. Na tej podstawie dla tej klasy modeli przyjęto nazwę modeli analizy struktury czasowej, a dokładniej analizy struktury czasowej wyładowań neuronowych.

Podsumowując dotychczasowe rozważania dotyczące modeli opartych na analizie struktury czasowej można zauważyć najwyraźniejszą cechę, która odróżnia tę klasę modeli od modeli opartych na analizie pobudzenia. Jest nią podejście do tworzenia się wysokości residualnych. Okazuje się, że według modeli analizy struktury czasowej wysokości te mogą być wytworzone tylko dla nierozróżnialnych słuchem składowych, ponieważ tylko ich interakcja w obrębie jednego filtra słuchowego powoduje wytworzenie wypadkowej fali na błonie podstawnej, której periodyczność daje możliwość określenia wypadkowej wysokości dźwięku złożonego.

Ponadto modele oparte na analizie pobudzenia nie były w stanie przewidzieć wpływu fazy poszczególnych składowych na percypowaną wysokość dźwięku, ze względu na fakt, iż filtracja każdej składowej z osobna na błonie podstawnej (główne założenie tej klasy modeli) powoduje brak odzwierciedlenia wpływu poszczególnych składowych na siebie. To ograniczenie zostało rozwiązane przez modele analizy struktury czasowej.

1.3.3 MODELE WIDMOWO-CZASOWE

Koncepcja modeli widmowo-czasowych powstała ze względu na ograniczenia poprzednich klas modeli, które zostały przedstawione w podrozdziałach 1.3.1 i 1.3.2. Podstawowym założeniem modeli „mieszanych” było stwierdzenie, iż pomimo istnienia faktu rozróżnialności i nierozróżnialności składowych musi istnieć jeden mechanizm percepcji wysokości dźwięków złożonych, który działa poprawnie bez względu na rodzaj pobudzenia. Innym bodźcem do stworzenia tych modeli był brak biologicznych dowodów na istnienie mechanizmów odpowiedzialnych za percepcję wysokości residualnych opisywanych modelami analizy pobudzenia tzn. funkcji poszukiwania podharmonicznych i ich grupowania się. Ponadto duże wątpliwości budziła rola fazy uczenia się schematów rozpoznawania wysokości residualnych na podstawie wcześniej zdobytych informacji, opisanych przez Terhardta, szczególnie w aspekcie sygnału mowy. Również wczesny model struktury czasowej pobudzenia, budził pewne wątpliwości, gdyż bazował jedynie na informacji o fali wejściowej nie uwzględniając mechanizmów zachodzących przy pobudzeniu układu słuchowego np.: transmisja przez ucho środkowe, przetwarzanie układ kostny-ślimak, filtrowanie, pobudzenie błony podstawnej itp. .

Głównym założeniem modeli widmowo-czasowych (mieszanych) jest wykorzystanie funkcji autokorelacji jako przedstawienia struktury czasowej wyładowań impulsów neuronowych [89][94][101][102][167][168]. Taki sposób przedstawienia aktywności neuronowej w dziedzinie czasu został zaproponowany na podstawie prac Licklidera [89][90][91], który zauważył, że funkcja autokorelacji może zostać wykorzystana do modelowania procesu określania wysokości dźwięków złożonych. Jednakże jego prace, jako zwolennika teorii czasowej, nie uwzględniały procesów zachodzących na błonie podstawnej, lecz koncentrowały się na odpowiedzi neuronowej układu słuchowego.

Pomimo istnienia wielu modeli widmowo-czasowych, zwanych również autokorelacyjnymi, główne założenia i sposoby ekstrakcji informacji są podobne, a ewentualne różnice wynikają ze sposobu doboru odpowiednich stałych w równaniach funkcji, wpływając na ich dokładność w opisie poszczególnych etapów przetwarzania wejściowej fali pobudzającej. Można jednak założyć, że określenie wysokości dźwięku złożonego odbywa się w następujący sposób:

Etap I – Przejście fali pobudzającej przez ucho zewnętrzne i środkowe

Fala pobudzająca ulega wstępnemu wzmocnieniu w paśmie częstotliwości od 2. do 5. kHz w kanale ucha zewnętrznego zakończonym błoną bębenkową [26][164][191]. Następnie, w uchu środkowym, nakładana jest kolejna funkcja przeniesienia, która ma wyraźne maksimum w okolicach 1 kHz [120]. Najczęściej funkcje przeniesienia ucha zewnętrznego i środkowego są traktowane jako jedna funkcja pasmowo-przepustowa. W wielu jednak pracach ten etap jest pomijany ze względu na niewielki wpływ na otrzymywane wyniki.

Etap II – Pobudzenie błony podstawnej

Błona podstawna zachowuje się jak zestaw filtrów pasmowo-przepustowych realizując wstępną analizę częstotliwościową fali pobudzającej. Częstotliwości środkowe każdego z filtrów (tzw. filtrów słuchowych) są nieliniowo rozłożone na osi częstotliwości. Jako model filtru słuchowego przyjmuje się filtr pasmowo-przepustowy zaprojektowany za pomocą funkcji gammatone [15][17][77][125][126]. Odpowiedź impulsowa takiego filtru jest opisana zależnością:

$$g_t(t) = A \cdot t^{N-1} e^{-2\pi \cdot b \cdot ERB(f_c)} \cdot \cos(2\pi f_c t + \varphi) \quad (21)$$

gdzie:

f_c – częstotliwość środkowa filtru

$ERB(f_c)$ – ekwiwalentna szerokość prostokątna filtru o częstotliwości środkowej f_c

A , N , b , φ – parametry zależne od modelu określające dokładność otrzymywanej charakterystyki filtru

Model ten został jednak udoskonalony poprzez wprowadzenie funkcji gammachirp określonej wzorem (22), która dzięki parametrowi c powoduje asymetryczną korekcję charakterystyki amplitudowo-częstotliwościowej filtru [71][72][73] ze względu na poziom sygnału wejściowego i pozwala w jak najdokładniejszy sposób modelować zachowanie się określonego miejsca błony podstawnej.

$$g_c(t) = A \cdot t^{N-1} e^{-2\pi \cdot b \cdot ERB(f_c)} \cdot \cos(2\pi f_c t + c \ln(t) + \varphi) \text{ dla } t > 0 \quad (22)$$

gdzie:

c – parametr odpowiedzialny za asymetrię charakterystyki amplitudowo-częstotliwościowej filtru

Kształt filtru słuchowego został określony w badaniach psychofizycznych [92][95][151]. Przyjmuje się, że wraz ze wzrostem poziomu bodźca staje się asymetryczny ze względu na większą stromość zbocza charakterystyki amplitudowo-częstotliwościowej od strony częstotliwości większych od częstotliwości środkowej filtru. Również szerokość filtru słuchowego została określona w pracach [40][165] i wyrażona jest przez zależność:

$$ERB(f) = 24,7 \cdot \left(4,37 \cdot \frac{f}{1000} + 1\right) \quad (23)$$

Ustalono również liczbę filtrów słuchowych, wynoszącą 24 lub 25, co wystarcza do odzwierciedlenia zjawisk zachodzących podczas przetwarzania fali pobudzającej przez błonę podstawną [78][81][196]. Jednak ze względu na rozwój technik komputerowych, w celu dokładniejszego modelowania procesu filtracji na błonie podstawnej, przyjmuje się liczbę filtrów od 24 aż do 512.

Etap III – Powstawanie impulsów w neuronach

Po wyjściu z określonego filtru słuchowego sygnał jest zamieniany na impuls nerwowy w danym włóknie nerwowym pobudzonym do generacji impulsów poprzez ruch błony podstawnej [97][98][100]. Za pośrednictwem wewnętrznych komórek słuchowych mechaniczne pobudzenie błony podstawnej powoduje zmianę ilości substancji zwanej transmiterem w szczeliny synaptycznej pomiędzy włóknem nerwowym, a odpowiadającą mu wewnętrzną komórką słuchową. Ilość substancji w szczeliny zależy od amplitudy sygnału w danym paśmie (wychylenia danego punktu błony), który moduluje przepuszczalność błony wewnętrznej komórki słuchowej $k(t)$ według wzoru:

$$k(t) = g \cdot \Delta t \frac{w_f(t) + A}{w_f(t) + A + B} \quad (24)$$

gdzie:

$k(t)$ – przepuszczalność membrany

$w_f(t)$ – wartość chwilowa sygnału w danym paśmie

Δt – przedział czasu, w którym wykonywane są obliczenia, zwykle przyjmowany jako 0,05 ms

A, B, g – parametry zależne od modelu

Prawdopodobieństwo generacji impulsu nerwowego $p(t)$ zależy od całkowitej ilości transmitera $c(t)$ w szczeliny synaptycznej, która wywołuje powstanie potencjału czynnościowego we włóknie nerwowym.

$$p(t) = h \cdot c(t) \Delta t \quad (25)$$

gdzie:

h – parametr danego modelu

Następuje więc zamiana ruchu mechanicznego błony podstawnej na generację impulsów neuronowych.

Etap IV – Uwzględnienie aktywności włókna nerwowego

W zależności od złożoności modelu uwzględnia się również wpływ historii aktywności danego włókna nerwowego na prawdopodobieństwo generacji kolejnych impulsów:

$$p'(t) = p(t) \left[1 - \sum_{i=1}^{\infty} p'(t-i\Delta t) W(t-i\Delta t) \right] \quad (26)$$

gdzie:

$p'(t)$ – prawdopodobieństwo generacji impulsu po uwzględnieniu historii aktywności włókna

$W(t)$ – funkcja wagowa dla danego modelu

Etap V – Przedstawienie struktury czasowej wyładowań impulsów nerwowych w neuronie

Ponieważ struktura czasowa wyładowań impulsów nerwowych we włóknach odpowiada strukturze czasowej pobudzenia wywołującego ten impuls, zaproponowano funkcję autokorelacji (wzór 27) jako przedstawienie prawdopodobieństwo rozkładu interwałów czasowych pomiędzy impulsami neuronowymi dla danego neuronu.

$$h(t, \delta t, k) = \sum_{i=1}^{\infty} p(t-i\Delta t) p(t-i\Delta t - \delta t) e^{-\frac{i\Delta t}{\Omega} \Delta t} \quad (27)$$

gdzie:

δt – długość interwału czasowego pomiędzy impulsami w danym czasie t

k – określa dany kanał słuchowy

Ω – parametr zależny od modelu

Etap VI – Określenie wysokości pobudzenia

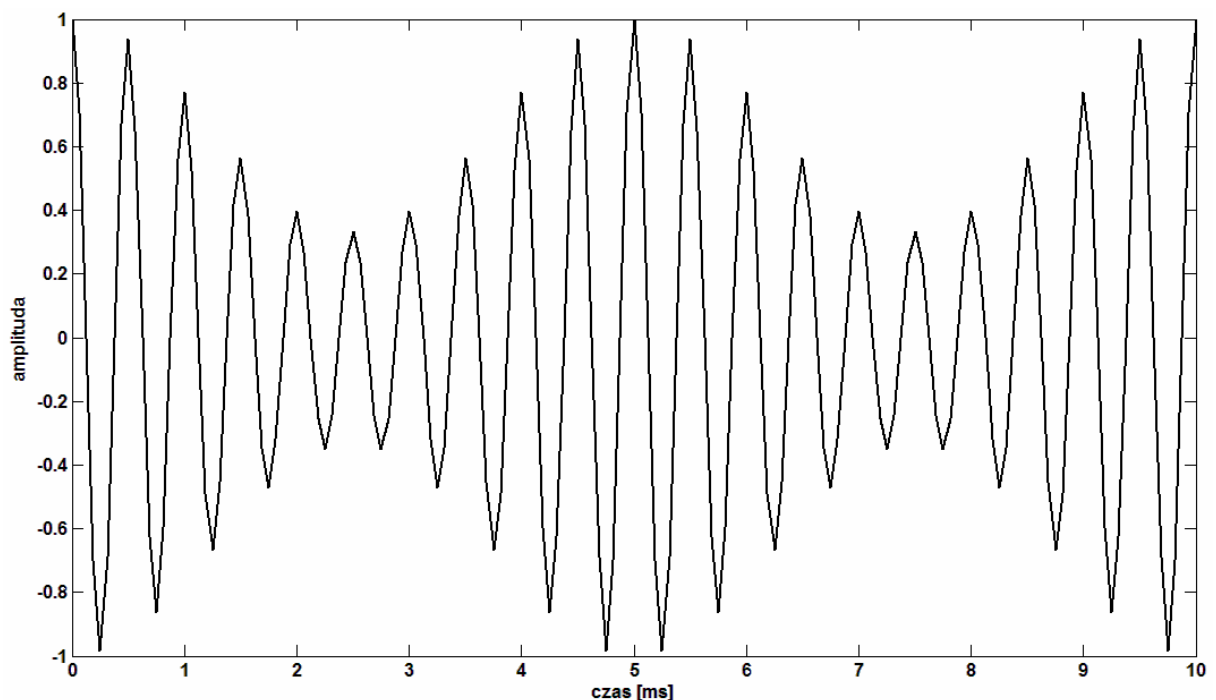
Na podstawie funkcji autokorelacji ze wszystkich kanałów słuchowych określana jest sumaryczna funkcja autokorelacji (wzór 28), która reprezentuje sumaryczne prawdopodobieństwo rozkładu interwałów czasowych pomiędzy impulsami neuronowymi dla danego pobudzenia:

$$s(t, \delta t) = \sum_{k=1}^n \frac{h(t, \delta t, k)}{n} \quad (28)$$

gdzie:

n – liczba kanałów słuchowych zależna od przyjętego modelu

Percypowaną wysokość dźwięku złożonego określa się na podstawie odwrotności opóźnienia czasowego, dla którego występuje lokalne pierwsze maksimum (z wyjątkiem maksimum występującego dla opóźnienia czasowego $\tau=0$) w sumarycznej funkcji autokorelacji.



Rys. 2. Sumaryczna funkcja autokorelacji dla pobudzenia otrzymanego poprzez modulację amplitudową składowej nośnej $f=2000\text{ Hz}$ składową modulującą $g=200\text{ Hz}$

W zależności od modelu niektóre etapy przetwarzania były pomijane ze względu na mały wpływ na otrzymywane wyniki (Etap I i IV), bądź też ówczesny stan wiedzy

nie pozwalał na ich implementację (Etap III). Biorąc pod uwagę te uproszczenia bądź ograniczenia, sumaryczna funkcja autokorelacji liczona była na podstawie funkcji autokorelacji przebiegów czasowych pobudzeń na wyjściu z każdego filtru słuchowego, które reprezentowały czasową strukturę wyładowań neuronowych we włóknach nerwowych bez uwzględnienia biologicznych aspektów generacji impulsów nerwowych.

Główną cechą i zaletą modeli autokorelacyjnych jest fakt, iż uwzględnia się informacje pochodzące z błony podstawnej (filtrowanie) i łączy się je z informacją o czasowej strukturze wyładowań neuronowych. Zastosowanie takiego podejścia łączy dotychczasowe teorie percepcji dźwięku proponując jeden model określenia wysokości dźwięku.

1.3.4 INNE MODELE WYSOKOŚCI

Modele oparte o wykorzystanie funkcji autokorelacji dają wyniki zgodne z eksperymentami psychoakustycznymi w wielu aspektach dotyczących wysokości dźwięków złożonych m.in.: w określaniu wysokości residualnej, wyznaczaniu rejonu dominującego percepcję residuum, uwzględnieniu rejonów częstotliwościowych, w których znajduje się pobudzenie, wpływ fazy poszczególnych składowych na percepcję wysokości. Pomimo tak dużej uniwersalności, najnowsze badania dotyczące modelowania procesu percepcji wysokości dźwięków złożonych ukazują pewne ograniczenia tej klasy modeli.

Głównym założeniem tej klasy modeli jest ujednoczenie procesu percepcji wysokości bez względu na rozróżnialność składowych w wyniku użycia tylko jednej funkcji (autokorelacji). To założenie zostało jednak podważone, już w trakcie tworzenia się modeli autokorelacyjnych, niezależnymi eksperymentami przeprowadzonymi przez Houtsmę i Smurzyńskiego [69], Carlyona i Shackletona [18], Steinschneidera [175] oraz Grimaulta [51]. Na podstawie tych badań stwierdzono różne zachowanie się układu słuchowego dla pobudzeń posiadających tylko rozróżnialne, bądź tylko nierozróżnialne składowe. Nasuwające się wnioski były następujące: istnieją dwa niezależne mechanizmy percepcji wysokości dźwięków złożonych. Dla składowych rozróżnialnych słuchem informacje potrzebne do określenia wysokości są czerpane z wzorców pobudzeń rozseparowanych składowych. Za percepcję wysokości dźwięków złożonych ze składowych nierozróżnialnych słuchem odpowiada przebieg czasowy obwiedni pobudzenia na błonie podstawnej.

W 1997 roku Chaveigne opublikował pracę [20] dotyczącą modelu percepcji wysokości, w którym funkcję autokorelacji zastąpił skorygowaną funkcją różnicową *RDF*,

która odpowiadała przekształconej względem osi czasu, a dokładniej opóźnienia, funkcji autokorelacji.

$$RDF = \int_{-\infty}^t w(t-\theta)R_{\tau}(\theta)d\theta \quad (29)$$

gdzie:

$w(t)$ – funkcja okna czasowego nałożonego na RDF

$$R_{\tau}(\theta) = \max(0, s(\theta) - s(\theta - \tau)) \quad (30)$$

gdzie:

$s(t)$ – gęstość prawdopodobieństwa wyładowań

Sumaryczna skorygowana funkcja różnicowa wyraża się zależnością:

$$SRDF = \sum_{i=1}^n \frac{1}{i} RDF(i) \quad (31)$$

gdzie:

n - liczba kanałów słuchowych zależna od przyjętego modelu

Maksima funkcji autokorelacji odpowiadają minimom w skorygowanej funkcji różnicowej. Wysokość określana jest na podstawie odwrotności opóźnienia czasowego dla pierwszego minimum w $SRDF$. Głównym powodem zamiany funkcji badającej koincydencję wyładowań neuronowych na $SRDF$ był fakt, iż funkcja autokorelacji nie zmienia się dla pobudzeń posiadających to samo widmo, lecz różne obwiednie czasowe. Zastąpienie operacji mnożenia odejmowaniem powoduje wykrycie tych różnic i rozróżnienie percepcyjne tych pobudzeń. Ponadto model Chaviegné'a przewiduje z tą samą dokładnością również wszystkie aspekty dotyczące zjawiska residuum, co model autokorelacyjny.

Kolejnym powodem, dla którego zaczęto tworzyć inne teorie percepcji wysokości jest fakt, iż funkcja autokorelacji nie jest w stanie rozróżnić interwałów czasowych pierwszego rzędu (pomiędzy kolejnymi impulsami neuronowymi) od interwałów wyższego rzędu (pomiędzy dowolnymi impulsami neuronowymi). Dowody eksperymentalne zostały zawarte w pracach Hartmanna [58] oraz Kaernbacha i Demany'ego [79].

Zastosowanie modelu autokorelacyjnego prowadzi również do trudności w prawidłowym oszacowaniu relacji progów różnicowego częstotliwości podstawowej wielotonu $DL(f_0)$ w funkcji numeru najniższej harmonicznej tego wielotonu. Ukazuje wzrost $DL(f_0)$ przy jednoczesnym wzroście numeru harmonicznej. Proponowane przez Bernsteina i Oxenhama [8] zmiany w modelu Meddisa i Hewitta [102] powodują prawidłowe działanie modelu w oparciu o wyniki eksperymentów psychoakustycznych [122][163] tzn.

zmniejszanie się $DL(f_0)$ przy wzroście numeru harmonicznej. W celu osiągnięcia pożądanego efektu Bernstein i Oxenham zaproponowali uwzględnienie w sumarycznej funkcji autokorelacji miejsca pobudzenia błony podstawnej poprzez wprowadzenie okna czasowego działającego w dziedzinie opóźnienia ograniczającego odpowiedź danego filtra słuchowego tylko do ograniczonego zakresu repetycji fali wejściowej.

Oprócz zmian proponowanych przez Bernsteina i Oxenham zostało zaproponowane szereg innych modyfikacji modelu autokorelacyjnego, które miały na celu uwzględnienie jak największej ilości wyników otrzymywanych w eksperymentach psychoakustycznych. Patterson [119][120] i Yost [192] wprowadzili normalizację funkcji autokorelacji do wartości maksimum położonego dla opóźnienia czasowego $\tau = 0$ w celu poprawienia oceny siły wysokości szumu przerywanego. Pressnitzer [137], Krumbholz [86], Cedolin i Delgutte [20] zaproponowali odpowiednie ważenie sumarycznej funkcji autokorelacji, które uwypukla znaczenie wyższych składowych dźwięku złożonego, co pozwoliło m.in. na modelowanie wzrostu najniższej wartości częstotliwości f_0 , która wywołuje wrażenie melodii dla wysokich numerów harmonicznych. Wiegrebe [186] wprowadził uzależnienie stałej czasowej τ w funkcji autokorelacji od wartości opóźnienia czasowego, co pozwoliło na modelowanie różnego zachowania się sumarycznej funkcji autokorelacji dla wielotonów o różnych f_0 . Lopez-Podeva i Meddis [92] wprowadzili nieliniowy zestaw filtrów słuchowych, który uwzględniał kompresję poziomu pobudzenia przez błonę podstawną.

Przeciwnicy wykorzystania funkcji autokorelacji w procesie percepcji wysokości, jako główny argument podawali brak biologicznych podstaw do przyjęcia teorii o istnieniu takiej funkcji, a szczególności zestawu linii opóźniających, które odpowiadają za obliczanie funkcji autokorelacji dla poszczególnych kanałów słuchowych. Ten argument został przedstawiony m.in. w pracy Chaveigne'a [69], ale najwyraźniej został zaakcentowany w pracy Shamma i Kleina [165], którzy przedstawiają model percepcji wysokości bazujący na tworzeniu się harmonicznych wzorców (szablonów) pobudzeń uzasadnionych fizjologią narządu słuchu. Proces tworzenia wzorców składa się z dwóch etapów:

- filtracji na błonie podstawnej z uwzględnieniem nieliniowości i rozdzielczości filtrów słuchowych, zmiany fazy fali biegnącej w pobliżu częstotliwości środkowej filtru i procesów nieliniowych reprezentujących zachowanie się komórek nerwowych
- wykorzystania macierzy koincydencji do zróżnicowania informacji ze wszystkich filtrów słuchowych. Percypowaną wysokość otrzymuje się poprzez odpowiednie sumowanie informacji zawartej w harmonicznych wzorcach pobudzeń.

W odpowiedzi na zarzuty dotyczące modeli autokorelacyjnych Meddis [104] w oparciu o prace [99][190] przedstawia model, który funkcję autokorelacji zastępuje operacjami na złożonej strukturze neuronowej. O złożoności modelu może świadczyć fakt, iż błona podstawna jest modelowana jako zestaw 40. kanałów słuchowych, a każdy z nich składa się z 30. modułów o różnych charakterystycznych częstotliwościach wyładowań. Natomiast każdy moduł składa się z 10. jednostek reprezentujących sygnały neuronowe, a każda jednostka reprezentuje 30 włókien nerwowych odpowiadających na tę samą częstotliwość. W końcowej fazie modelu nie są reprezentowane tylko wyładowania neuronów wspólne dla wszystkich kanałów słuchowych, ale suma wszystkich wyładowań występujących w każdym z kanałów. Na podstawie zależności częstości nasycenia wyładowań neuronu od częstości jego wyładowań szacowana jest percypowana wysokość pobudzenia. Modyfikacja modelu zaproponowana przez Meddisa pozwoliła na poprawne przewidywanie wyników eksperymentów psychoakustycznych oraz odparcie zarzutów postawionych w stosunku do modeli autokorelacyjnych.

1.3.5 BADANIA, KTÓRE WYWARŁY NAJWIĘKSZY WPŁYW NA TWORZENIE SIĘ TEORII I MODELI PERCEPCJI WYSOKOŚCI DŹWIĘKU

1.3.5.1 ROZDZIELCZOŚĆ CZĘSTOTLIWOŚCIOWA ORGANU SŁUCHU.

W 1940 roku Fletcher wykonał eksperyment [37] polegający na badaniu progu detekcji pobudzenia sinusoidalnego w obecności maskera, którym był szum o częstotliwości środkowej pasma równej częstotliwości pobudzenia i stałej gęstości widmowej mocy. Poprzez zmianę szerokości pasma szumu zmieniała się energia szumu w pobliżu sygnału pobudzającego i zmieniał się próg detekcji tego sygnału. Jednak po przekroczeniu pewnej granicznej wartości szerokości pasma szumu, dalsze jego zwiększanie nie wpływało na próg detekcji sygnału. Ta graniczna szerokość pasma szumu o danej częstotliwości została nazwana wstęgą krytyczną i opisywała szerokość filtra słuchowego dla danej częstotliwości. Eksperyment Fletchera został potwierdzony w wielu niezależnych badaniach [56][48][154][174]. Na tej podstawie przyjęto założenie o zachowaniu się błony podstawnej jako zestawu filtrów pasmowo-przepustowych. Fletcher przyjął prostokątny kształt filtra słuchowego, który jednak nie odpowiadał wynikom eksperymentów psychoakustycznych [125][185] i został zastąpiony funkcją gammachirp, która wykazuje asymetrię charakterystyki

częstotliwościowej (patrz rozdział 1.3.3). Kształt i szerokość filtrów słuchowych określono w niezależnych eksperymentach [40][93][95][151][166].

Na podstawie badań neurologicznych [27] zauważono również, że ekwiwalentna szerokość prostokątna (ERB) filtrów słuchowych odpowiada ERB krzywych strojenia pojedynczych neuronów nerwu słuchowego. Ponadto można również założyć, że rozmieszczenie wstęg krytycznych na błonie podstawnej ma charakter ciągły tzn., że filtry słuchowe zachodzą na siebie [40]. Ma to bardzo ważne konsekwencje w procesie percepcji dźwięku, gdyż przy danej częstotliwości bodźca informacja o pobudzeniu nie jest czerpana tylko z filtru o częstotliwości identycznej jak pobudzenie, ale również z sąsiednich filtrów słuchowych [114].

Istnienie filtrów słuchowych o zmieniającej się szerokości wraz ze zmianą częstotliwości środkowej takiego filtru doprowadziło do zapoczątkowania badań nad rozróżnialnością składowych dźwięku złożonego. W 1964 roku Plomp opublikował pracę [131], w której ukazane zostały zdolności analityczne układu słuchowego. Eksperyment polegał na określeniu, czy prezentowany ton prosty o częstotliwości równej częstotliwości jednej ze składowych wielotonu o dwunastu składowych, jest składową tego dźwięku. Dla porównania prezentowany był inny ton prosty, którego częstotliwość była różna od częstotliwości składowych wielotonu. Podobne badania zostały przeprowadzone również Przez Plompa i Mippena w 1968 [134] roku z większą liczbą słuchaczy. Na podstawie wyników stwierdzono, że organ słuchu jest w stanie rozróżnić od 5. do 7. składowych wielotonu, a rozróżnienie składowych jest możliwe jest tylko wtedy, gdy leżą one w sąsiednich wstęgach krytycznych. Wyniki były zgodne z koncepcją wstęg krytycznych przedstawionych we wcześniejszych pracach z tamtego okresu. Od momentu przeprowadzenia eksperymentu właściwości organu słuchu w odniesieniu do zjawisk związanych z percepcją wysokości były zawsze odnoszone do szerokości wstęgi krytycznej.

Ważnym spostrzeżeniem wynikającym z eksperymentów Plompa [131] oraz Moore'a i Ohgushiego [119] był fakt, iż składowe brzegowe wielotonu są lepiej rozróżniane, bez względu na odległość pomiędzy nimi, niż składowe „wewnętrzne”. W eksperymencie Moore'a i Ohgushiego odległość pomiędzy składowymi wyrażona była poprzez ekwiwalentną szerokość prostokątną filtru słuchowego ERB. Okazało się, że najlepszą rozróżnialność składowych otrzymuje się, jeśli odległości pomiędzy składowymi są równe około 1.25 ERB, co potwierdzało wcześniejsze eksperymenty Plompa, który stwierdził, że potrzebny jest odstęp co najmniej 1.0 ERB, aby rozseparować składowe wielotonu. Przeprowadzone eksperymenty zostały potwierdzone również najnowszymi badaniami z tego

zakresu przez Moore [118], który wykazał również wpływ poziomu całkowitego pobudzenia i częstotliwości składowych na rozróżnialność składowych wielotonu.

Najnowsze eksperymenty dotyczące pośrednio rozdzielczości częstotliwościowej organu słuchu Moore i inni [117], Renker i inni [141] rozważają również rejon przejściowy pomiędzy $9 < n < 12$, w którym percepcja wysokości opiera się zarówno na wzorcach spektralnych oraz na czasowej informacji pobudzenia nerwu słuchowego.

Eksperymenty wykonane przez Bernsteina i Oxenhama [7] rozszerzają nawet zakres składowych rozróżnialnych słuchem do 9. – 11. składowych.

Należy jednak zauważyć, że teoria wstęg krytycznych tłumacząca wiele aspektów percepcji wysokości dźwięków przez człowieka, nie jest jedynym wyznacznikiem, względem którego należy rozpatrywać wpływ różnego rodzaju pobudzeń na ich percepcję. Najnowsze badania dotyczące pomiaru progów różnicowych $DL(f_0)$ dyskryminacji częstotliwości brakującej składowej f_0 [7] wskazują, że największy wpływ na otrzymywane wyniki ma numer harmoniczej, a nie region częstotliwościowy, w którym znajduje się składowa, czy też całe pobudzenie. Ponadto wcześniejsze eksperymenty dotyczące dyskryminacji składowych wielotonu wykazały, że musi istnieć jeszcze jakiś inny mechanizm wspomagający proces analizy dźwięku złożonego [33].

1.3.5.2 OBSZAR WYSTĘPOWANIA RESIDUUM

Ważnym aspektem dotyczącym percepcji dźwięków złożonych jest rejon występowania samego zjawiska residuum. W 1962 roku Ritsma przeprowadził eksperyment dotyczący wyznaczenia rejonu występowania zjawiska residuum dla trójtonów metodą modulacji amplitudowej składowej nośnej [144], która była jednocześnie dominującą składową tego pobudzenia. Na podstawie wyników eksperymentów wyznaczono rejon występowania residuum tonalnego tzn. takiego wrażenia wysokości residualnej, które pozwala na tworzenie melodii i zachowanie interwałów muzycznych. Ritsma pokazał, że residuum zachowuje tonalność dla składowych o numerze porządkowym $n < 20$ oraz odległości pomiędzy składowymi nie większej niż $\Delta f < 800 \text{ Hz}$. Ponadto zmniejszenie głębokości modulacji składowej nośnej, odpowiadające zwiększeniu dominacji składowej nośnej powoduje drastyczne zawężenie rejonu występowania zjawiska residuum tylko do składowych rozróżnialnych słuchem. Rozszerzenie badań na większą liczbę składowych [145] pozwoliło na stwierdzenie, iż residuum może być tworzone tylko wtedy, gdy co najmniej trzy składowe leżą w zakresie istnienia residuum tonalnego.

Wyniki Ritsmy zostały zweryfikowane przez wielu badaczy, którzy sprawdzali, czy możliwa jest percepcja residuum dla składowych nierozróżnialnych słuchem [69][113][133]. Na podstawie badań stwierdzono, że możliwa jest percepcja residuum dla składowych zawierających się tylko w jednym filtrze słuchowym, ale samo zjawisko staje się niejednoznaczne pod względem oceny wysokości.

Najnowsze badania [7][117][141] poruszające problem zjawiska residuum pokazują, że numer składowej może znacznie przewyższać $n = 20$, a wysokość jest jednoznacznie percypowana przez słuchaczy. Trzeba jednak zaznaczyć, że jednoznaczna percepcja zjawiska residuum dla wysokich numerów harmonicznym n wymaga użycia pobudzeń o większej liczbie składowych.

Istnieją również poglądy mówiące o tym, iż nie numer harmonicznym, a bezwzględna częstotliwość składowych jest warunkiem jednoznacznej percepcji zjawiska residuum. Na podstawie badań neurofizjologicznych [123][149] stwierdzono brak synchroniczności fazowej wyładowań neuronowych dla $f > 5 \text{ kHz}$, co powoduje znaczne ograniczenie, a wręcz zanik zjawiska residuum.

Oprócz badań nad górną granicą występowania zjawiska residuum przeprowadzono również eksperymenty określające dolną granicę występowania zjawiska residuum. Na podstawie badań [84][85] stwierdzono, że słuchacze są w stanie określić jednoznacznie wysokość residualną dla składowej podstawowej $f_0 = 30 \text{ Hz}$.

Zmienił się również zakres występowania zjawiska residuum ze względu na odległość pomiędzy składowymi dźwięku złożonego, która pozwala na jednoznaczną percepcję wysokości residualnej i na podstawie prac Moore'a [113] wynosi ona nawet 1400 Hz .

1.3.5.3 REJON DOMINUJĄCY WYSTĘPOWANIA ZJAWISKA RESIDUUM

Spory dotyczące roli górnych bądź dolnych harmonicznym w tworzeniu wysokości residualnych doprowadziły do przeprowadzenia eksperymentów mających na celu stwierdzenie, które składowe odgrywają znaczącą rolę w tworzeniu wrażenia wysokości residualnych. Eksperyment Plompa [133] polegał na porównaniu wysokości dwóch wielotonów o tej samej liczbie składowych. W jednym z nich część składowych było harmonicznymi o podstawowej równej $0.9 f_0$, natomiast częstotliwości pozostałych składowych były wielokrotnościami $1,1 f_0$. W drugim wielotonie sytuacja była odwrócona. Eksperyment polegał na stwierdzeniu, dla jakiej liczby dolnych harmonicznym wysokość pierwszego wielotonu jest niższa niż drugiego. Podobny eksperyment przeprowadził Ritsma

[154], który porównywał wysokości wielotonów, w których do pewnej częstotliwości granicznej składowe miały przesuniętą częstotliwość podstawową (6 Hz) w stosunku do pozostałych składowych. Na podstawie eksperymentu stwierdzono, że dla częstotliwości podstawowej w granicach f_0 od 100 do 400 Hz dominującą rolę odgrywają składowe o numerach 3, 4 i 5. Obserwacje te zostały potwierdzone w niezależnych eksperymentach [13][147]. Późniejsze badania [116] pokazały jednak pewne różnice zależne od słuchacza oraz bezwzględnej wartości częstotliwości [128][133].

Przedstawione wyniki badań potwierdzają tezę, że rozróżnialne słuchem składowe tworzą dominujące wrażenie wysokości residualnej. Nowe badania [23] dotyczące dominacji składowych w procesie percepcji wysokości jedynie precyzują rejon dominujący odnosząc go do częstotliwości bezwzględnych składowych, położonych w pobliżu częstotliwości $f = 600$ Hz w zakresie częstotliwości podstawowych f_0 od 100 do 800 Hz, a nie numeru harmonicznej.

1.3.5.4 ROLA NIELINIOWOŚCI SŁUCHU W PERCEPCJI ZJAWISKA RESIDUUM

Już w XVIII wieku zwrócono uwagę na istnienie dodatkowych składowych rozróżnialnych słuchem, które nie były obecne w sygnale, ale wpływały na ogólną percepcję pobudzenia. Późniejsze spostrzeżenia [1][2][3][30][36][153] dotyczyły jedynie stwierdzenia, iż dodatkowe składowe pojawiające się w procesie percepcji pobudzenia są wynikiem nieliniowości organu słuchu. W odniesieniu do zjawiska residuum, tłumaczono je jako rezultat wytworzenia przez organ słuchu nieliniowego składnika pierwszego rzędu $f_2 - f_1$, czyli tonu różnicowego. Dopiero badania przesunięcia wysokości residualnej Schoutena [155][156][157][158] pokazały, że residuum nie jest tworzone przez ton różnicowy.

Przy wyznaczaniu progów detekcji nieliniowych składowych wprowadzanych przez organ słuchu posługiwano się głównie metodą wycinania percypowanego zakłócenia sygnału poprzez wprowadzanie dodatkowego składnika do pobudzenia o odpowiednio dobranych parametrach (częstotliwość, poziom, faza). Parametry dodatkowego składnika, dla których zakłócenie zniknęło z sygnału, określały parametry poszukiwanego tonu różnicowego. Inną metodą stosowaną do wyznaczenia tonu różnicowego było określenie częstotliwości pojawiających się zakłóceń sygnału dla danych poziomów składowych.

Pierwsze sformalizowane eksperymenty dotyczące poziomu tonu różnicowego przy pobudzeniu dwutonem przeprowadził Zwicker [194] w 1955 roku. Na podstawie otrzymanych wyników stwierdził, że ton różnicowy dla pobudzenia $f_d = 1000$ Hz

i $f_g = 1400 \text{ Hz}$ o poziomach z zakresu $L_d = L_g = 60 - 80 \text{ dB SPL}$ nie przekracza poziomu $L_r = 20 \text{ dB SPL}$.

Plomp [132] na podstawie swoich eksperymentów określił poziomy składowych dwutonów, dla których wystąpi próg percepcji tonu różnicowego o częstotliwości f_d zawartej między $350 - 8000 \text{ Hz}$. Aby ton różnicowy był postrzegany, poziom każdej ze składowych dwutonu musiał mieć wartość: 57.4 dB SL dla $f_g - f_d = 100 \text{ Hz}$, 52.6 dB SL dla $f_g - f_d = 200 \text{ Hz}$ oraz 51 dB SL dla $f_g - f_d = 400 \text{ Hz}$. Należy jednak zauważyć, iż w eksperymentach tych stwierdzono jednak duże różnice międzysobnicze wynoszące nawet 15 dB .

Hall [53] otrzymuje postrzeganie tonu różnicowego dla $L_d = L_g = 58 \text{ dB SPL}$ przy $f_d = 368, 538, 926$ i 1475 Hz oraz $f_g/f_d = 1.2$ na poziomie od -20 do -30 dB . Zurek i Leshowitz [194] dla $L_d = L_g = 60 \text{ dB SPL}$ podają poziom tonu różnicowego $L_r = 30 \text{ dB SPL}$ dla $f_d = 620 \text{ Hz}$ i $f_g/f_d = 1.3$. Humes [70] określił poziom tonu różnicowego $L_r = -25 \text{ dB}$ dla $f_d = 1000 \text{ Hz}$ i $f_g/f_d = 1.1$. Należy jednak zauważyć, że przeprowadzone eksperymenty stwierdzają obniżenie poziomu tonu różnicowego przy wzroście odległości pomiędzy składowymi oraz jego wzrost dla składowych o większych częstotliwościach. Przeprowadzone badania potwierdzają tezę, że ton różnicowy nie jest czynnikiem odpowiedzialnym za percepcję wysokości residualnej. Jednak dla wyższych poziomów pobudzenia może być z nią mylony w przypadku pobudzeń harmonicznyc.

Okazało się jednak, że nie tylko składowe nieliniowe pierwszego rzędu zmieniają percepcję dwutonów. Znacznie większy udział w percepcji wysokości residualnej posiadają składowe nieliniowe wyższych rzędów, a szczególnie drugiego $2f_1 - f_2$. Do wyznaczenia parametrów tych składowych stosowano te same metody jak dla tonu różnicowego.

W 1972 roku Smoorenburg [171] wyznaczył rejon występowania tonów różnicowych $f_1 - k(f_2 - f_1)$ dla $k = 1 - 6$. Okazało się, że ton kombinacyjny dla $k = 1$ występuje dla największego zakresu częstotliwości poniżej dolnej składowej dwutonu $f_d/f_g = 0.3 - 0.9$ w zależności od poziomu tonów składowych dwutonu oraz ich częstotliwości. Wzrost poziomu składowych powodował rozszerzenie rejonu występowania tonu kombinacyjnego w dół aż do $f_d/f_g = 0.3$, a wzrost częstotliwości składowych dwutonu powodował zawężenie tego rejonu. Rejon występowania składowych wyższych rzędów dla $k = 2 - 6$ przy ustalonych poziomach składowych dwutonu wynosił $f_d/f_g = 0.5 - 0.8$ i zmieniał się nieznacznie w zależności od parametru k .

Oprócz rejonu występowania przeprowadzono szereg prac dotyczących względnych poziomów tonów kombinacyjnych [43][53][195][197]. Na podstawie otrzymanych wyników

stwierdzono, że tony kombinacyjne dla $k = 1$ posiadają znaczący poziom od -15 do -20 dB dla $f_g/f_d = 1.1$ przy poziomie składowych dwutonu $L = 50$ dB SL. Zauważono natomiast, że względny poziom szybko maleje wraz ze wzrostem odległości pomiędzy składowymi i dla $f_g/f_d = 1.2$ wynosi od -25 do -30 dB, a dla $f_g/f_d = 1.3$ wynosi od -35 do -40 dB. Wzrost częstotliwości składowych dwutonu powoduje, że względny poziom tonów kombinacyjnych wzrasta.

Poziomy pozostałych tonów kombinacyjnych są znacznie mniejsze i wynoszą odpowiednio dla $f_g/f_d = 1.1$ dla $k = 2$ od -30 do -35 dB oraz dla $k = 3$ od -40 do -45 dB w zależności od częstotliwości i poziomu składowych.

Podsumowując prace dotyczące tworzenia się składowych nieliniowych w organie słuchu można stwierdzić, że największy wpływ na percepcję danego pobudzenia mają tony kombinacyjne dla $k = 1$. Brakuje jednak ilościowego stwierdzenia, w jakim stopniu tego typu tony wpływają na percepcję wysokości residualnej.

Oprócz określenia poziomów i rejonu występowania tonów kombinacyjnych znacznie ważniejsze wydaje się podanie przyczyny ich występowania. Oprócz ogólnego stwierdzenia, że to nieliniowość organu słuchu wpływa na powstawanie tego typu zakłóceń w sygnale nie podano konkretnych źródeł tych nieliniowości np.: Helmholtz [62] stwierdził, że tony kombinacyjne wynikają z nieliniowych transformacji pobudzenia wykonywanych przez układ słuchowy w procesie analizy częstotliwościowej. Dopiero prace Bekesy'ego [5][6] i Plompa [132] podają prawdopodobne przyczyny, stwierdzając dominującą rolę ucha wewnętrznego jako źródła zniekształceń nieliniowych, a dokładnie mechanicznych i hydrodynamicznych właściwości ślimaka, zmniejszając rolę przekształcenia ruchu błony podstawnej w impulsy nerwowe. Poglądy Plompa zostały potwierdzone również jednymi z ostatnich badań dotyczących nieliniowych zachowań układu słuchu. Prace He i Schmiedta [61] z 1997 roku oraz Hicksa i Bacona [65] z 1999 roku stwierdzają, że nieliniowości organu słuchu są wprowadzane głównie przez mechaniczne właściwości ślimaka, a szczególnie przez właściwości błony podstawnej. Nieliniowe zachowanie błony podstawnej wzrasta przy pobudzeniu miejsca w pobliżu podstawy błony, czyli dla pobudzeń o dużych częstotliwościach.

1.3.5.5 I i II EFEKT PRZESUNIĘCIA WYSOKOŚCI RESIDUALNEJ

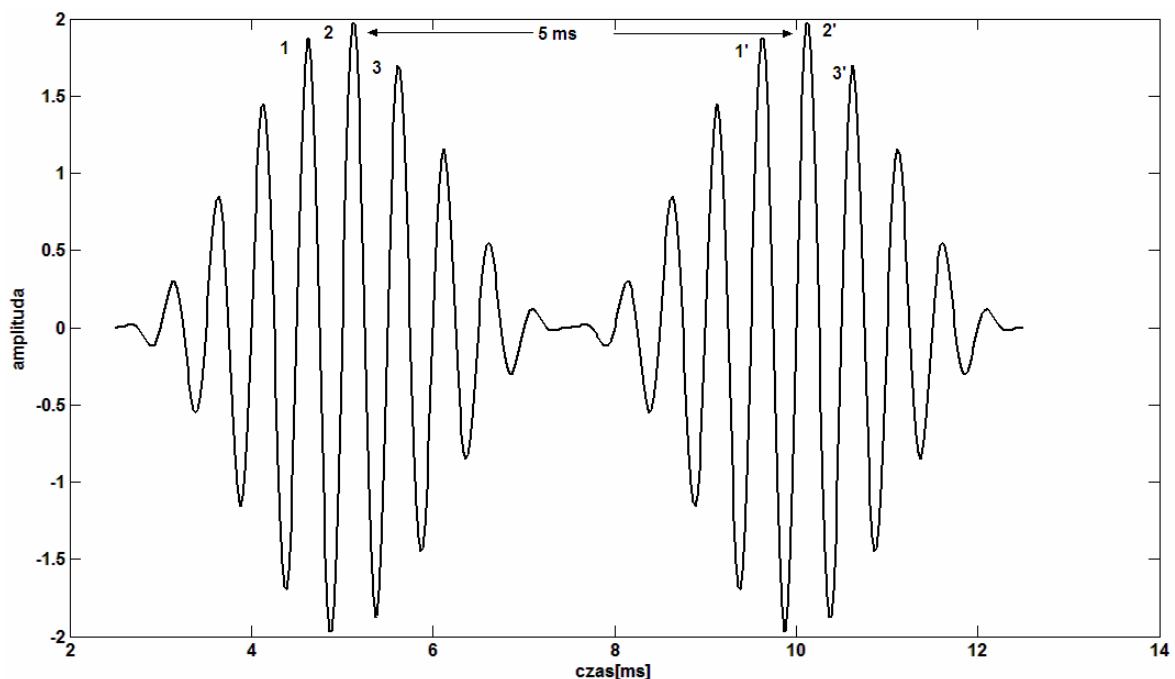
Badania wielotonów harmoniczných dały podstawy do tworzenia modeli percepcji wysokości residualnej, ale nie oddawały w pełni istoty zjawiska residuum, przede wszystkim

nie potrafiły przeciwstawić się poglądom o tworzeniu wysokości residualnej poprzez ton różnicowy wprowadzany przez nieliniowość słuchu. Dlatego też potrzebne były dowody o braku wpływu tego składnika na percepcję wysokości dźwięków złożonych. Z jednej strony dowody takie zostały przedstawione poprzez wyniki badań nad poziomem i rejonem występowania tego zakłócenia. Jednak badania opisane w podrozdziale 1.3.5.4 były wynikiem wcześniejszych eksperymentów nad percepcją wysokości wielotonów nieharmonicznych. Jednym z pierwszych właściwie ukierunkowanych badań było doświadczenie Hermanna [64] z 1912 roku (patrz podrozdział 1.1), które zapoczątkowało dalsze badania nad przesunięciem wysokości residualnej [13][156][157][180]. Również najnowsze badania dotyczące tego zjawiska [118][187] w pełni potwierdzają spostrzeżenia poczynione przez Hermanna.

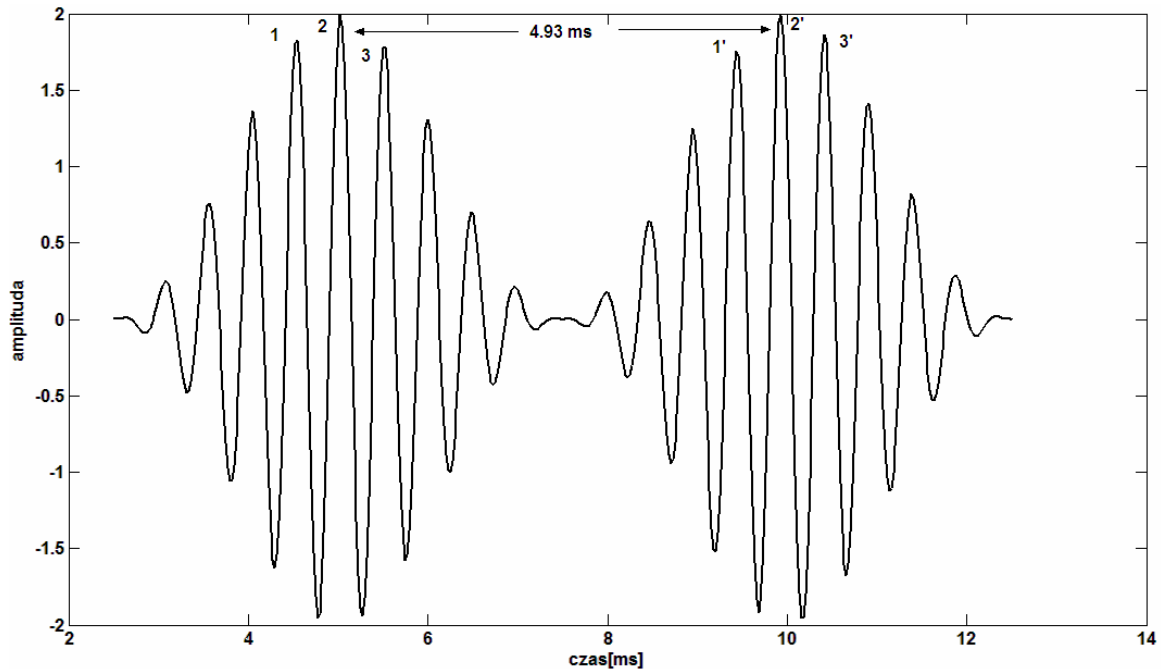
Badania dotyczące wielotonów nieharmonicznych miały kluczowy wpływ na kształtowanie się modeli percepcji tego zjawiska. Rozważmy przypadek modulacji amplitudowej składowej nośnej $a = 2030 \text{ Hz}$ składową modulującą $b = 200 \text{ Hz}$. W widmie takiego sygnału pojawią się składowe o częstotliwościach 1830 Hz oraz 2230 Hz , jednak dominującą składową będzie składowa nośna. Biorąc pod uwagę modele analizy pobudzenia, które określały percypowaną wysokość na podstawie informacji spektralnej składowych dźwięku możemy stwierdzić, iż pobudzeniu układu rozważanym trójtonem da wrażenie wysokości residualnej w pobliżu $f = 203 \text{ Hz}$. Dzieje się tak, gdyż składowe rozważanego pobudzenia są bardzo zbliżone pod względem częstotliwości do składowych trójtonu, w którym składowe są odpowiednio dziewiątą $h_9 = 1827 \text{ Hz}$, dziesiątą $h_{10} = 2030 \text{ Hz}$ i jedenastą $h_{11} = 2233 \text{ Hz}$ harmoniczną składowej podstawowej 203 Hz . Jednocześnie można przyjąć, że składowe rozważanego pobudzenia: $h_8 = 1804,8 \text{ Hz}$, $h_9 = 2030,4 \text{ Hz}$ i $h_{10} = 2225,6 \text{ Hz}$ są harmoniczną składowej podstawowej $225,6 \text{ Hz}$, lub $h_{10} = 1845 \text{ Hz}$, $h_{11} = 2029,5 \text{ Hz}$ i $h_{12} = 2214 \text{ Hz}$ harmoniczną składowej podstawowej $184,5 \text{ Hz}$. To pokazuje istotną cechę wysokości dźwięku złożonego, jakim jest niejednoznaczność jego wysokości. Na podstawie przeprowadzonych eksperymentów psychoakustycznych ta niejednoznaczność została potwierdzona. Należy jednak zaznaczyć, że dominującą składową residualną, która jest uważana za wysokość rozważanego trójtonu jest składowa podstawowa o częstotliwości $f=203 \text{ Hz}$. Samo zjawisko niejednoznaczności przy badaniu wysokości residualnych ogranicza się odpowiednim doбором zakresu dostrajania się do percypowanej wysokości pobudzenia poprzez stosowanie metod adaptacyjnych w eksperymentach psychoakustycznych.

W modelach struktury czasowej analizuje się natomiast strukturę czasową wyładowań neuronowych nerwu słuchowego. Biorąc jednak pod uwagę fakt, iż struktura czasowa wyładowań neuronowych odzwierciedla pobudzenie błony podstawnej, a struktura czasowa maksimów pobudzenia błony, dla których następuje reakcja neuronowa, może być przybliżona przebiegiem czasowym pobudzenia, możemy przeanalizować dla rozważanego powyżej trójtonu jego strukturę czasową.

Na rysunku nr 3 przedstawiono strukturę czasową trójtonu harmonicznego o składowych $h_9 = 1800 \text{ Hz}$, $h_{10} = 2000 \text{ Hz}$ i $h_{11} = 2200 \text{ Hz}$, które są harmonicznymi składowej podstawowej 200 Hz . Na rysunku nr 4 przedstawiono strukturę czasową trójtonu harmonicznego o składowych $h_9 = 1830 \text{ Hz}$, $h_{10} = 2030 \text{ Hz}$ i $h_{11} = 2230 \text{ Hz}$, które są w przybliżeniu harmonicznymi składowej podstawowej 203 Hz . Porównując te dwa przebiegi możemy zauważyć różnicę w odległości czasowej pomiędzy odpowiadającymi sobie maksimami. W rozdziale 1.3.2 zwrócono uwagę na fakt, iż wyładowania neuronowe mogą występować nie tylko dla maksimów związanych z obwiednią sygnału, ale również dla subtelnych maksimów położonych w pobliżu maksimów obwiedni. To spostrzeżenie wyjaśnia, dlaczego percypowana wysokość dla trójtonu z rys. 4 jest wyższa od percypowanej wysokości związanej z pobudzeniem przedstawionym na rys. 3. Gdyby pod uwagę brano repetycję fali dźwiękowej (obwiedni) to percypowana wysokość nie zmieniałaby się. Jeżeli jednak pod uwagę weźmie się subtelne maksima w przebiegu czasowym, to wysokości pobudzeń z obu rysunków będą różne.



Rys. 3. Struktura czasowa trójtonu otrzymanego na drodze modulacji amplitudowej składowej $a=2000 \text{ Hz}$ składową modulującą $b=200 \text{ Hz}$



Rys. 4. Struktura czasowa trójttonu otrzymanego na drodze modulacji amplitudowej składowej $a=2030\text{ Hz}$ składową modulującą $b=200\text{ Hz}$

Ponadto okazuje się, że system słuchowy zlicza wszystkie interwały czasowe pomiędzy impulsami neuronowymi. Nie tylko te dla odpowiadających sobie maksimów 1-1', 2-2', 3-3' ale również między innymi 2-1' oraz 2-3'. To prowadzi, w oparciu o modele struktury czasowej pobudzenia, do wyjaśnienia niejednoznaczności percepcji wysokości residualnej dźwięków złożonych.

Na podstawie prac [16][157][158][181] znaleziono formułę, która opisuje tę zmianę wysokości residualnej:

$$\Delta R = \frac{\Delta f}{n} \quad (32)$$

gdzie:

ΔR – przesunięcie wysokości residualnej

Δf – przesunięcie częstotliwościowe składowych wielotonu

n – numer dominującej składowej

Biorąc pod uwagę rozważany trójtton (rys. 4) z łatwością można zauważyć, że został on otrzymany z trójttonu z wykresu nr 3 poprzez przesunięcie składowych o $\Delta f = 30\text{ Hz}$. Poprzez to przesunięcie składowych nastąpiło również przesunięcie percypowanej wysokości residualnej, która według zależności (32) wynosi 3 Hz . To przesunięcie percypowanej wysokości na skutek przesunięcia składowych nazwano I efektem przesunięcia wysokości (residualnej).

Na podstawie wyników eksperymentów psychoakustycznych stwierdzono również istnienie II efektu przesunięcia wysokości residualnej, polegającego na tym, iż percypowana wysokość residualna nieharmonicznego dźwięku złożonego jest wyższa niż przewiduje to równanie (32). O ile I efekt przesunięcia wysokości residualnej tłumaczono poprzez analizę kształtu fali pobudzenia [13], o tyle II efekt przesunięcia wysokości residualnej został wytłumaczony przez Fishlera [34][35] jako efekt modulacji fazy wypadkowego złożonego drgania błony podstawnej spowodowanego przez mechaniczne właściwości ucha wewnętrznego wprowadzające asymetrię w pobudzeniu błony poprzez dźwięk złożony.

Jednak dalsze eksperymenty psychoakustyczne, a szczególnie prace Smoorenburga [170][171] doprowadziły do stworzenia poglądu, który pomagał wyjaśnić II efekt przesunięcia wysokości residualnej poprzez równanie 32. Obniżenie numeru dominującej składowej wielotonu dawało poprawne wyjaśnienie zawyżenia percypowanej wysokości residualnej, które tłumaczono wpływem tonów kombinacyjnych wyższych rzędów wprowadzanych przez nieliniowość słuchu. Biorąc jednak pod uwagę, że największy względny poziom tych składowych występuje dla zakresu $1,1 - 1,2 f_g/f_d$, to oczywistym wydaje się, że zwiększenie percypowanej wysokości residualnej jest zasadne jedynie dla numerów harmonicznyc $n > 6$, a tymczasem efekt ten występuje już dla $n > 2$. Dlatego też tłumaczenie II efektu przesunięcia wysokości residualnej wpływem tonów kombinacyjnych w całym zakresie częstotliwościowym jest nieściśle.

1.3.5.6 ROLA MECHANIZMÓW CENTRALNYCH W PERCEPCJI RESIDUUM

Goldstein i Houtsma w 1972 [47] roku przeprowadzili eksperyment, który dokonał przełomu w postrzeganiu procesu percepcji wysokości dźwięków złożonych. Słuchaczom podawano bodziec złożony z dwóch składowych: w pierwszym eksperymencie obie składowe pobudzały to samo ucho, natomiast w drugim każda ze składowych dwutonu pobudzała każde ucho z osobna. W ten sposób określono jak wpływa rola interakcji składowych na percypowaną wysokość dwutonu. Okazało się, że dla niskich poziomów pobudzenia rzędu 20 dB SL nie zauważono żadnych różnic w wysokości niezależnie od sposobu pobudzenia ucha słuchacza (diotycznie lub dychotycznie). Dla wyższych poziomów dźwięku (powyżej 50 dB SL) zakres występowania zjawiska residuum był znacznie szerszy dla pobudzenia diotycznego niż dla dychotycznego. Autorzy tłumaczyli tę różnicę wpływem składowych nieliniowych wprowadzanych przez układ słuchowy dla wyższych poziomów dźwięku.

W 1976 Houtgast przeprowadził eksperyment [67], w którym słuchacze oceniali wysokość pary wielotonów o nieznacznie różniących się częstotliwościach podstawowych (3%). W każdym kroku eksperymentu liczba składowych drugiego wielotonu zmniejszała się aż do momentu, gdy prezentowana była już tylko jedna składowa. Okazało się, że nawet pobudzenie układu jedną składową dawało percepcję wysokości residualnej. Znaczne polepszenie percepcji wysokości residualnej otrzymano prezentując wielotony na tle szumu.

Eksperymenty Halla i Petersa z 1981 roku [54] również potwierdziły spostrzeżenia opisane w pracach [47][67]. Okazało się, że pobudzenie układu słuchowego trzema oddzielnymi składowymi (harmonicznymi danej składowej podstawowej), o niewielkim czasie przerwy pomiędzy nimi (10 ms) dawało percepcję wysokości residualnej odpowiadającej właśnie tej brakującej składowej podstawowej. Percepcja wysokości residualnej wspomagana była poprzez zastosowanie jako tła sygnału szumowego. Otrzymane w ten sposób wyniki potwierdziły, iż prezentowanie sygnału na tle szumu poprawia percepcję wysokości residualnej, poprzez łączenie informacji z różnych kanałów częstotliwościowych.

W wyniku opisanych prac zaczęto zgadzać się z opinią, że zjawisko residuum jest częściowo wspomagane przez centralny system słuchowy, a interakcja składowych w ślimaku nie jest warunkiem koniecznym do wytworzenia wrażenia wysokości residualnej.

Przeprowadzone badania oraz eksperymenty psychoakustyczne [45][46][47] posłużyły do stworzenia przez Goldsteina modelu centralnej percepcji residuum [44]. Na podstawie informacji o poszczególnych składowych szacowana jest wypadkowa statystyka określająca prawdopodobieństwo pojawienia się danej składowej residualnej (rozdział 1.3.1). Jako sygnały wejściowe centralnego procesora używane są funkcje stochastyczne reprezentujące daną składową dźwięku złożonego.

Prowadzone badania nad zjawiskiem centralnej percepcji residuum wykazały istnienie różnego rodzaju wysokości w zależności od sygnałów i sposobu pobudzania układu słuchowego: „Huggins pitch” [52], „Fourcin pitch” [38], „binaural edge pitch” [39][82], „binaural coherence edge pitch” [59], „dichotic repetition pitch” [11] oraz „multiple phase shift pitch” [10]. Na podstawie przeprowadzonych badań stworzono dwa modele opisujące to zjawisko, modyfikując model Goldstein’a.

Jednym z nich jest model oparty na odejmowaniu informacji z lewego i prawego ucha w celu stworzenia centralnego widma sygnału. Po analizie częstotliwościowej w każdym uchu z osobna, sygnały z odpowiadających sobie kanałów słuchowych są wyrównywane względem siebie pod względem amplitudy i opóźnienia. Dokładność tego procesu jest weryfikowana poprzez operacje odejmowania. Na podstawie tej operacji określany

jest przebieg energii w każdym kanale słuchowym w funkcji jego częstotliwości środkowej, który reprezentuje centralne widmo, w którym maksima wyznaczają percypowaną wysokość pobudzenia [22].

Drugim rodzajem modelu jest rozwiązanie zaproponowane przez Bilsena [138][139]. Sygnały z obu uszu są „dodawane” do siebie w odpowiadających sobie kanałach słuchowych, które są nastrojone na daną częstotliwość i międzyuszną różnicę czasową ITD. W ten sposób otrzymuje się centralny wzór aktywności CAP w płaszczyźnie częstotliwościowo-opóźnieniowej. Na podstawie maksimów w wypadkowym przebiegu CAP otrzymuje się percypowaną wysokość pobudzenie (jak i również kierunek, z którego dochodzi).

Najnowsze badania dotyczące zjawiska centralnej percepcji residuum [12][60] potwierdzają słuszność przedstawionych powyżej modeli. Można więc zatem stwierdzić, że procesy centralne wspomagają proces percepcji wysokości residualnej. W przypadku pobudzenia dychotycznego są jedynym źródłem powstawania zjawiska residuum, natomiast przy pobudzeniu diotycznym wspomagają procesy zachodzące na niższych piętrach układu słuchowego.

1.3.5.7 PODSUMOWANIE

Przedstawiony powyżej przegląd badań nad zjawiskiem residuum prezentuje te eksperymenty, których wyniki w jak największym stopniu wpłynęły na powstawanie i rozwój modeli percepcji wysokości dźwięków złożonych. Należy również zauważyć, iż przedstawiony stan badań nad zjawiskiem residuum stanowi jedynie część tematyki dotyczącej samego zjawiska powstawania wysokości residualnych czy też czynników wpływających na jego percepcję. Ze względu na przyjęte warunki eksperymentu pominięto między innymi takie aspekty jak: wpływ fazy składowych na percepcje wysokości dźwięków złożonych oraz percepcje wysokości residualnych związanych z pobudzeniem szumowym. W tym rozdziale skoncentrowano się jedynie na tych aspektach dotyczących zjawiska residuum, które posłużą do analizy i wyjaśnienia problematyki poruszonej w tej pracy.

2. TEZA PRACY

Na podstawie przeglądu literatury dokonanego w rozdziale pierwszym można zauważyć, iż badania nad percepcją wysokości dźwięków złożonych doprowadziły do odkrycia zjawiska residuum, które niezależnie od obecności składowej podstawowej jest istotnym składnikiem wywołującym wypadkowe wrażenie wysokości. Rozwój badań dotyczący powstawania wysokości residualnej doprowadził do powstania trzech głównych klas modeli opisujących to zjawisko: modeli analizy pobudzenia, modeli analizy struktury czasowej oraz modeli mieszanych (czasowo-widmowych), łączących właściwości pozostałych dwóch klas.

Bliższa analiza danych eksperymentalnych skłania do wniosku, iż bardzo dobrze został określony rejon częstotliwościowy występowania zjawiska residuum (podrozdział 1.3.5.2), choć dotyczył on głównie pobudzenia złożonego z trzech składowych. Dla pobudzeń o większej liczbie składowych jedynym ograniczeniem jest zanik synchroniczności fazowej wyładowań neuronów nerwu słuchowego dla częstotliwości składowych większych od $f > 5 \text{ kHz}$. Z tego powodu, dla jednoznacznej percepcji wysokości residualnej, wymagane jest istnienie co najmniej dwóch składowych poniżej tej granicy [114].

Pozostałe badania nad zjawiskiem residuum dotyczyły w głównej mierze określenia czynników wpływających na jego percepcje jak chociażby: rola numeru harmoniczej, wpływ zniekształceń nieliniowych wprowadzanych przez organ słuchu, rozdzielczość częstotliwościowa organu słuchu. W dotychczasowych rozważaniach brakuje jednak zbadania wpływu poziomu poszczególnych składowych pobudzenia na percepcje wysokości dźwięku złożonego. Dotychczas rozważono wpływ poziomu poszczególnych składowych pobudzenia w aspekcie określenia poziomu składowych nieliniowych wprowadzanych przez organ słuchu (podrozdział 1.3.5.4).

Ze względu na istotność zjawiska residuum, nie tylko od strony poznawczej związanej z lepszym poznaniem funkcjonowania narządu słuchu, ale również biorąc pod uwagę jego praktyczny wydźwięk zakreślony we wstępie pracy, wydaje się zasadne przeprowadzenie odpowiednich badań mających na celu określenie wpływu poziomu składowych pobudzenia na percepcję tego zjawiska, które pozwolą na wyznaczenie progów jego występowania.

W tym celu, mając na uwadze tytuł pracy oraz stan badań nad zjawiskiem percepcji wysokości dźwięków złożonych, proponuje się tezę pracy o następującym brzmieniu:

Istnieje próg występowania zjawiska residuum o określonej wysokości residualnej i zależy on od częstotliwości składowych tworzących pobudzenie

Na podstawie tezy wytyczono następujący cel pracy:

Wyznaczenie progów występowania zjawiska residuum o określonej wysokości residualnej

Biorąc pod uwagę postawioną tezę oraz cel pracy sformułowano założenia, które ograniczając zakres danych eksperymentalnych, nie powodują jednocześnie uproszczeń dotyczących wniosku.

Założenie 1

Ze względu na fakt, iż sygnały dochodzące do uszu słuchacza, związane z wywołaniem wrażenia wysokości są reprezentowane przez sygnały periodyczne, a wykorzystanie szeregów Fouriera pozwala na przedstawienie ich w postaci sumy sygnałów sinusoidalnych, w pracy ograniczono się do przebiegów o takim charakterze.

Założenie 2

Mając na uwadze, iż percepcja wysokości residualnej jest możliwa gdy pobudzenie tworzą co najmniej dwie składowe, badanie progu występowania zjawiska residuum przeprowadzono dla dwutonów i trójtonów.

Założenie 3

Ze względu na czasochłonność pomiarów progu występowania zjawiska residuum konieczne stało się ograniczenie zakresu pracy do badań nad dwutonami i trójtonami, których wysokość percypowanej składowej residualnej odpowiadała częstotliwości brakującej składowej podstawowej $f = 200 \text{ Hz}$. Mimo tego ograniczenia możliwe jest porównanie własności residuum dla tych dwóch typów pobudzeń.

Biorąc pod uwagę powyższe założenia przyjęto następujące definicje progu występowania zjawiska residuum:

1. Dla dwutonów

Jest to taki poziom składowej dwutonu o większej częstotliwości, przy stałym poziomie składowej o mniejszej częstotliwości, który powoduje u słuchacza wrażenie wysokości odpowiadające częstotliwości brakującej składowej podstawowej tego dwutonu

2. Dla trójtonów

Jest to taki poziom środkowej składowej trójtonu, przy stałym poziomie pozostałych dwóch składowych, który powoduje u słuchacza wrażenie wysokości odpowiadające częstotliwości brakującej składowej podstawowej tego trójtonu

Rozróżnienie definicji progów występowania zjawiska residuum pomiędzy dwutonami i trójtonami jest konieczne. Jedynie poziom środkowej składowej trójtonu może wpłynąć na zmianę percypowanej wysokości (residualnej) i reprezentować w ten sposób próg występowania zjawiska residuum o wysokości residualnej odpowiadającej brakującej składowej podstawowej trójtonu, co prezentuje następujący przykład: trójton o składowych $h_4 = 800 \text{ Hz}$, $h_5 = 1000 \text{ Hz}$, $h_6 = 1200 \text{ Hz}$ pobudzając układ słuchowy wywołuje wrażenie wysokości residualnej odpowiadające częstotliwości brakującej składowej podstawowej tego trójtonu $f = 200 \text{ Hz}$. Tylko zmiana poziomu środkowej składowej h_5 , przy zachowaniu poziomu innych składowych (założenie), może spowodować progową percepcję wysokości podstawowej (residualnej) trójtonu związanej z $f = 200 \text{ Hz}$. Związane jest to z faktem, iż przy braku tej składowej zmienia się charakter pobudzenia (dwuton), które posiada inną wysokość residualną odpowiadającą częstotliwości brakującej składowej podstawowej $f' = 400 \text{ Hz}$. Zmiana poziomu składowej h_4 , przy zachowaniu poziomu innych składowych, nie zmienia percypowanej wysokości tego trójtonu, gdyż pozostałe dwie składowe wywołują już wrażenie wysokości (residualnej) odpowiadającej częstotliwości brakującej składowej podstawowej $f = 200 \text{ Hz}$. Nawet brak tej składowej, pomimo zmiany charakteru pobudzenia, nie zmienia percypowanej wysokości residualnej. To samo dotyczy składowej h_6 .

Na podstawie przyjętych założeń i definicji zostały przeprowadzone eksperymenty, mające na celu zweryfikowanie postawionej tezy pracy.

3. PRZYJĘTE WARUNKI EKSPERYMENTÓW I ICH UZASADNIENIE

3.1 METODA POMIAROWA

W badaniach psychoakustycznych w ocenie progu danego zjawiska wykorzystuje się najczęściej trzy klasyczne metody [142]: metodę granic, metodę częstości trafnych ocen oraz metodę średnich błędów. Wszystkie wyżej wymienione metody cechują się określonymi właściwościami, które różnicują je pod względem możliwości użycia do wyznaczenia progu danego zjawiska. W odniesieniu do badań progowych występowania zjawiska residuum o określonej wysokości residualnej wszystkie trzy metody mogą mieć zastosowanie.

Mając również na względzie klasyczną definicję progu używaną w psychologii, która mówi iż jest to taki punkt graniczny, w którym bodziec o malejącym lub rosnącym natężeniu staje się niedostrzegalny lub dostrzegalny (lub wywołuje określone wrażenie lub nie) [66], zdecydowano się na użycie metody granic, w której sposób określania progu jest najbardziej zbliżony do przedstawionej definicji. Poziom określonej składowej pobudzenia będzie zmieniany skokowo z zadany krok. W seriach wstępujących wartość sygnału będzie zmieniać się od zera do wartości maksymalnej poziomu, równej 50 dB SPL lub będzie się zmniejszać, od wartości maksymalnej do zera, w seriach zstępujących. Metoda granic wydaje się być również najszybszą metodą dochodzenia do wartości progowej w odniesieniu do eksperymentów, które zostaną prowadzone w tej pracy.

Należy jednak zauważyć, że samo stwierdzenie istnienia danego zjawiska (lub jego braku), w tym przypadku wysokości residualnej, jest niewystarczające. Oprócz poziomu składowej wywołującej dane wrażenie należy określić również wartość percypowanej wysokości dla tego poziomu. Tylko w ten sposób jest się w stanie stwierdzić, czy percepcja wysokości danego pobudzenia związana z poziomem określonej składowej odpowiada poszukiwanej wartości wysokości residualnej. Jako miarę dokładności oraz siły wrażenia wysokości residualnej stosuje się wartość odchylenia standardowego dostrojonych do średniej wartości poszukiwanej wysokości [14][140]. Im większe odchylenie standardowe, tym mniejsza siła wrażenia residuum. Średnia wartość odchylenia otrzymanych w eksperymentach dotyczących oceny wartości wysokości residualnej mieści się w granicy 0,5 – 5 Hz [159][169][170], co daje podstawę do oceny zjawiska jako jednoznacznie

percypowanego. Również w tej pracy zostanie użyta ta miara do oceny jednoznaczności percepcji określonej wysokości danego pobudzenia.

W celu wyznaczenia wysokości dźwięku najczęściej stosuje się metody adaptacyjne [76][118][187], w których określenie percypowanej wysokości odbywa się etapami. W każdym etapie słuchacz ocenia czy dany bodziec porównawczy jest wyższy, niższy lub równy w stosunku do bodźca wzorcowego. W zależności od odpowiedzi słuchacza zakres częstotliwościowy występowania bodźca porównawczego zmniejsza się, aż do osiągnięcia wartości, dla której reakcja słuchaczy wyznacza percypowaną wysokość bodźca wzorcowego. Początkowy zakres występowania bodźca porównawczego zależy od danego eksperymentu i zawiera się w przedziale $\pm (6 - 20\%)$ [118][187] od przewidywanej wartości wysokości. W następnych etapach zakres ten jest zmniejszany z krokiem $(0,2 - 2\%)$ [118][187]. Metody te dają dokładne oszacowanie wysokości i powtarzalne wyniki, lecz mają niewątpliwie wadę, która nie pozwala na wykorzystanie ich w tej pracy. Zawężając zakres występowania bodźca porównawczego eliminuje się możliwość całościowej obserwacji zachowania się słuchaczy, chociażby obserwacji wpływu błędu oktawowego w oszacowaniu wysokości danego pobudzenia. Szczególnie ważne wydaje się uwzględnienie tego rodzaju błędów przy wyznaczeniu progu występowania zjawiska residuum o określonej wysokości. Dlatego też zdecydowano się na użycie najprostszej metody oszacowania wysokości bodźca wzorcowego, jaką jest metoda swobodnego dostrajania się do percypowanej wysokości pobudzenia [14][140][198]. Brak ograniczeń zakresu dostrajania umożliwia obserwacje znacznie szerszej gamy zachowań się słuchaczy przy dostrajaniu się do percypowanej wysokości pobudzenia.

Istnieje jeszcze jeden powód wykorzystania metody swobodnego dostrajania się do percypowanej wysokości bodźca wzorcowego w eksperymentach prowadzonych w tej pracy. Ta metoda pozwala na znacznie szybsze określenie przez słuchacza percypowanej wysokości pobudzenia poprzez znaczące zmniejszenie pola poszukiwań, najczęściej już po pierwszym odsłuchaniu pobudzenia. Ponieważ eksperymenty psychoakustyczne należą do grupy badań, w których bardzo znaczącą rolę odgrywają czynniki związane ze stanem psychofizycznym słuchacza, dlatego też skrócenie czasu trwania eksperymentu jest również czynnikiem przemawiającym za użyciem tej metody oceny wysokości bodźca wzorcowego.

Podsumowując rozważanie dotyczące przyjętej metody pomiarowej można stwierdzić, że zadanie postawione przed słuchaczem jest skomplikowane i wymaga od niego dużej koncentracji, gdyż w proces określenia progu występowania zjawiska residuum uwikłany jest

również aparat decyzyjny, którego zadaniem jest stwierdzenie obecności lub braku danej wysokości residualnej.

3.2 BODZIEC PORÓWNAWCZY

W większości prac dotyczących zjawiska residuum używa się bodźca porównawczego o tym samym charakterze, co bodziec wzorcowy ze względu na znacznie łatwiejsze oszacowanie wysokości residualnej [170]. Użycie wielotonu do oceny wysokości wielotonu wzorcowego wyklucza wpływ różnicy barwy pomiędzy bodźcami na otrzymane wyniki, lecz z drugiej strony występuje możliwość dostrajania się do wzorca pobudzenia wywołanego przez te bodźce [118], czyli oceny wysokości sygnałów na podstawie podobieństwa wysokości składowych (analityczny mod słuchania). Określona w ten sposób wysokość różni się od wypadkowej wysokości określonej na podstawie całościowej percepcji pobudzenia (syntetyczny mod słuchania) związanej z periodycznością wypadkowej fali pobudzenia. Aby uniknąć wyżej wymienionych niejednoznaczności, należy zmieniać skład widmowy bodźca porównawczego oraz odpowiednio kształtować jego widmo [118].

Najprostszą metodą oceny wysokości bodźca wzorcowego, która unika niedogodności opisanych powyżej jest użycie tonu prostego jako bodźca porównawczego. Dlatego też taki sposób oceny wysokości badanych pobudzeń zostanie użyty w tej pracy. O słuszności wyboru niech świadczą słowa Smoorenburga [170]: „Wysokość dźwięku złożonego powinna być mierzona zasadniczo przez porównanie z tonem prostym o określonym poziomie ciśnienia akustycznego”.

„Określony poziom ciśnienia akustycznego” oznacza potrzebę dostosowania poziomu tonu prostego do wypadkowego poziomu pobudzenia w celu uniknięcia różnic w ocenie wysokości spowodowanych zmianą pobudzenia błony podstawnej na skutek stosowania pobudzeń o różnych wypadkowych poziomach ciśnienia akustycznego [170][198].

3.3 BODZIEC WZORCOWY

Mając na uwadze przyjęte założenia dotyczące realizacji tematu pracy jako bodźca wzorcowego użyto dwutonów i trójtonów. Poziom każdej składowej w pobudzeniach ustalono na 50 dB SPL, dla którego występuje jedynie progowe postrzeganie tonu różnicowego. Jednak w celu całkowitego wykluczenia wpływu tego czynnika

przeprowadzono również eksperymenty dotyczące pierwszego efektu przesunięcia wysokości residualnej. Szczegóły zostaną omówione przy opisie danego eksperymentu.

W ramach przeprowadzonych badań nie zdecydowano się na maskowanie tonów kombinacyjnych wyższych rzędów. Żera w swoich eksperymentach [198] pokazuje brak różnic w sile wrażenia wysokości residualnej przy maskowaniu, lub jego braku, tonów kombinacyjnych wprowadzanych przez nieliniowość słuchu. Warto również zaznaczyć, iż największy poziom tych zakłóceń występuje dla równych poziomów składowych tworzących dane pobudzenie i tak dla dwutonów, w których $f_2/f_1 = 1.2$ i $L_g = L_d = 50$ dB SL względny poziom zniekształcenia $2f_1 - f_2$ wynosi $L = -25$ dB [43]. Wstępne eksperymenty przeprowadzone przez autora pracy [108] wskazują, że dla danych parametrów pobudzenia względny poziom tego zakłócenia potrzebny do progowej percepcji zmiany wartości wysokości residualnej wynosi $L = -15$ dB. Można więc stwierdzić, że samo występowanie tonów kombinacyjnych nie implikuje ich wpływu na siłę wrażenia zjawiska residuum i próg jego postrzegania. Ponadto poziom tej składowej maleje znacznie wraz ze zmniejszaniem się poziomu niższej składowej dwotonu [43], a taka sytuacja będzie miała miejsce przy badaniu progu występowania zjawiska residuum.

3.4 DOKŁADNOŚĆ WYZNACZENIA PROGU WYSTĘPOWANIA ZJAWISKA RESIDUUM O OKREŚLONEJ WYSOKOŚCI RESIDUALNEJ

W literaturze brak jest doniesień o badaniach wpływu poziomu poszczególnych składowych na percepcję wysokości dźwięku złożonego. Mimo, że próg postrzegania zmiany natężenia tonu prostego poprzez zauważalność zmiany modulacji sygnału tym tonem [143] dla przyjętych poziomów składowych bodźców wzorcowych (50 dB SPL) wynosi $\Delta L = 1$ dB, to taka zmiana poziomu składowej modulującej nie powoduje zmiany percepcji wysokości pobudzenia. Dlatego też zmiany poziomu składowej odpowiedzialnej za percepcję progu występowania zjawiska residuum o określonej wysokości residualnej określono na podstawie wstępnych badań prowadzonych przez autora wraz z słuchaczami biorącymi udział w eksperymentach prowadzonych w tej pracy. Na podstawie wyników stwierdzono, iż zmiana poziomu składowej bodźca o $\Delta L = 5$ dB daje postrzegalne zmiany percypowanej wysokości dźwięku złożonego w obszarze występowania progu powstawania wrażenia danej wysokości residualnej i taką zmianę poziomu przyjęto w tej pracy jako dokładność określenia progu. Przyjęta wartość pokrywa się również z dokładnością określenia poziomu składowych nieliniowych wprowadzanych przez system słuchowy we wcześniejszych eksperymentach

[43][53] (2 do 5 dB), które dotyczyły podobnego zagadnienia badawczego jak to przeprowadzone w tej pracy.

Jednak nie tylko wyniki eksperymentów zdecydowały o przyjętej dokładności pomiaru. W pracy zastosowano pośredni pomiar poziomu ciśnienia akustycznego składowych pobudzenia podawanego na ucho słuchacza, poprzez pomiar napięcia na zaciskach przetwornika słuchawki. Taka metoda pomiaru wymusza jednak uprzednie określenie skuteczności i charakterystyki częstotliwościowej słuchawek. Parametry te zostały określone za pomocą sztucznego ucha w komorze bezchowej, jednak sposób mocowania słuchawki na sztucznym uchu oraz siła jej docisku wpływają na powstanie niepewności pomiarowej, rzędu 3 dB, która wpływa na dokładność oszacowania poziomu poszczególnych składowych pobudzenia.

Biorąc pod uwagę powyższe oszacowanie niepewności pomiaru wydają się zasadne zmienianie poziomu składowych pobudzenia skokami co 5 dB, gdyż pozwala to na uniknięcie dodatkowych błędów w oszacowaniu progów powstawania danej wysokości residualnej.

Oprócz dokładności określenia poziomu składowej odpowiedzialnej za zmianę percypowanej wysokości residualnej bardzo ważne jest przyjęcie odpowiedniej precyzji określenia wysokości residualnej. We wcześniejszych eksperymentach dotyczących określenia wysokości residualnej [159][169][170] dokładność jej oszacowania wynosiła 0,4 – 2,5 % częstotliwości brakującej składowej pobudzenia. Mając na uwadze przytoczone wartości, jako precyzję oszacowania wysokości w eksperymentach dotyczących tematu tej pracy przyjęto wartość 0,5 %, która jest wystarczającą do osiągnięcia zamierzonego efektu.

3.5 ZAKRES CZĘSTOTLIWOŚCIOWY BADAŃ

Spory dotyczące zakresu częstotliwościowego występowania zjawiska residuum wynikały przede wszystkim z różnego sposobu pomiaru tego samego zagadnienia. Największe kontrowersje budziły prace dotyczące residuum tworzonego przez dwutony. Badania Goldsteina i innych [46][47] pokazały brak identyfikacji interwałów muzycznych powyżej 10. harmoniczej, dlatego też ograniczyli oni występowanie zjawiska residuum do tego zakresu. Natomiast badania Smoorenburga [170] pokazały, że residuum może być jednoznacznie percypowane do 15. harmoniczej. Należy więc podkreślić, że rejon występowania zjawiska zależy od sposobu interpretacji cech tego zjawiska. Percepcja

wysokości residualnej nie jest tym samym, co percepcja interwałów muzycznych opartych o te wysokości.

Biorąc pod uwagę rozbieżności danych eksperymentalnych, w tej pracy nie przyjęto ścisłego zakresu częstotliwościowego prezentowanych bodźców. Badania zostaną przeprowadzone do momentu, w którym dla poprawnej identyfikacji określonej wysokości residualnej poziom składowej odpowiedzialnej za jej percepcję zrówna się z poziomem pozostałych składowych. Częstotliwość tej składowej wyznaczy górny zakres częstotliwościowy badań progowych, gdyż wielotony równoamplitudowe powodują jednoznaczne wrażenie zjawiska residuum.

3.6 SPOSÓB PREZENTACJI BODŹCÓW

W celu zbliżenia sposobu odsłuchu do warunków naturalnych zastosowano odsłuch binauralny z diotyczną prezentacją bodźców, która jest wykorzystywana w badaniach progowych w jednakowym stopniu z odsłuchem monauralnym. Należy mieć jednak świadomość, że otrzymane w ten sposób progi mogą różnić się w zależności od sposobu prezentacji [136][148].

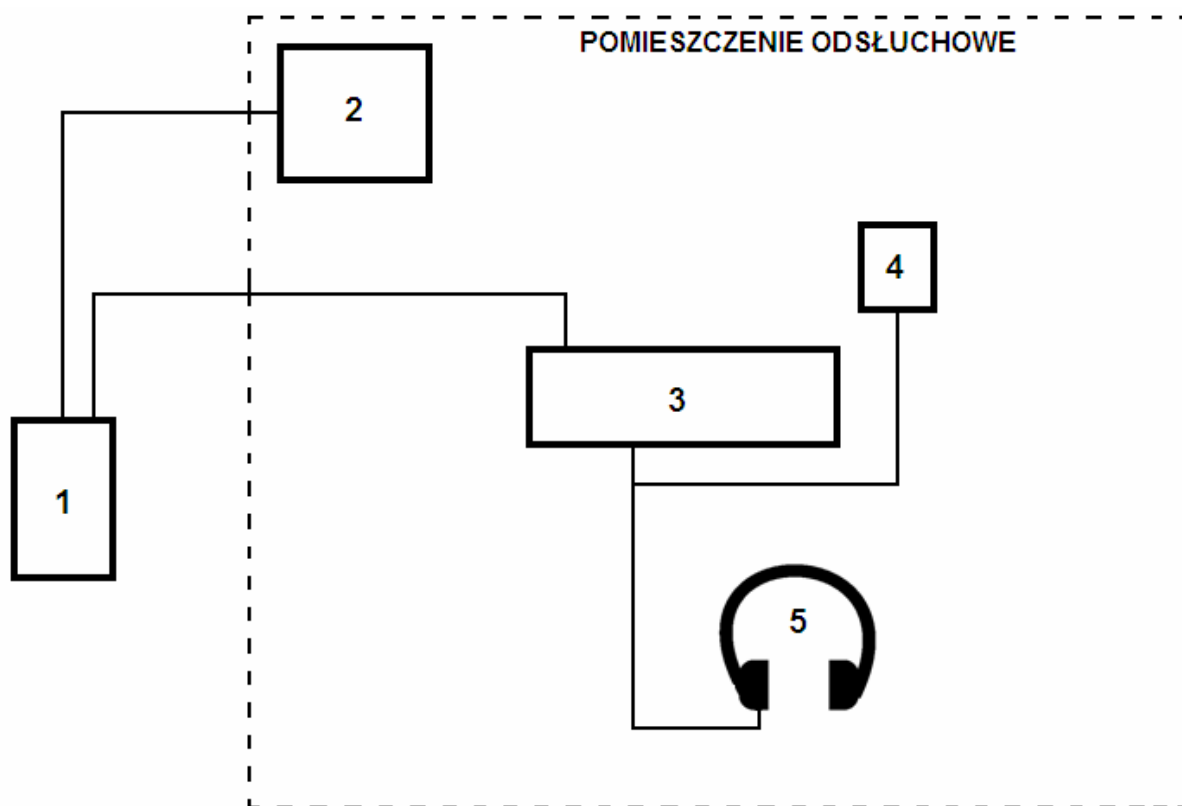
3.7 EKIPA ODSŁUCHOWA

W badaniach wzięło udział 20 osób w wieku od 21 do 24 lat o normalnym słuchu. Dodatkowym wymogiem stawianym słuchaczom była dokładność określenia wysokości tonu prostego o częstotliwości 200 Hz z błędem nie większym niż 1%.

4. APARATURA

4.1 UKŁAD POMIAROWY

Pomiary dotyczące wyznaczenia progu występowania zjawiska residuum o określonej wysokości residualnej przeprowadzono za pomocą aparatury połączonej według schematu jak na rysunku poniżej:



Rys. 5. Układ pomiarowy

gdzie:

- 1 – komputer
- 2 – monitor
- 3 – wzmacniacz słuchawkowy
- 4 – woltomierz
- 5 – słuchawki

4.2 OPIS UKŁADU POMIAROWEGO

Do badania zastosowano układ pomiarowy przedstawiony na rys. 5. Bodźce wzorcowe jak i bodźce porównawcze były generowane za pomocą programu komputerowego wykorzystującego kartę dźwiękową Sound Blaster Audigy o parametrach pozwalających na otrzymanie sygnału o parametrach: stosunek sygnału do szumu większy od 90 dB dla całego pasma przenoszenia od 10 Hz do 40 kHz o równomierności ± 3 dB, współczynnik zniekształceń harmonicznym wprowadzany przez kartę to 0,06 % przy 1 kHz, 24 bitowe przetwarzanie dźwięku, częstotliwość próbkowania 48 kHz.

Z wyjścia karty dźwiękowej sygnał kierowany był na wejście wzmacniacza słuchawkowego Behringer Powerplay HA8000, którego parametry pozwalały na utrzymanie parametrów akustycznych określonych przez kartę dźwiękową.

Woltomierz pozwalał na kontrolowanie napięcia wyjściowego podawanego na słuchawki.

Sygnał ze wzmacniacza słuchawkowego kierowany był na słuchawki Sennheiser HD 535 Ovation o parametrach technicznych: stosunek sygnału do szumu $< 0,15$ %, pasmo przenoszenia 15 Hz – 30 kHz ($- 3$ dB) o nierównomierności ± 5 dB, skuteczność 95 dB SPL/1V, rezystancja 150 Ω .

W celu otrzymania prawidłowego poziomu dźwięku poszczególnych składowych zmierzono wypadkową charakterystykę toru sygnału akustycznego i na jej podstawie wyznaczono wypadkową charakterystykę korekcyjną. Korekcja poziomu poszczególnych składowych odbywała się na poziomie programu komputerowego, aby nie wprowadzać dodatkowych zniekształceń sygnału.

Komputer osobisty umieszczono na zewnątrz pomieszczenia odsłuchowego, aby nie zakłócać warunków odsłuchowych. Zakłócenia te mogły się pojawić zwłaszcza na skutek pracy wentylatora zasilacza komputera osobistego.

Badania przeprowadzono w pomieszczeniu odsłuchowym Zakładu Akustyki Politechniki Wrocławskiej przeznaczonym do przeprowadzania eksperymentów psychoakustycznych.

5. WYZNACZENIE PROGU WYSTĘPOWANIA ZJAWISKA RESIDUUM DLA DWUTONÓW HARMONICZNYCH O WYSOKOŚCI RESIDUALNEJ ODPOWIADAJĄCEJ CZĘSTOTLIWOŚCI BRAKUJĄCEJ SKŁADOWEJ PODSTAWOWEJ TYCH DWUTONÓW

5.1 BODZIEC WZORCOWY

W eksperymencie słuchacze określali wysokość dwutonów, których składowe były sąsiadującymi harmonicznymi brakującej składowej podstawowej 200 Hz. W każdym dwutonie poziom niższej harmonicznnej był stały i wynosił $L_n = 50 \text{ dB SPL}$, natomiast poziom wyższej harmonicznnej L_{n+1} był zmieniany w zakresie od 0 do 50 dB SPL z krokiem 5 dB, w celu wyznaczenia progu występowania zjawiska residuum o wysokości odpowiadającej częstotliwości brakującej składowej podstawowej (200 Hz).

5.2 EKIPA ODSŁUCHOWA

W badaniach wzięło udział 20 osób o normalnym słuchu w wieku od 21 do 24 lat. Słuchacze byli studentami specjalności Akustyka na Wydziale Elektroniki Politechniki Wrocławskiej. Żaden ze słuchaczy nie posiadał wykształcenie muzycznego, a ewentualne doświadczenie muzyczne wynikało jedynie z indywidualnych zainteresowań. Tak dobrana grupa słuchaczy miała na celu reprezentację populacji, która nie cechowała się szczególnymi zdolnościami w zakresie oceny wysokości dźwięku. Jedynym warunkiem uczestnictwa w badaniach była zdolność oceny wysokości tonu prostego o częstotliwości $f = 200 \text{ Hz}$ z błędem nie większym niż 1%.

5.3 PROCEDURA POMIAROWA

Słuchacze oceniali percypowaną wysokość dwutonów za pomocą tonu prostego w procedurze swobodnego dostrajania. Przed przystąpieniem do eksperymentu każdy członek ekipy odsłuchowej brał udział w serii treningowej, w celu nabycia umiejętności rozróżnienia wysokości residualnej (syntetyczny sposób słuchania) od częstotliwości składowych bodźca wzorcowego (analityczny sposób słuchania). Podczas eksperymentu słuchacze byli proszeni

o dostrajanie się do wysokości residualnej, wynikającej z całościowego percypowania pobudzenia.

Bodźce wzorcowe i bodziec porównawczy miały ten sam wypadkowy poziom ciśnienia akustycznego, w celu uniknięcia wpływu różnic pobudzenia błony podstawnej sygnałami o różnych poziomach.

Czas trwania dwutonu wynosił 4 s. Biorąc pod uwagę wcześniejsze badania dotyczące tego zjawiska, w których najczęściej stosowano pobudzenia o czasie trwania od 160 do 500 ms [118][170], przyjęta w tym eksperymencie wartość jest znacznie większa. Należy jednak zwrócić uwagę, że we wcześniejszych eksperymentach zdecydowano się na odzwierciedlenie rzeczywistych odstępów czasowych pomiędzy dźwiękami w utworach muzycznych. Ponadto zastosowanie adaptacyjnych metod oceny wysokości, w których słuchacz ocenia relacje wysokości pomiędzy porównywanymi bodźcami (wyższy, równy, niższy) z ograniczonego zakresu częstotliwości, pozwala na zastosowanie tak krótkich czasów prezentacji. Natomiast w tej pracy, ze względu na złożoność badań związanych z oszacowaniem progu występowania zjawiska residuum, zdecydowano się na wydłużenie czasu trwania bodźców. Z jednej strony pozwoliło to na ułatwienie zapamiętywania percypowanej wysokości pobudzenia i precyzyjne dostrzeganie zmian jego wysokości związanych ze zmianą poziomu składowej pobudzenia, a z drugiej strony, pozwoliło zminimalizować trudności w ocenie wysokości wielotonu za pomocą tonu prostego. Jak wiadomo, samo wydłużenie czasu trwania pobudzenia nie powoduje zmian w percepcji jego wysokości, jeśli tylko ten czas nie jest krótszy od 100 ms dla częstotliwości z zakresu 200 – 5000 Hz [142].

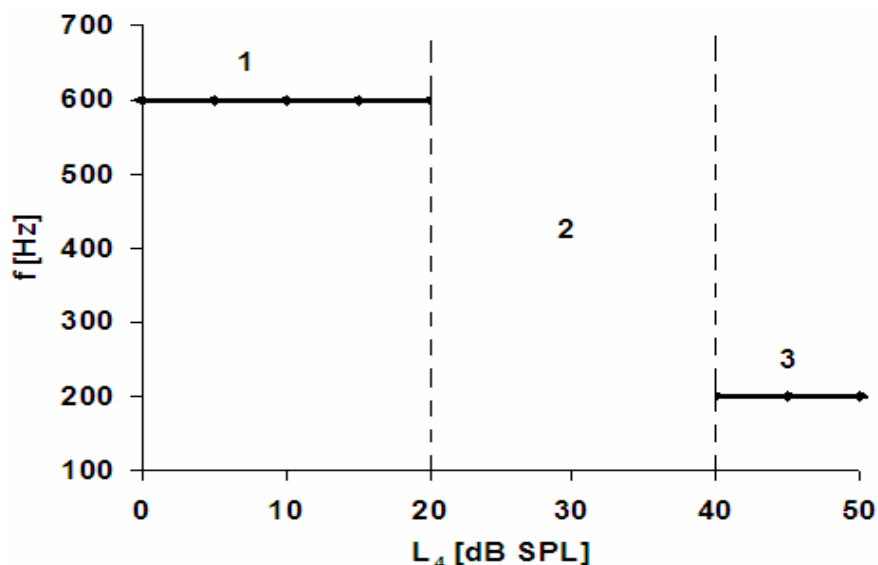
W celu wyznaczenia progu występowania zjawiska residuum o danej częstotliwości residualnej wykorzystano metodę granic. Poziom składowej (wyższej harmoniczej dwutonu) odpowiedzialnej za percepcję określonej wysokości residualnej był zmieniany w zakresie od 0 do 50 dB SPL z krokiem 5 dB. W seriach wstępujących poziom wzrastał od wartości minimalnej do maksymalnej i zmniejszał się od wartości maksymalnej do minimalnej w seriach zstępujących. Pomiar w seriach wstępujących i zstępujących wykonywano na przemian. W ten sposób wyeliminowano błędy antycypacji i przyzwyczajenia [142]. Dla każdego poziomu wyższej harmoniczej dwutonu słuchacz określał percypowaną wysokość dwutonu za pomocą tonu prostego. Następnie poziom tej harmoniczej zmieniał się i słuchacz ponownie określał percypowaną wysokość dwutonu. Czas prezentacji bodźca wynosił 4 s. Po półsekundowej przerwie słuchacz dostrajał się w dowolnym czasie do percypowanej wysokości dwutonu. Liczba powtórzeń określenia wysokości nie była

ograniczona, aż do chwili gdy słuchacz stwierdził, że dana wartość częstotliwości odpowiada z całą pewnością percypowanej wysokości dwutonu. Tak określona wysokość była brana pod uwagę jako cząstkowy wynik eksperymentu. Każdy słuchacz dokonywał określenia percypowanej wysokości dwutonu w 4 seriach. Każda seria zawierała 11 pomiarów (11 zmian poziomu wyższej harmonicznej co 5 dB w zakresie od 0 do 50 dB SPL) progu występowania zjawiska residuum o wysokości residualnej odpowiadającej częstotliwości brakującej składowej podstawowej 200 Hz. Każdy słuchacz wykonywał więc 44 pomiary progu dla określonych częstotliwości składowych dwutonu. Dla każdego dwutonu, o określonych częstotliwościach składowych, wykonano łącznie 880 (20 słuchaczy) pomiarów progu występowania zjawiska residuum. Następnie zmieniano częstotliwość składowych i pomiary powtarzano. W ten sposób wyznaczono zachowanie się progu występowania zjawiska residuum o wysokości residualnej odpowiadającej $f = 200$ Hz w dziedzinie częstotliwości.

W badaniach zastosowano odsłuch binauralny z diotycznym sposobem prezentacji bodźców.

5.4 WYNIKI

Na podstawie przeprowadzonego eksperymentu wyznaczono próg powstawania zjawiska residuum o wysokości residualnej odpowiadającej częstotliwości $f = 200$ Hz w dwutonach harmonicznym. Rys. 6 przedstawia zależność percypowanej wysokości dwutonu, złożonego z harmonicznym o częstotliwościach $h_3=600$ Hz i $h_4=800$ Hz, od poziomu wyższej harmonicznej:



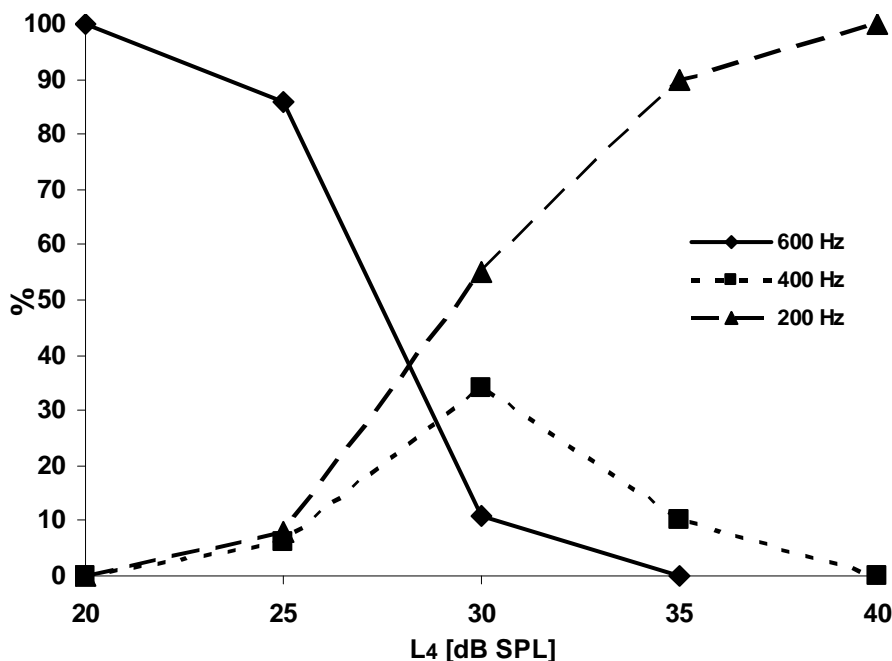
Rys. 6. Zależność percypowanej wysokości dwutonu, złożonego z harmonicznym h_3 i h_4 , od poziomu wyższej harmonicznej. Percypowaną wysokość wyrażono w Hz.

Na podstawie wykresu można stwierdzić, że percypowana wysokość dwutonu zależy od poziomu jego wyższej harmonicznej. Obszar nr 1 odpowiada zakresom poziomów wyższej harmonicznej od 0 do 20 dB SPL włącznie. W tym obszarze słuchacze percypowali wysokość związaną jedynie z częstotliwością niższej harmonicznej dwutonu h_3 , gdyż poziom h_4 był za niski aby zmienić to wrażenie. W obszarze nr 2, w zakresie poziomów h_4 od 25 do 35 dB SPL włącznie, słuchacze stopniowo zauważali wpływ tej składowej na percypowaną wysokość dwutonu. W zależności od indywidualnych spostrzeżeń nadal percypowali wysokość związaną ze składową h_3 (600 Hz) lub też percypowali wysokość odpowiadającą częstotliwości brakującej składowej podstawowej dwutonu 200 Hz, która wskazywała na powstanie wrażenia percepcji wysokości residualnej. Należy jednak zauważyć, że coraz wyższy poziom h_4 powodował zwiększenie liczby słuchaczy, którzy percypowali wysokość residualną. Ze względu na zróżnicowane wrażenia wysokości w tym obszarze, w tej pracy nazwano go obszarem przejściowym. W obszarze nr 3, gdy poziom h_4 osiągnął 40 dB SPL, wszyscy słuchacze jednoznacznie percypowali wysokość dwutonu odpowiadającą częstotliwości $f = 200$ Hz. Dalszy wzrost poziomu h_4 nie powodował zmiany percepcji wysokości dwutonu.

Dla pozostałych częstotliwości składowych dwutonu przebieg percepcji wysokości zachodził również w trzech obszarach. Jedyne różnice dotyczą wielkości tych obszarów tzn. zmieniają się zakresy poziomów wyższej harmonicznej wchodzących do danego obszaru.

W obszarze przejściowym nie zaznaczono wartości częstotliwości odpowiadających percypowanej wysokości dwutonu (jak również błędu jej określenia). Uśrednienie dwóch skrajnych wrażeń (percepcji wysokości związanej z częstotliwością 600 Hz lub 200 Hz) wprowadziłoby przede wszystkim mylne wrażenie pojawienia się możliwości percepcji innych wysokości np: 520 Hz lub 260 Hz, które wynikały jedynie ze zróżnicowanego rozkładu odpowiedzi słuchaczy, co pokazuje rys. 7.

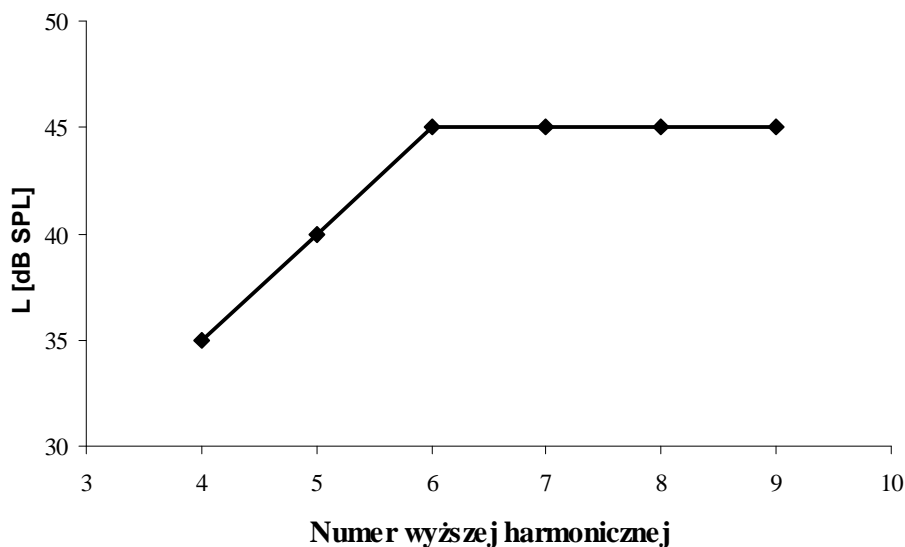
Należy również zauważyć, iż znaczna część słuchaczy percypowała w obszarze przejściowym wysokość związaną z częstotliwością 400 Hz, zanim jednoznacznie określiła wysokość dwutonu związaną z częstotliwością 200 Hz. Słuchacze Ci popełniali błąd oktaowy tzn. percypowali wysokość dwukrotnie większą od wysokości związanej z częstotliwością brakującej składowej dwutonu. Taka sytuacja wynika z użycia jako bodźca porównawczego tonu prostego, co zostało zauważone już przez Jeffersa w 1940 [75].



Rys. 7. Rozkład odpowiedzi słuchaczy (wyrażony w %) percypujących określoną wysokości dwutonu, złożonego z harmonicznych h_3 i h_4 , w zależności od poziomu wyższej harmonicznej w obszarze przejściowym. Percypowaną wysokość wyrażono w Hz .

Należy jednak podkreślić, że pojawienie się błędu oktawowego wskazuje jednocześnie na pojawienie się wrażenia percepcji zjawiska residuum, gdyż tylko to zjawisko mogło wywołać pojawienie się tego błędu. Jednak ze względu na duże różnice osobnicze, percepcja wysokości związanej z częstotliwością $400 Hz$ nie jest uważana w tej pracy za jednoznaczną percepcję zjawiska residuum. Poziom wyższej harmonicznej dwutonu, dla którego to wrażenie występuje nie jest uważany w tej pracy za próg występowania zjawiska residuum, zgodnie z definicją przyjętą w tej pracy (patrz rozdział 2). Aby uniknąć dwuznaczności interpretacji progu występowania zjawiska residuum, oprócz przyjętej definicji (rozdział 2) narzucono również, dla jakiej ilości poprawnych odpowiedzi (percepcja wysokości odpowiadająca częstotliwości brakującej składowej podstawowej $200 Hz$) określony poziom wyższej harmonicznej może być uważany za próg występowania danej wysokości wirtualnej. Na podstawie wcześniejszych badań dotyczących zjawiska residuum, [149][154] liczbę prawidłowych odpowiedzi ustalono jako nie mniejszą niż 75%.

Rys. 6 przedstawia percepcję wysokości dwutonu zależną od poziomu wyższej harmonicznej tylko dla składowych h_3 i h_4 . Na podstawie tej zależności i przyjętym procencie poprawnych odpowiedzi wyznaczono próg występowania zjawiska residuum dla tego dwutonu. Wyniki dla dwutonów złożonych ze składowych o innych częstotliwościach przedstawia rys. 8.



Rys. 8. Zależność poziomu wyższej harmonicznej dwutonu, wymaganego do jednoznacznej percepcji wysokości residualnej o częstotliwości $f = 200 \text{ Hz}$, w funkcji częstotliwości składowych wyrażonych poprzez numer wyższej harmonicznej. Wynik wyznaczony dla co najmniej 75% poprawnych odpowiedzi słuchaczy.

Na podstawie rys. 8 można zauważyć zależność progu występowania wysokości wirtualnej od częstotliwości składowych dwutonu wyrażonych poprzez numer wyższej harmonicznej. W zakresie niskich numerów harmoniczných, od 4 do 6, wartość progowa poziomu wyższej składowej wzrasta wraz ze wzrostem częstotliwości składowych. Powyżej 6. harmonicznej dalszy wzrost częstotliwości składowych nie powoduje wzrostu progu występowania wysokości residualnej odpowiadającej częstotliwości $f = 200 \text{ Hz}$. Oznacza to, iż wraz ze wzrostem częstotliwości składowych dwutonu, aż do 6. harmonicznej włącznie, słuchacze potrzebują coraz większego poziomu wyższej harmonicznej aby być jednakowo pewni percepcji wysokości residualnej. Po przekroczeniu tego numeru harmoniczných przebieg progu nie zmienia się.

Badania przeprowadzono do 9. harmonicznej włącznie, gdyż powyżej tego numeru poziom wyższej harmonicznej wymagany do percepcji wysokości residualnej odpowiadającej częstotliwości brakującej składowej, zrównywał się z poziomem niższej harmonicznej dwutonu. Jak wiadomo z wcześniejszych badań [46][47][170], takie dwutony (o równych poziomach składowych) powodują jednoznaczną percepcję zjawiska residuum i dalsze badania potwierdziłyby jedynie te wyniki.

Z punktu widzenia tezy pracy najważniejsze wydaje się przeprowadzenie testu sprawdzenia hipotezy o zależności percypowanej wysokości dwutonu od poziomu wyższej harmonicznej. Ponadto dane z rys. 8 ukazują zależność progu występowania zjawiska

residuum od częstotliwości składowych dwutonu. Istnienie tej zależności zostanie również sprawdzone poprzez weryfikację odpowiedniej hipotezy.

W celu wykazania zależności pomiędzy percypowaną wysokością a poziomem wyższej składowej (rys. 6), zdecydowano się na użycie statystycznej analizy wariancji ANOVA [201][202]. W celu przeprowadzenia testu, w pierwszej kolejności, należy wykazać normalność rozkładu odpowiedzi słuchaczy (percypowanych wysokości) dla danego poziomu wyższej harmonicznej.

Tabela 1. Wynik testu Jarque-Bera sprawdzenia hipotezy o normalność rozkładu odpowiedzi słuchaczy (percypowanych wysokości dwutonu) w zależności od poziomu wyższej harmonicznej. Test wykonano w całym zakresie badanych częstotliwości składowych dwutonów dla poziomu istotności 0.05.

	4	5	6	7	8	9
0	2.92	0.25	1.55	0.72	0.30	0.21
5	1.95	1.05	1.49	4.47	1.26	1.05
10	3.17	1.23	3.24	1.74	1.83	2.8
15	1.78	2.18	4.02	1.43	2.85	1.49
20	0.54	1.64	1.34	3.12	3.96	3.36
25	54.75	1.55	2.19	2.05	1.44	1.14
30	11.98	25.13	4.42	2.41	1.13	0.77
35	169.33	22.8	241.21	241.20	241.21	929.76
40	2.14	126.32	35.94	43.06	93.59	66.12
45	2.41	2.60	239.28	171.32	126.29	59.20
50	0.59	1.57	1.46	0.45	2.05	1.26

Wiersze tabeli odpowiadają poziomom wyższej harmonicznej dwutonu, a kolumny reprezentują dwutony o określonym numerze tej harmonicznej. Wartości w tabeli reprezentują wartości statystyki χ^2 o wartości krytycznej **5.99**. Porównując dane z pierwszej kolumny z rys. 6 można zauważyć, że obszar przejściowy nie charakteryzuje się rozkładem normalnym percypowanych odpowiedzi. Wartości testowe są większe od wartości krytycznej. Wynika to faktu, iż w obszarze przejściowym część słuchaczy percypowała wysokości dwutonu związaną z niższą składową dwutonu (np.: 600 Hz), a pozostała część percypowała już wysokość residualną odpowiadającą częstotliwości 200 Hz (lub 400 Hz w przypadku popełniania błędu oktawowego). Poza obszarem przejściowym rozkład odpowiedzi zachowuje rozkład normalny.

Ponieważ część odpowiedzi słuchaczy nie zachowuje rozkładu normalnego, nie można użyć testu ANOVA do oceny istotności wpływu poziomu wyższej harmonicznej dwutonu na percypowaną wysokość. W takim przypadku wykorzystano nieparametryczny test Kruskalla-Wallisa, odpowiednik jednoczynnikowej ANOV-y [27][50], który do oceny

wpływu danego czynnika na badaną próbę nie wymaga normalności rozkładu pomiarów w próbie i jednorodności ich wariancji.

Tabela 2. Wyniki testu Kruskala-Wallisa sprawdzenia hipotezy o braku wpływu poziomu wyższej harmonicznej dwutonu na percepcję jego wysokości. Test wykonano w całym zakresie badanych częstotliwości składowych dwutonów dla poziomu istotności 0.05.

	4	5	6	7	8	9
eksperyment	89.67	104.29	107.91	98.89	68.64	71.73
wartość krytyczna	43.77	43.77	43.77	43.77	43.77	43.77

Na podstawie wyników testu stwierdzono, że niezależnie od częstotliwości składowych dwutonu hipoteza zerowa została odrzucona, a więc percypowana wysokość dwutonu zależy od poziomu wyższej harmonicznej.

Wyniki testu Jarque-Bera przedstawione w tab. 1 dają możliwość weryfikacji jeszcze dwóch innych hipotez, które posłużą do jednoznacznego stwierdzenia istnienia progów występowania zjawiska residuum o określonej wysokości residualnej. Jak łatwo zauważyć, poza zakresem przejściowym, odpowiedzi słuchaczy dla danego poziomu wyższej harmonicznej posiadają rozkład normalny. Daje to możliwość przetestowania hipotezy o jednorodności wariancji percypowanej wysokości, osobno dla wartości poziomów wyższej harmonicznej z obszarów nr 1 i 3 (rys. 6). Pozytywny wynik testu pozwoliłoby na stwierdzenie braku różnic w dokładności oceny wysokości dla tych obszarów niezależnie od poziomu wyższej harmonicznej i umożliwiłoby sprawdzenie wpływu poziomu wyższej harmonicznej na percypowaną wysokość dwutonu w każdym z obszarów z osobna. Jednorodność wariancji w połączeniu z informacją o wielkości błędu określenia wysokości może stanowić również dowód na jednoznaczność percepcji danej wysokości [27][50].

Jednorodność wariancji percypowanej wysokości dwutonu dla poziomów wyższej harmonicznej poza obszarem przejściowym sprawdzono testem Bartletta [27][50].

Tabela 3. Wyniki testu Bartletta hipotezy o jednorodności wariancji percypowanej wysokości dwutonu w zależności od poziomu wyższej harmonicznej w obszarze nr 1. Test wykonano w całym zakresie badanych częstotliwości składowych dwutonów dla poziomu istotności 0.05.

	4	5	6	7	8	9
eksperyment	0.60	3.67	1.77	6.63	2.87	7.89
wartość krytyczna	9.48	11.07	12.59	12.59	12.59	12.52

Tabela 4. Wyniki testu Bartletta hipotezy o jednorodności wariancji percypowanej wysokości dwutonu w zależności od poziomu wyższej harmonicznej w obszarze nr 3. Test wykonano w całym zakresie badanych częstotliwości składowych dwutonów dla poziomu istotności 0.05.

	4	5	6	7	8	9
eksperyment	5.34	2.77	-	-	-	-
wartość krytyczna	5.59	3.84	-	-	-	-

Na podstawie przedstawionych wyników można stwierdzić brak różnic w wariancjach percypowanych wysokości dwutonu w zależności od poziomu wyższej harmonicznej z obszaru nr 1 niezależnie od częstotliwości składowych dwutonu. Dla wartości poziomu wyższej harmonicznej w obszarze nr 3 możliwe było stwierdzenie jednorodności wariancji jedynie dla wyższej harmonicznej o numerze 4 i 5. Dla pozostałych numerów, ze względu na tylko jedną wartość poziomu w obszarze nr 3 (tab. 1) taki test był niemożliwy do wykonania. Nie ma jednak podstaw twierdzić, iż dla pozostałych numerów wyższej harmonicznej ta jednorodność wariancji nie występowała. W badaniach brały udział te same osoby i oceniały wysokość dwutonu w ten sam sposób. Również wyniki z obszaru nr 1 (tab. 3) świadczą o braku wpływu częstotliwości składowych dwutonu na jednorodność wariancji otrzymanych wyników. Na podstawie powyższych rozważań założono, iż dla poziomów wyższej harmonicznej poza obszarem przejściowym zachowana jest jednorodność wariancji percypowanych wysokości dwutonu.

Wyniki powyższego testu wraz z wynikami testu z tab. 1 pozwalają na przeprowadzenie weryfikacji hipotezy o braku wpływu poziomu wyższej harmonicznej, dla wartości poza obszarem przejściowym, na percypowaną wysokość dwutonu.

Tabela 5. Test ANOVA sprawdzenia hipotezy o braku wpływu poziomu wyższej harmonicznej w obszarze nr 1 na percypowaną wysokość dwutonu. Test wykonano w całym zakresie badanych częstotliwości składowych dwutonów dla poziomu istotności 0.05.

	4	5	6	7	8	9
eksperyment	0.68	0.82	0.96	2.03	0.50	1.01
wartość krytyczna	2.39	2.23	2.12	2.12	2.12	2.12

Tabela 6. Test ANOVA sprawdzenia hipotezy o braku wpływu poziomu wyższej harmonicznej w obszarze nr 3 na percypowaną wysokość dwutonu. Test wykonano w całym zakresie badanych częstotliwości składowych dwutonów dla poziomu istotności 0.05.

	4	5	6	7	8	9
eksperyment	0.49	0.67	-	-	-	-
wartość krytyczna	3.04	4.90	-	-	-	-

Powyższe wyniki pokazują brak wpływu poziomu wyższej harmonicznej w obszarze nr 1 na percypowaną wysokość dwutonu niezależnie od częstotliwości jego składowych. Z tych samych względów, co dla testu jednorodności wariancji, nie można było wykonać testu dla numerów wyższej harmonicznej z zakresu od 6 do 9 w obszarze nr 3. Można jednak założyć, iż poziom wyższej harmonicznej dla wartości w tym obszarze, nie wpływa na percypowaną wysokość dwutonu, ze względu na wyniki dla obszaru nr 1 (tab. 5).

Dotychczasowe testy statystyczne stwierdzają, iż poziomy wyższej harmonicznej, osobno dla wartości z obszarów nr 1 i 3, nie wpływają na percepcję wysokości dwutonu i dokładność jej oceny. W celu potwierdzenia, iż percypowane wysokości dwutonu w tych obszarach różnią się od siebie (rys. 6) zastosowano test Kruskala-Wallisa, który nie wymaga sprawdzenia jednorodności wariancji odpowiedzi słuchaczy dla badanych poziomów wyższej składowej. Ponieważ w tym wypadku sprawdzana jest hipoteza o równości percypowanych wysokości, jednakowa dokładność ich oszacowania nie jest konieczna.

Tabela 7. Test Kruskala-Wallisa sprawdzenia hipotezy o braku różnicy percypowanych wysokości dwutonu w obszarach nr 1 i 3. Test wykonano w całym zakresie badanych częstotliwości składowych dwutonów dla poziomu istotności 0.05.

	4	5	6	7	8	9
eksperyment	121.98	121.22	121.7	121.58	121.85	120.99
wartość krytyczna	3.84	3.84	3.84	3.84	3.84	3.84

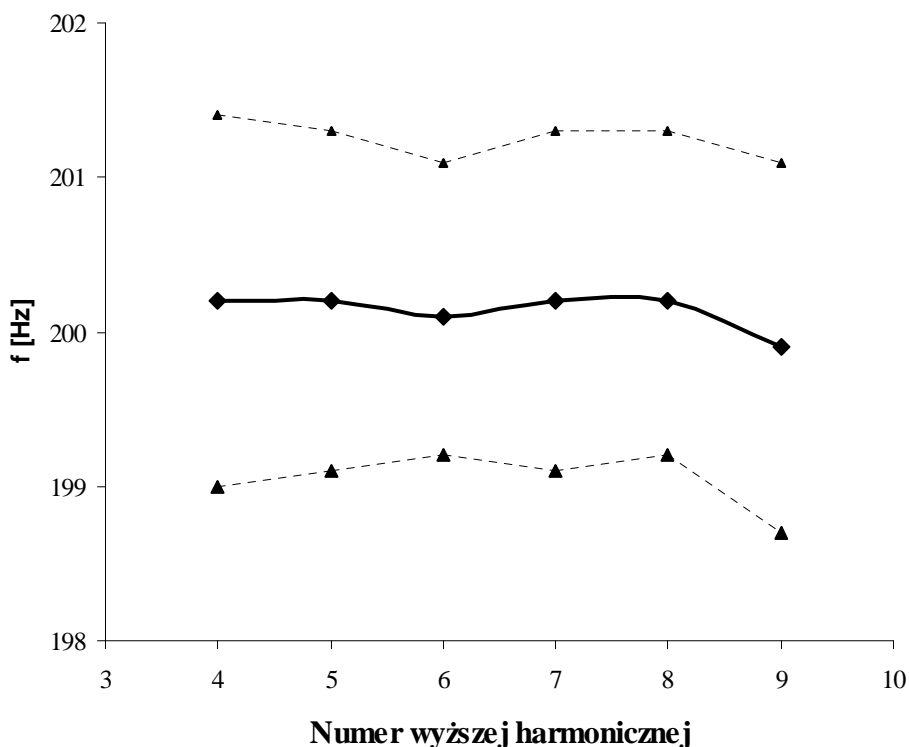
Z powyższego testu z całą pewnością wynika, iż nie ma powodów do przyjęcia hipotezy zerowej (wartość testowa większa od wartości krytycznej). Można więc stwierdzić, iż percypowane wysokości w tych obszarach różnią się na zadanym poziomie istotności testu

Testy statystyczne w połączeniu z wynikami eksperymentu dają dowód na istnienie progów występowania zjawiska residuum (w sensie definicji 1 z rozdziału 2) w dwutonach harmonicznym, o wysokości residualnej odpowiadającej częstotliwości brakującej składowej podstawowej dwutonu (200 Hz), oraz wskazują na istnienie tego progów w obszarze przejściowym ponieważ:

- Istnieje zależność pomiędzy percypowaną wysokością dwutonu, a poziomem wyższej harmonicznym (tab. 2, rys. 6), którą cechują trzy obszary zmienności
- W każdym z obszarów nr 1 i 3 z osobna, percypowana jest różna wysokość dwutonu niezależnie od poziomu wyższej harmonicznym w tych obszarach (tab. 7, rys. 6)
- W obszarze przejściowym wysokość dwutonu zależy od poziomu wyższej harmonicznym i istnieje taka jego wartość, dla której następuje zmiana wrażenia wysokości (rys. 7)

Za pomocą testu statystycznego stwierdzono również zależność progów występowania zjawiska residuum, o wysokości residualnej odpowiadającej częstotliwości brakującej składowej podstawowej dwutonu, od częstotliwości jego składowych (rys. 8). Ponieważ progowe wartości wyznaczone są w obszarach przejściowych, dla których nie jest zachowany rozkład normalny odpowiedzi słuchaczy, zastosowano nieparametryczny test Kruskala-Wallisa w celu weryfikacji hipotezy zerowej o braku wpływu częstotliwości składowych dwutonu na próg występowania zjawiska residuum. Wartość statystyki testowej na poziomie istotności 0.05 wyniosła $\chi^2(5)=94.01$ przy krytycznej wartości statystyki 11.07. Na podstawie tego testu hipotezę zerową odrzucono.

Wyniki przeprowadzonego eksperymentu potwierdzają również brak wpływu częstotliwości składowych dwutonu na percypowaną wysokość residualną, dla wartości poziomów wyższej harmonicznej powyżej progu jej występowania (obszar nr 3 na rys. 6), co prezentuje poniższy rysunek:



Rys. 9. Zależność percypowanej wysokości dwutonu, wyrażonej w Hz, w funkcji częstotliwości jego składowych wyrażonej poprzez numer wyższej harmonicznej, dla poziomów tej harmonicznej powyżej progu występowania zjawiska residuum. Wynik uśredniono dla wszystkich słuchaczy. Linia ciągła przedstawia średnią percypowaną wysokość, natomiast linie przerywane określają odchylenie standardowe reprezentujące siłę wrażenia residuum.

Na podstawie rys. 9 można stwierdzić, iż percypowana wysokość dwutonu, dla poziomu wyższej harmonicznej powyżej progu (obszar nr 3) występowania zjawiska residuum, odpowiada częstotliwości brakującej składowej podstawowej dwutonu i nie zależy od częstotliwości jego składowych. Wartość odchylenia standardowego ($\Delta f < 2$ Hz) reprezentująca siłę wrażenia wysokości residualnej świadczy o jednoznacznej jej percepcji. Hipotezę zerową o braku wpływu częstotliwości składowych dwutonu na percypowaną wysokość residualną zbadano testem ANOVA. Wcześniej jednak sprawdzono jednorodność wariancji odpowiedzi słuchaczy testem Bartletta na poziomie istotności 0.05 i przyjęto hipotezę zerową, o braku różnic pomiędzy wariancjami, dla statystyki testowej $\chi^2(5) = 3.54$ przy wartości krytycznej 11.07. Na poziomie istotności 0.05 test ANOVA wykazał słuszność hipotezy zerowej dla statystyki testowej $F(5,474)=1.69$ przy wartości krytycznej 2.23.

5.5 DYSKUSJA

Na podstawie wyników eksperymentu i wykonanych testów stwierdzono istnienie progu występowania zjawiska residuum w dwutonach harmonicznym o wysokości residualnej $f = 200$ Hz. Występowanie progu zjawiska residuum można tłumaczyć na trzy sposoby. W oparciu o modele analizy pobudzenia, próg występowania zjawiska residuum (badany w tym rozdziale), można tłumaczyć jako taki poziom wyższej harmonicznnej dwutonu, dla którego ta składowa jest percypowana na tyle wyraźnie, aby stać się istotnym składnikiem pobudzenia i wywołać wrażenie wysokości residualnej odpowiadające częstotliwości brakującej składowej podstawowej tego dwutonu [105]. Biorąc pod uwagę model struktury czasowej próg powstawania tego zjawiska jest to taki poziom wyższej składowej pobudzenia, dla którego drgania błony podstawowej wywołują akcję neuronową powodującą powstanie wrażenia wysokości residualnej o częstotliwości brakującej składowej podstawowej dwutonu [105]. W oparciu o modele korelacyjne natomiast, próg powstawania zjawiska residuum można tłumaczyć jako taki poziom wyższej harmonicznnej dwutonu, dla którego w przebiegu sumarycznej funkcji autokorelacji, reprezentującej strukturę czasową wyładowań neuronowych, pojawia się maksimum odpowiedzialne za percepcję wysokości residualnej odpowiadającej częstotliwości brakującej składowej dwutonu. [105]

Analizując zachowanie się progu występowania zjawiska residuum z rys. 8 można zauważyć, że jego wzrost przypada dla numerów wyższej harmonicznnej z zakresu od 4 do 6. Prace [23][133][146] dotyczące składowych dominujących w percepcji zjawiska residuum podają te same zakresy numerów harmonicznnych, dla których zjawisko residuum jest najwyraźniej percypowane. Można więc założyć, iż niższe wartości progu w tym zakresie są związane z występowaniem dominującego rejonu percepcji zjawiska residuum [109].

Wzrost progu w rejonie dominującym można tłumaczyć przede wszystkim zmianą barwy powstającej wysokości residualnej. Dla coraz większych numerów wyższej harmonicznnej wzrasta chropowatość barwy percypowanego tonu residualnego [135][178]. Z tego powodu słuchacze potrzebowali coraz większego poziomu wyższej harmonicznnej dwutonu, aby jednoznacznie percypować wysokość residualną, którą określali za pomocą tonu prostego. Dla coraz większych częstotliwości składowych dwutonu, w tym rejonie, barwa residuum coraz bardziej różniła się od wrażenia wysokości wywoływanego przez dwuton [105][109][104]. Te różnice są również głównym powodem powstawania błędu oktawowego przy ocenie wysokości residualnej [75].

Stałość progu powyższej 6. harmonicznej można tłumaczyć faktem, iż dla zakresu częstotliwości, który coraz bardziej zbliża się do rejonu składowych nierozróżnialnych słuchem (powyżej 7. harmonicznej [134]), barwa residuum nie zmienia się już tak znacząco i nie wymusza u słuchaczy wzrostu poziomu wyższej harmonicznej do jednoznacznej percepcji wysokości residualnej [107].

Natomiast stałość wysokości residualnej, niezależnie od częstotliwości składowych dwutonów harmoniczych, po przekroczeniu progu jej występowania (rys. 9) potwierdza wyniki otrzymane przez innych autorów [46][47][170]. Poziomy składowych pobudzeń stosowane w tamtych pracach zapewniały przekroczenie progu występowania zjawiska residuum.

5.6 PODSUMOWANIE

Wyniki powyższego eksperymentu dowodzą:

- Istnienia progu powstawania zjawiska residuum (w sensie definicji 1 z rozdziału 2) o określonej wysokości residualnej w dwutonach harmoniczych
- Zależności progu powstawania zjawiska residuum od częstotliwości składowych dwutonu, a ściślej od numeru jego składowych

6. WYZNACZENIE PROGU WYSTĘPOWANIA ZJAWISKA RESIDUUM DLA DWUTONÓW NIEHARMONICZNYCH O WYSOKOŚCI RESIDUALNEJ ODPOWIADAJĄCEJ CZĘSTOTLIWOŚCI BRAKUJĄCEJ SKŁADOWEJ PODSTAWOWEJ TYCH DWUTONÓW

CEL

SPRAWDZENIE WPLYWU TONU RÓŻNICOWEGO NA PERCEPCJĘ ZJAWISKA RESIDUUM W DWUTONACH

6.1 BODZIEC WZORCOWY

W eksperymencie słuchacze określali wysokość dwutonów, których składowe były sąsiadującymi harmonicznymi brakującej składowej podstawowej 200 Hz przesuniętymi w górę w dziedzinie częstotliwości o $\Delta f = 30$ Hz. W każdym dwutonie poziom niższej składowej był stały i wynosił $L_n = 50$ dB SPL, natomiast poziom wyższej składowej L_{n+1} był zmieniany w zakresie od 0 do 50 dB SPL z krokiem 5 dB, w celu wyznaczenia progu występowania zjawiska residuum o wysokości residualnej odpowiadającej częstotliwości brakującej składowej podstawowej dwutonu.

6.2 EKIPA ODSŁUCHOWA

W eksperymencie brały udział osoby z eksperymentu nr 1.

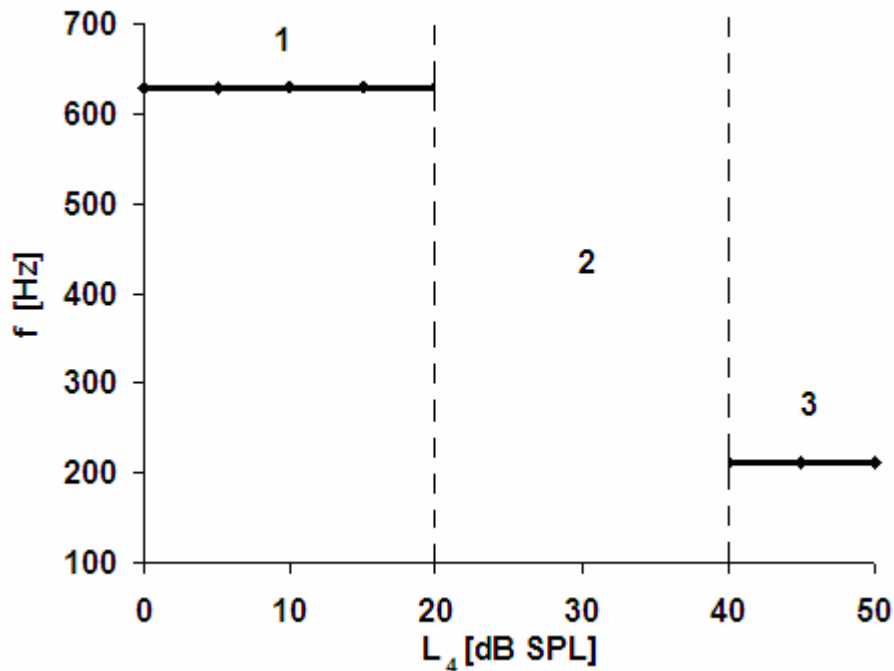
6.3 PROCEDURA POMIAROWA

W eksperymencie użyto tej samej metody, co w eksperymencie nr 1.

6.4 WYNIKI

Na podstawie przeprowadzonego eksperymentu wyznaczono próg powstawania zjawiska residuum w dwutonach nieharmonicznych o wysokości residualnej odpowiadającej częstotliwości brakującej składowej podstawowej tych dwutonów. Rys. nr 10 przedstawia

zależność percypowanej wysokości dwutonu, złożonego ze składowych o częstotliwościach $s_3=630\text{ Hz}$ i $s_4=830\text{ Hz}$, od poziomu wyższej składowej:



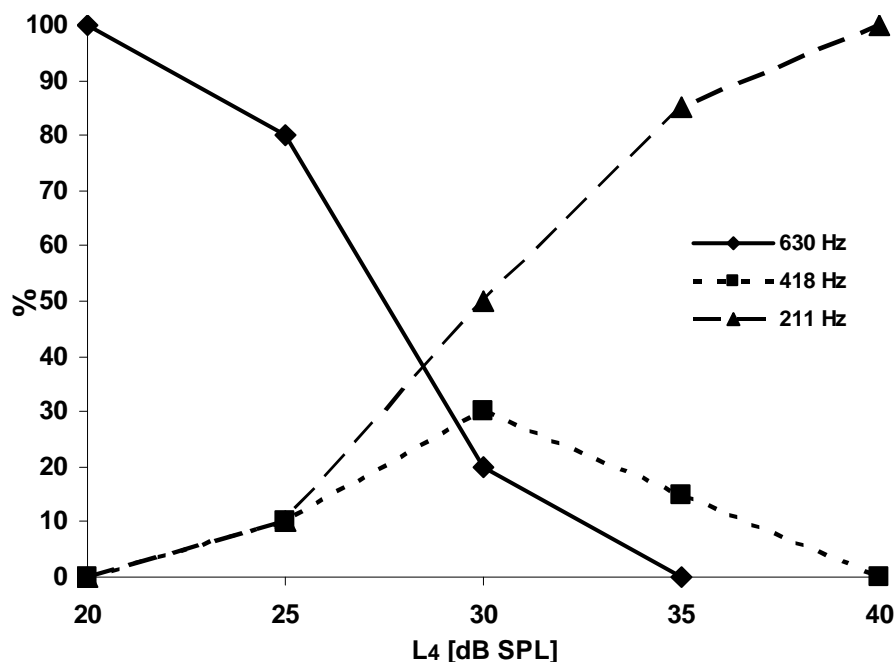
Rys. 10. Zależność percypowanej wysokości dwutonu, złożonego ze składowych s_3 i s_4 , od poziomu wyższej składowej. Percypowaną wysokość wyrażono w Hz .

Rys. 10 wskazuje na zależność percypowanej wysokości dwutonu od poziomu jego wyższej składowej. W obszarze nr 1, dla zakresów poziomu wyższej składowej od 0 do 20 dB SPL włącznie, słuchacze percypowali wysokość związaną jedynie z częstotliwością niższej składowej dwutonu s_3 , ponieważ niski poziom s_4 nie był w stanie zmienić tego wrażenia. W obszarze przejściowym (nr 2), w zakresie poziomów s_4 od 25 do 35 dB SPL włącznie, udział tej składowej w percepcji wysokości dwutonu był na tyle wyraźny, iż część słuchaczy percypowała już wysokość residualną odpowiadającą częstotliwości brakującej składowej podstawowej dwutonu, natomiast pozostała część słuchaczy percypowała wciąż wysokość związaną ze składową s_3 (630 Hz). Jednoznaczna percepcja wysokości residualnej odpowiadającej częstotliwości brakującej składowej podstawowej dwutonu, przez wszystkich słuchaczy, nastąpiła w obszarze nr 3, gdy poziom składowej s_4 osiągnął 40 dB SPL. Dalszy wzrost poziomu s_4 nie powodował zmiany percepcji wysokości dwutonu.

Należy zwrócić uwagę, że dla tego dwutonu, percypowana wysokość residualna (211 Hz) jest przesunięta w stosunku do wysokości residualnej dwutonu harmonicznego (200 Hz). Jest to wynikiem występowania I efektu przesunięcia wysokości na skutek przesunięcia częstotliwości składowych dwutonu (rozdział 1.3.5.5).

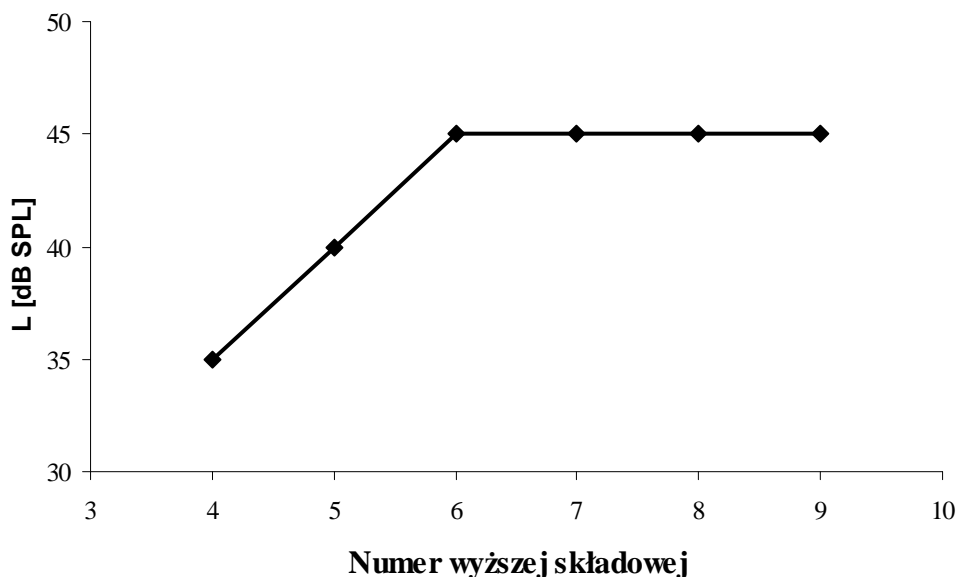
Dla dwutonów złożonych z innych częstotliwości przebieg percepcji wysokości zachodził również w trzech obszarach. W zależności od częstotliwości składowych zmieniają się zakresy poziomów wyższej składowej wchodzących do danego obszaru.

Również w przypadku dwutonów nieharmonicznych, w obszarze przejściowym (rys. 11), część osób popełniała błąd oktaowy w stosunku do wysokości brakującej składowej podstawowej dwutonu i należy zaznaczyć, iż w 80 % były to te same osoby, które popełniały ten błąd dla dwutonów harmonicznych. W celu uniknięcia niejednoznaczności oceny progu, przyjęto wartość co najmniej 75% poprawnych odpowiedzi słuchaczy (percepcja wysokości dwutonu związanej z brakującą składową) w celu wyznaczenia progu występowania zjawiska residuum.



Rys. 11. Rozkład odpowiedzi słuchaczy (wyrażony w %) percypujących określoną wysokości dwutonu, złożonego ze składowych s_3 i s_4 , w zależności od poziomu wyższej składowej w obszarze przejściowym. Percypowaną wysokość wyrażono w Hz.

Na podstawie zależności percypowanej wysokości dwutonu od poziomu wyższej składowej, wyznaczono zachowanie się progu występowania zjawiska residuum w całym zakresie częstotliwości składowych dwutonu.



Rys. 12. Zależność poziomu wyższej składowej dwutonu, wymaganego do jednoznacznej percepcji wysokości residualnej odpowiadającej częstotliwości brakującej składowej podstawowej tego dwutonu, w funkcji częstotliwości składowych wyrażonych poprzez numer wyższej składowej. Wynik wyznaczony dla co najmniej 75% poprawnych odpowiedzi słuchaczy.

Rys. 12 wskazuje na zależność progu występowania wysokości residualnej dwutonu od częstotliwości jego składowych wyrażonych poprzez numer wyższej składowej. Porównując tę zależność z rys. 8 można stwierdzić, iż przesunięcie częstotliwości składowych dwutonu nie powoduje zmian w przebiegu progu. Interpretacja tego przebiegu jest identyczna z tą, zawartą w rozdziale 5.4 dla dwutonów harmonicznych.

Z tych samych względów, co dla dwutonów harmonicznych, badania przeprowadzono do 9. składowej włącznie, gdyż powyżej tego numeru poziom wyższej składowej wymagany do percepcji wysokości residualnej odpowiadającej częstotliwości brakującej składowej podstawowej dwutonów, zrównywał się z poziomem niższej składowej dwutonu.

W celu zweryfikowania trafności tezy tej pracy, w tym eksperymencie zastosowano ten sam sposób wnioskowania statystycznego jak w eksperymencie nr 1. Weryfikację hipotezy o zależności percypowanej wysokości dwutonu od poziomu wyższej składowej zaczęto od sprawdzenia normalności rozkładu danych eksperymentalnych.

BADANIE PROGÓW WYSTĘPOWANIA ZJAWISKA RESIDUUM

Tabela 8. Wynik testu Jarque-Bera sprawdzenia hipotezy o normalność rozkładu odpowiedzi słuchaczy (percypowanych wysokości dwutonu) w zależności od poziomu wyższej składowej. Test wykonano w całym zakresie badanych częstotliwości składowych dwutonów dla poziomu istotności 0.05.

	4	5	6	7	8	9
0	2.13	2.85	3.46	0.34	1.59	4.59
5	2.00	1.20	3.69	5.23	2.82	0.12
10	0.01	1.36	2.23	0.51	2.57	2.01
15	1.19	3.33	1.51	3.26	0.19	0.47
20	2.03	2.45	2.36	1.15	1.86	5.18
25	109.74	0.52	1.71	0.73	1.45	1.51
30	11.62	52.57	1.79	1.25	0.58	1.30
35	126.31	38.82	28.10	23.67	50.24	29.93
40	2.27	241.34	63.64	51.62	91.80	62.12
45	1.38	2.99	126.36	74.46	176.35	74.46
50	2.22	3.81	1.69	0.49	0.32	0.66

Wiersze tabeli odpowiadają poziomom wyższej składowej dwutonu, a kolumny reprezentują dwutony o określonym numerze tej składowej. Wartości w tabeli reprezentują wartości statystyki χ^2 o wartości krytycznej **5.99**. Jak łatwo zauważyć, wartości z pierwszej kolumny odzwierciedlają obszary zaznaczone na rys. 10. Kolejne kolumny odzwierciedlają szerokość obszarów dla kolejnych numerów wyższej składowej.

W obszarze przejściowym rozkład odpowiedzi słuchaczy nie wykazuje cech rozkładu normalnego ze względu na różne zachowanie się słuchaczy tzn. percepcję wysokości związaną bądź z niższą składową, bądź z brakującą składową podstawową lub jej oktawą. Wartości testowe w tym obszarze są większe od wartości krytycznej. Poza obszarem przejściowym rozkład odpowiedzi zachowuje rozkład normalny.

Ze względu na brak normalności rozkładu w całym zakresie poziomów wyższej składowej wykorzystano nieparametryczny test Kruskala-Wallisa w celu zweryfikowania hipotezy o braku zależności pomiędzy percypowaną wysokością dwutonu, a poziomem wyższej składowej.

Tabela 9. Wyniki testu Kruskala-Wallisa sprawdzenia hipotezy o braku wpływu poziomu wyższej składowej dwutonu na percepcję jego wysokości. Test wykonano w całym zakresie badanych częstotliwości składowych dwutonów dla poziomu istotności 0.05.

	4	5	6	7	8	9
eksperyment	90.3	118.66	187.66	134.44	128.33	112.53
wartość krytyczna	43.77	43.77	43.77	43.77	43.77	43.77

BADANIE PROGÓW WYSTĘPOWANIA ZJAWISKA RESIDUUM

Tabela zawiera wartości rozkładu χ^2 . Ponieważ wartości testowe są większe od wartości krytycznej, hipotezę zerową odrzucono i stwierdzono zależność wysokości dwutonu od poziomu wyższej składowej.

W celu jednoznacznego stwierdzenia istnienia progu występowania zjawiska residuum w dwutonach nieharmonicznych o wysokości residualnej odpowiadającej częstotliwości brakującej składowej podstawowej wykonano odpowiednie testy statystyczne.

W pierwszej kolejności sprawdzono hipotezę o braku różnic w wariancji percypowanych wysokości dwutonu względem poziomu wyższej składowej, która da odpowiedź, czy ocena wysokości przez słuchaczy w obszarach poza obszarem przejściowym różni się pod względem dokładności. Jednakowa dokładność oszacowania wysokości, wraz z informacją o błędzie jej określenia wskazywać by mogła na jednoznaczną percepcję określonej wysokości w każdym z obszarów nr 1 i 3. W tym celu zastosowano test Bartletta.

Tabela 10. Wyniki testu Bartletta hipotezy o jednorodności wariancji percypowanej wysokości dwutonu w zależności od poziomu wyższej składowej w obszarze nr 1. Test wykonano w całym zakresie badanych częstotliwości składowych dwutonów dla poziomu istotności 0.05.

	4	5	6	7	8	9
eksperyment	6.04	8.26	3.23	6.55	5.68	11.52
wartość krytyczna	9.48	11.07	12.59	12.59	12.59	12.59

Tabela 11. Wyniki testu Bartletta hipotezy o jednorodności wariancji percypowanej wysokości dwutonu w zależności od poziomu wyższej składowej w obszarze nr 3. Test wykonano w całym zakresie badanych częstotliwości składowych dwutonów dla poziomu istotności 0.05.

	4	5	6	7	8	9
eksperyment	5,48	3.20	-	-	-	-
wartość krytyczna	5.59	3.84	-	-	-	-

Wyniki z tab. 10 stwierdzają brak różnic w wariancjach percypowanych wysokości dwutonu w zależności od poziomu wyższej składowej z obszaru nr 1 niezależnie od częstotliwości składowych dwutonu. W tab. 11 możliwe było stwierdzenie jednorodności wariancji jedynie dla wyższej składowej o numerze 4 i 5. Dla pozostałych numerów, ze względu na tylko jedną wartość poziomu w obszarze nr 3 (tab. 8) taki test był niemożliwy do wykonania. Ponieważ w badaniach brały udział te same osoby i oceniały wysokość dwutonu w ten sam sposób, nie ma podstaw twierdzić, iż dla pozostałych numerów wyższej

składowej ta jednorodność wariancji nie występowała. Również wyniki z obszaru nr 1 (tab. 10) świadczą o braku wpływu częstotliwości składowych dwutonu na jednorodność wariancji otrzymanych wyników. Można więc założyć, że dla poziomów wyższej składowej spoza obszaru przejściowego stwierdzono jednorodność wariancji percypowanych wysokości dwutonu.

Na podstawie powyższych wyników, z uwzględnieniem testu z tab. 8, można dokonać weryfikacji hipotezy o braku wpływu poziomu wyższej składowej, dla wartości spoza obszaru przejściowego, na percypowaną wysokość dwutonu.

Tabela 12. Test ANOVA sprawdzenia hipotezy o braku wpływu poziomu wyższej składowej w obszarze nr 1 na percypowaną wysokość dwutonu. Test wykonano w całym zakresie badanych częstotliwości składowych dwutonów dla poziomu istotności 0.05.

	4	5	6	7	8	9
eksperyment	0.11	0.05	1.11	0.55	0.41	0.20
wartość krytyczna	2.39	2.23	2.12	2.12	2.12	2.12

Tabela 13. Test ANOVA sprawdzenia hipotezy o braku wpływu poziomu wyższej składowej w obszarze nr 3 na percypowaną wysokość dwutonu. Test wykonano w całym zakresie badanych częstotliwości składowych dwutonów dla poziomu istotności 0.05.

	4	5	6	7	8	9
eksperyment	0.18	0.05	-	-	-	-
wartość krytyczna	3.04	4.90	-	-	-	-

Wyniki z tab. 12 potwierdzają brak wpływu poziomu wyższej składowej w obszarze nr 1 na percypowaną wysokość dwutonu niezależnie od częstotliwości jego składowych. Wartości statystyki testowej Fishera-Snedecora są mniejsze od wartości krytycznych i na tej podstawie przyjęto hipotezę zerową. Brak możliwości wykonania testu jednorodności wariancji w obszarze nr 3 (tab. 12) dla numerów wyższej składowej z zakresu 6-9, uniemożliwiło również wykonanie testu ANOVA dla tych dwutonów (tab. 13). Jednak dla numerów 4 i 5 test wskazuje na brak wpływu poziomu wyższej składowej na percypowaną wysokość dwutonu na poziomie istotności testu 0.05. Zakładając te same warunki eksperymentu i udział w nim tych samych osób wydaje się mało prawdopodobne, aby dla większych częstotliwości składowych dwutonu, zmiana poziomu wyższej składowej

powodowała zmianę percypowanej wysokości. Ponadto wyniki z obszaru nr 1 świadczą o braku wpływu częstotliwości składowych dwutonu na wynik testu. Przyjęto więc założenie, że w każdym z obszarów nr 1 i 3 poziom wyższej składowej nie wpływa na percypowaną wysokość dwutonu.

Na podstawie powyższych testów nie można jednak stwierdzić, czy percypowane wysokości w obszarach nr 1 i 3 różnią się od siebie. W celu weryfikacji hipotezy o braku różnic pomiędzy percypowanymi wysokościami w tych obszarach zastosowano test Kruskala-Wallisa, który nie wymaga tej samej dokładności oszacowania wysokości w obu obszarach (jednorodności wariancji).

Tabela 14. Test Kruskala-Wallisa sprawdzenia hipotezy o braku różnicy percypowanych wysokości dwutonu w obszarach nr 1 i 3. Test wykonano w całym zakresie badanych częstotliwości składowych dwutonów dla poziomu istotności 0.05.

	4	5	6	7	8	9
eksperyment	121.05	120.46	120.84	121.18	121.67	121.89
wartość krytyczna	3.84	3.84	3.84	3.84	3.84	3.84

Z powyższego testu z całą pewnością wynika, iż percypowane wysokości w tych obszarach różnią się na zadanym poziomie istotności testu. Wartość statystyki testowej χ^2 jest większa od wartości krytycznej, co implikuje brak podstaw do przyjęcia hipotezy zerowej.

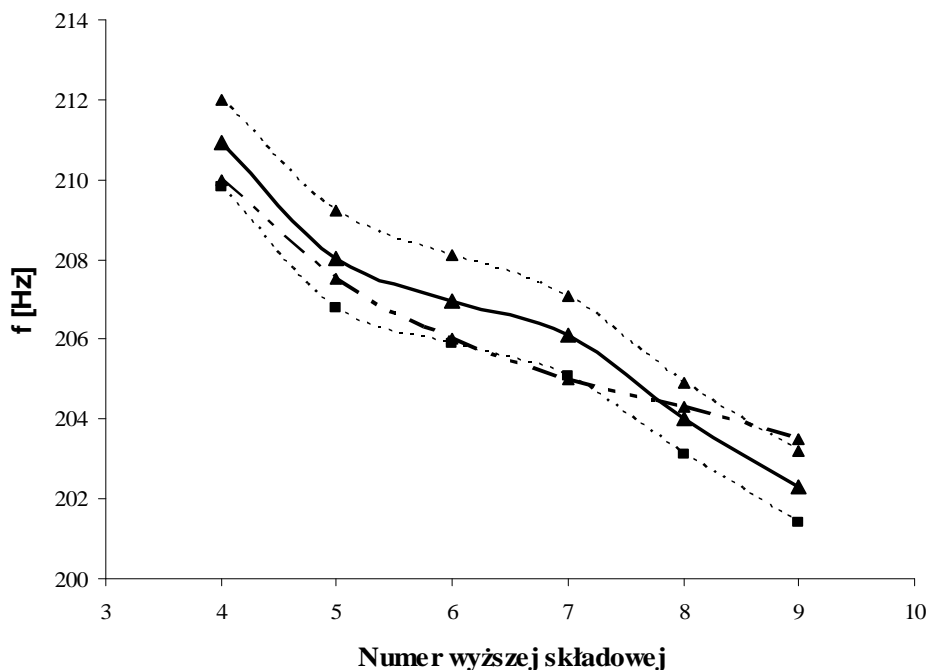
Powyższe wnioskowanie statystyczne, wraz z wynikami eksperymentu, dają dowód na istnienie progów występowania zjawiska residuum (w sensie definicji 1 z rozdziału 2) o wysokości residualnej odpowiadającej częstotliwości brakującej składowej w dwutonach nieharmonicznych, oraz wskazują na istnienie tego progów w obszarze przejściowym ponieważ:

- Istnieje zależność pomiędzy percypowaną wysokością dwutonu, a poziomem wyższej składowej (tab. 9), która cechują trzy obszary zmienności
- W każdym z obszarów nr 1 i 3 z osobna, percypowana jest różna wysokość dwutonu niezależnie od poziomu wyższej składowej w tych obszarach (tab. 14, rys. 10)
- W obszarze przejściowym wysokość dwutonu zależy od poziomu wyższej składowej i istnieje taka jego wartość, dla której następuje zmiana wrażenia wysokości (rys. 11)

Testy statystyczne wykazały również zależność progów występowania zjawiska residuum o wysokości residualnej odpowiadającej częstotliwości brakującej składowej podstawowej dwutonu od częstotliwości składowych go tworzących (rys. 12). W celu weryfikacji hipotezy

o braku różnic wartości progu od częstotliwości składowych dwutonu, użyto nieparametrycznego testu Kruskala-Wallisa, gdyż wartości progowe wyznaczone były w obszarze przejściowych, w których nie był zachowany rozkład normalny percypowanych wysokości. Wartość statystyki testowej na poziomie istotności 0.05 wyniosła $\chi^2(5)=94.32$ przy krytycznej wartości statystyki 11.07. Na podstawie tego testu hipotezę zerową odrzucono.

Wyniki przeprowadzonego eksperymentu potwierdzają natomiast fakt wpływu częstotliwości składowych dwutonu na percypowaną wysokość residualną dla wartości poziomów wyższej składowej powyżej progu jego występowania (obszar nr 3), co prezentuje poniższy rysunek:



Rys. 13. Zależność percypowanej wysokości dwutonu, wyrażonej w Hz, w funkcji częstotliwości jego składowych wyrażonej poprzez numer wyższej składowej, dla poziomów tej składowej z obszaru nr 3, powyżej progu występowania zjawiska residuum. Wynik uśredniono dla wszystkich słuchaczy. Linia gruba ciągła przedstawia średnią percypowaną wysokość, linie cienkie przerywane określają odchylenie standardowe reprezentujące siłę wrażenia residuum, linia gruba przerywana została obliczona na podstawie eksperymentu Schoutena (zależność 32, podrozdział 1.3.5.5)

Rys. 13 potwierdza wyniki eksperymentów dotyczących badań nad wysokością wielotonów nieharmonicznych [16][181]. Wysokość residualna w tego typu pobudzeniach zależy od częstotliwości składowych, a dokładniej od numeru dominującej składowej pobudzenia (podrozdział 1.3.5.5). Wartość odchylenia standardowego ($\Delta f < 2$ Hz) reprezentująca siłę wrażenia wysokości residualnej świadczy o jednoznacznej jej percepcji

przez słuchaczy. Hipotezę zerową o braku wpływu częstotliwości składowych dwutonu na percypowaną wysokość residualną zbadano testem ANOVA. Wcześniej jednak sprawdzono jednorodność wariancji odpowiedzi słuchaczy testem Bartletta na poziomie istotności 0.05 i przyjęto hipotezę zerową o braku różnic pomiędzy wariancjami dla statystyki testowej $\chi^2(5) = 10.15$ przy wartości krytycznej 11.07. Na poziomie istotności 0.05 test ANOVA wykazał brak podstaw do przyjęcia hipotezy zerowej dla statystyki testowej $F(5,474)=743.13$ przy wartości krytycznej 2.23.

6.5 DYSKUSJA

Wyniki eksperymentu i przeprowadzone testy statystyczne dowodzą istnienia progu występowania zjawiska residuum o wysokości residualnej odpowiadającej częstotliwości brakującej składowej podstawowej w dwutonach nieharmonicznych. Interpretacja istnienia progu występowania określonej wysokości residualnej w oparciu o modele percepcji zjawiska residuum jest identyczna jak w przypadku dwutonów harmonicznych [105].

Analizując zachowanie się progu występowania zjawiska residuum z rys. 12 można zauważyć, że jest ono identyczne z zachowaniem się progu dla dwutonów harmonicznych. Z tego powodu interpretacja tego zachowania nie różni się od tej zaproponowanej w rozdziale 5.4 (dla dwutonów harmonicznych). Wprowadzenie stosunkowo małego przesunięcia składowych w dziedzinie częstotliwości $\Delta f = 30 \text{ Hz}$, nie spowodowało zmiany percepcji tego dwutonu w stosunku do dwutonu harmonicznego. Dlatego też nie nastąpiła zmiana poziomu wyższej składowej dwutonu, dla określonej częstotliwości, potrzebna do zrównania wrażenia wysokości residualnej w porównaniu do dwutonu harmonicznego.

Istotny jest jednak fakt przesunięcia percypowanej wysokości residualnej w stosunku do wartości częstotliwości $f = 200 \text{ Hz}$ (składowa podstawowa dwutonów harmonicznych), na skutek wprowadzenia przesunięcia składowych dwutonu. Z rys. 13 wynika, że to przesunięcie wysokości residualnej zależy od numeru niższej składowej. Zależność ta opisana wyrażeniem (32) (podrozdział 1.3.5.5) nazwana jest I efektem przesunięcia wysokości. Wystąpienie tego efektu jest dowodem na brak wpływu tonu różnicowego (200 Hz) na percepcję wysokości residualnej w dwutonach, a w konsekwencji na próg jego występowania.

6.6 PODSUMOWANIE

Wyniki powyższego eksperymentu dowodzą:

- Istnienia progu powstawania zjawiska residuum (w sensie definicji 1 z rozdziału 2) o określonej wysokości residualnej w dwutonach nieharmonicznych
- Zależności progu powstawania zjawiska residuum od częstotliwości składowych dwutonu, a ściślej od numeru jego składowych
- Braku wpływu tonu różnicowego na próg występowania zjawiska residuum w dwutonach

7. WYZNACZENIE PROGU WYSTĘPOWANIA ZJAWISKA RESIDUUM DLA TRÓJTONÓW HARMONICZNYCH O WYSOKOŚCI RESIDUALNEJ ODPOWIADAJĄCEJ CZĘSTOTLIWOŚCI BRAKUJĄCEJ SKŁADOWEJ PODSTAWOWEJ TYCH TRÓJTONÓW

7.1 BODZIEC WZORCOWY

W eksperymencie słuchacze określali wysokość trójttonów, których składowe były sąsiadującymi harmonicznymi brakującej składowej podstawowej 200 Hz. W każdym trójttonie poziom najniższej i najwyższej harmonicznej był stały i wynosił $L_n = L_{n+2} = 50 \text{ dB SPL}$, natomiast poziom środkowej harmonicznej L_{n+1} był zmieniany w zakresie od 0 do 50 dB SPL z krokiem 5 dB, w celu wyznaczenia progu występowania zjawiska residuum o częstotliwości odpowiadającej składowej podstawowej trójttonu $f = 200 \text{ Hz}$.

7.2 EKIPA ODSŁUCHOWA

W eksperymencie brały udział osoby z eksperymentów nr 1 i 2.

7.3 PROCEDURA POMIAROWA

W eksperymencie zastosowano tę samą metodę pomiarową jak w eksperymencie nr 1 i 2. Jediną różnicą jest wybór składowej odpowiedzialnej za wyznaczenie progu występowania zjawiska residuum o wysokości residualnej odpowiadającej częstotliwości brakującej składowej trójttonu. Tylko zmiana poziomu środkowej harmonicznej spowoduje zmianę percypowanej wysokości trójttonu. Zmiana poziomu jednej z brzegowych harmonicznych nie powoduje zmiany percypowanej wysokości, gdyż nie zmienia się częstotliwość podstawowa takiego pobudzenia.

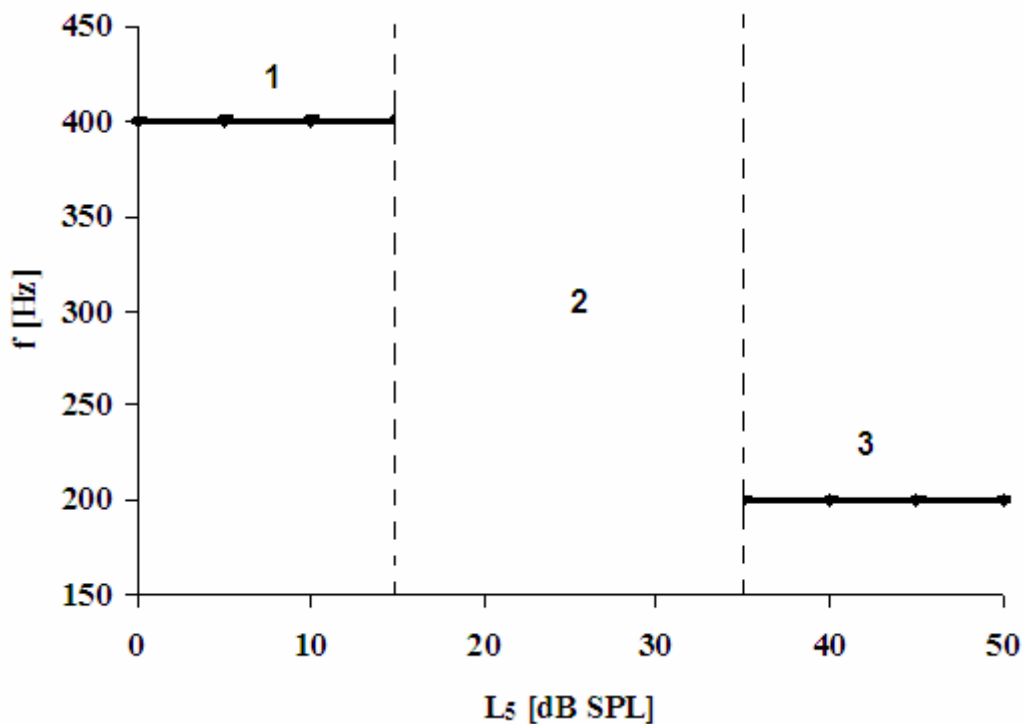
W tej pracy zdecydowano się na rozróżnienie trójttonów pod względem numeru środkowej harmonicznej. Podzielono je na trójttony o nieparzystym i parzystym numerze środkowej harmonicznej. Na podstawie wcześniejszych badań [106] stwierdzono słuszność

takiego podziału, a konsekwencje z niego wynikające zostaną omówione w dalszej części opisu eksperymentu.

Ze względu na czytelność prezentowanych wyników dane dotyczące poszczególnych grup trójtónów zostaną przedstawione osobno.

7.4 WYNIKI

Wyniki eksperymentu pozwoliły na wyznaczenie progu występowania zjawiska residuum o wysokości residualnej odpowiadającej częstotliwości $f = 200 \text{ Hz}$ w trójtónach harmonicznym. Rys. 14 przedstawia zależność percypowanej wysokości trójtónu o nieparzystym numerze środkowej harmonicznnej, złożonego ze składowych o częstotliwościach $h_4=800 \text{ Hz}$, $h_5=1000 \text{ Hz}$ i $h_6=1200 \text{ Hz}$, od poziomu środkowej harmonicznnej:

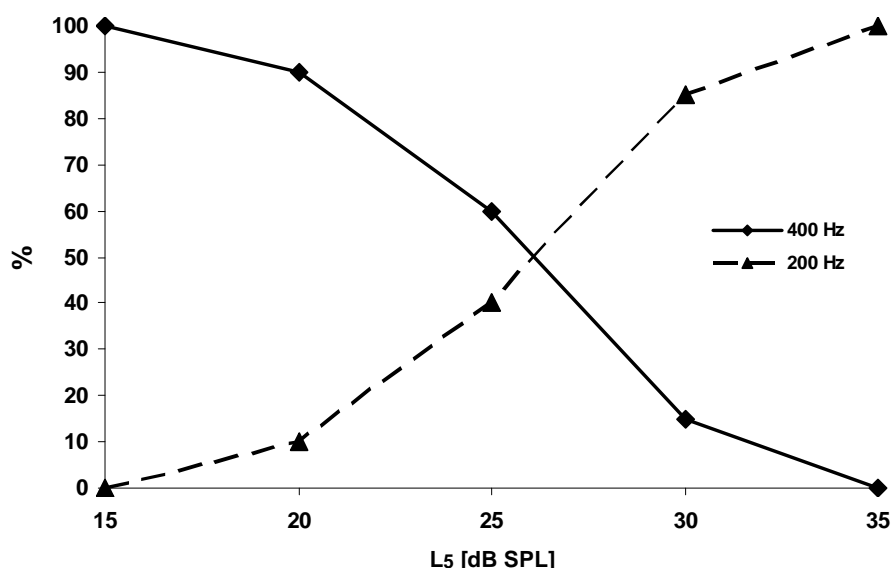


Rys. 14. Zależność percypowanej wysokości trójtónu, złożonego z harmonicznym h_4 , h_5 i h_6 , od poziomu środkowej harmonicznnej. Percypowaną wysokość wyrażono w Hz.

Rys. 14 wskazuje na zależność percypowanej wysokości trójtónów, o nieparzystym numerze środkowej harmonicznnej, od poziomu tej składowej. Obszar nr 1 odpowiada zakresom poziomów środkowej harmonicznnej od 0 do 15 dB SPL włącznie. W tym obszarze słuchacze percypowali wysokość związaną z częstotliwością residualną dwutónu utworzonego z pozostałych dwóch składowych trójtónu $h_4=800 \text{ Hz}$ i $h_6=1200 \text{ Hz}$. Wysokość

ta odpowiadała brakującej składowej podstawowej tego dwutonu i wynosiła 400 Hz, gdyż poziom środkowej składowej $h_5=1000$ Hz był za niski aby wywołać wrażenie wysokości residualnej odpowiadającej częstotliwości brakującej składowej podstawowej trójtynu $f=200$ Hz.

W obszarze nr 2, w zakresie poziomów h_5 od 20 do 30 dB SPL włącznie, poziom tej składowej był wystarczająco duży, aby słuchacze stopniowo zauważali wpływ tej składowej na percypowaną wysokość trójtynu. W zależności od indywidualnych spostrzeżeń, część słuchaczy nadal percypowała wysokość związaną z wysokością residualną dwutonu o składowych h_4, h_6 (400 Hz), natomiast pozostała część słuchaczy określała już percypowaną wysokość jako odpowiadającą częstotliwości brakującej składowej trójtynu h_4, h_5, h_6 (200 Hz). Obszar ten nazwano obszarem przejściowym (rys. 15).



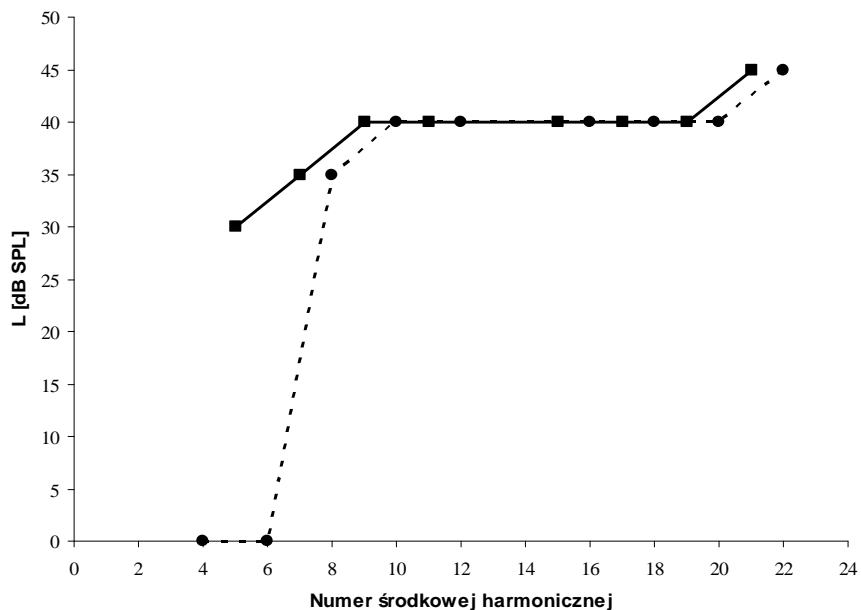
Rys. 15. Rozkład odpowiedzi słuchaczy (wyrażony w %) percypujących określoną wysokość trójtynu, złożonego z harmonicznych h_4, h_5 i h_6 , od poziomu środkowej harmonicznej w obszarze przejściowym. Percypowaną wysokość wyrażono w Hz.

Ze względu na stosunek percypowanej wysokości residualnej dwutonu do wysokości residualnej trójtynu, w tym eksperymencie nie ma możliwości zaobserwowania wpływu błędu oktawowego na próg występowania zjawiska residuum o wysokości odpowiadającej częstotliwości brakującej składowej trójtynu. Zarówno wysokość residualna dwutonu jak i oktawa wysokości residualnej trójtynu określone są poprzez tę samą wartość częstotliwości i z tego powodu nie ma możliwości rozróżnienia tych wrażeń.

W obszarze nr 3, gdy poziom h_5 osiągnął 35 dB SPL, wszyscy słuchacze jednoznacznie percypowali wysokość trójtynu odpowiadającą częstotliwości $f = 200$ Hz. Dalszy wzrost poziomu h_5 nie powodował zmiany percepcji wysokości trójtynu.

Dla pozostałych trójttonów o nieparzystych numerach środkowej harmoniczej, przebieg percepcji wysokości zachodził również w trzech obszarach. Jediną różnicą były wielkości tych obszarów tzn. zakresy poziomów środkowej harmoniczej wchodzące do danego obszaru.

Również dla części trójttonów, o parzystym numerze środkowej harmoniczej, percepcja wysokości przebiegała zgodnie ze schematem przedstawionym na rys. 14. Natomiast część z nich (dla najniższych numerów harmoniczej) wykazywała brak wpływu poziomu środkowej składowej na percypowaną wysokość, co przedstawia rys. 16.



Rys. 16. Zależność poziomu środkowej harmoniczej trójttonu, wymaganego do jednoznacznej percepcji wysokości residualnej o częstotliwości $f = 200 \text{ Hz}$, w funkcji częstotliwości składowych wyrażonej poprzez numer środkowej harmoniczej. Wynik wyznaczony dla co najmniej 75% poprawnych odpowiedzi słuchaczy. Linia ciągła reprezentuje trójttony o nieparzystych numerach środkowej harmoniczej, natomiast linia przerywana reprezentuje trójttony o parzystych numerach środkowej harmoniczej

Rys. 16 wskazuje na zależność progu występowania wysokości residualnej trójttonu od częstotliwości jego składowych wyrażonych poprzez numer środkowej harmoniczej. Dla trójttonów o nieparzystych numerach środkowej harmoniczej, niezależnie od częstotliwości składowych, wymagany jest określony poziom tej harmoniczej (próg występowania zjawiska residuum) do jednoznacznej percepcji wysokości residualnej odpowiadającej częstotliwości brakującej składowej podstawowej tego trójttonu. Natomiast dla trójttonów o parzystym numerze środkowej harmoniczej, dla numeru tej harmoniczej równego 4 i 6 nie jest wymagana jej obecność, do percepcji wysokości residualnej odpowiadającej częstotliwości brakującej składowej podstawowej trójttonu (200 Hz). Bez tej składowej, percypowana wysokość residualna dwutonów złożonych z harmonicznymi h_3 , h_5

oraz h_5 , h_7 odpowiada wysokości residualnej trójttonów złożonych odpowiednio ze składowych h_3 , h_4 , h_5 oraz h_5 , h_6 , h_7 . Dla pozostałych trójttonów, o parzystym numerze środkowej harmoniczej, wymagany już jest określony poziom tej harmoniczej do jednoznacznej percepcji wysokości residualnej odpowiadającej częstotliwości brakującej składowej podstawowej tych trójttonów.

Na podstawie rys. 16 można zauważyć, że dla niskich numerów środkowej harmoniczej (od 3 do 8) próg występowania zjawiska residuum o wysokości odpowiadającej częstotliwości brakującej składowej tych trójttonów jest niższy niż dla pozostałych trójttonów i wzrasta wraz ze wzrostem numeru tej harmoniczej. Dla numerów tej składowej z zakresu 9-20 próg stabilizuje się i wrasta dla najwyższych numerów tej składowej w zakresie 21-22.

Badania przeprowadzono do 22 harmoniczej włącznie, gdyż powyżej tego numeru poziom środkowej harmoniczej wymagany do percepcji wysokości residualnej odpowiadającej częstotliwości brakującej składowej zrównywał się z poziomem pozostałych harmoniczych trójttonu. Jak wiadomo z wcześniejszych badań [14][144][198], takie trójttony (o równych poziomach składowych) powodują jednoznaczną percepcję zjawiska residuum i dalsze badania potwierdziłyby jedynie te wyniki.

W celu weryfikacji postawionej w tej pracy tezy, w tym eksperymencie, zastosowano wnioskowanie statystyczne jak w poprzednich eksperymentach. Do określenia wpływu poziomu środkowej harmoniczej (rys. 14) na percypowaną wysokość trójttonu, zdecydowano się na użycie statystycznej analizy wariancji ANOVA [27][50]. Należy jednak dokonać oceny normalności rozkładu odpowiedzi słuchaczy (percypowanych wysokości) dla danego poziomu środkowej harmoniczej.

Tabela 15. Wynik testu Jarque-Bera sprawdzenia hipotezy o normalność rozkładu odpowiedzi słuchaczy (percypowanych wysokości trójttonu) w zależności od poziomu środkowej harmoniczej, dla trójttonów o nieparzystym numerze tej harmoniczej. Test wykonano w całym zakresie badanych częstotliwości składowych trójttonów dla poziomu istotności 0.05.

	5	7	9	11	15	19	21
0	2.27	1.28	1.66	3.47	2.13	1.50	2.89
5	3.48	0.47	1.68	3.01	2.67	3.09	1.73
10	3.64	1.66	2.80	0.69	3.60	5.56	2.98
15	3.85	1.75	1.76	3.51	2.59	3.33	1.52
20	126.23	0.95	4.38	2.31	2.51	2.93	1.60
25	18.86	171.45	2.07	2.72	1.27	2.21	2.17
30	124.52	14.22	240.93	353.53	125.63	171.43	2.49
35	0.57	171.49	14.22	11.24	13.9	14.81	352.96
40	2.84	3.03	171.47	221.4	126.27	74.43	15.26
45	1.76	2.97	3.36	3.68	2.81	3.27	126.31
50	2.70	2.35	1.55	1.36	2.41	3.35	3.81

Tabela 16. Wynik testu Jarque-Bera sprawdzenia hipotezy o normalność rozkładu odpowiedzi słuchaczy (percypowanych wysokości trójttonu) w zależności od poziomu środkowej harmonicznej, dla trójttonów o parzystym numerze tej harmonicznej. Test wykonano w całym zakresie badanych częstotliwości składowych trójttonów dla poziomu istotności 0.05.

	4	6	8	10	12	16	20	22
0	1.94	1.97	4.37	1.37	1.90	1.76	1.23	1.29
5	-	-	2.76	1.86	2.98	2.42	2.09	5.45
10	-	-	3.77	2.41	2.28	2.51	2.99	4.07
15	-	-	2.57	2.73	2.45	4.39	0.77	1.61
20	-	-	3.57	1.90	2.01	1.88	3.17	2.51
25	-	-	353.50	1.99	1.26	2.39	1.87	2.45
30	-	-	17.59	353.50	171.44	126.28	353.50	1.02
35	-	-	126.31	13.90	13.70	13.9	15.25	240.89
40	-	-	3.62	171.48	74.43	171.49	126.29	14.81
45	-	-	4.39	1.66	1.36	2.63	2.50	171.39
50	-	-	1.75	2.65	3.99	2.1	2.96	1.60

Wiersze tabeli odpowiadają poziomom środkowej harmonicznej trójttonu, a kolumny reprezentują trójttony o określonym numerze tej harmonicznej. Wartości w tabeli reprezentują wartości statystyki χ^2 o wartości krytycznej **5.99**. Dane z pierwszej kolumny tab. 15 odzwierciedlają zachowanie się słuchaczy przedstawione na rys. 14. Łatwo też zauważyć, że dane z obu tabel korespondują się z danymi z rys. 16 i świadczą o istnieniu obszaru przejściowego, w którym określony został próg powstawania zjawiska residuum o wysokości odpowiadającej częstotliwości brakującej składowej podstawowej trójttonu. W tym obszarze wartości testowe są większe od wartości krytycznej, co świadczy o braku normalności rozkładu odpowiedzi słuchaczy. Wynika to faktu, iż w obszarze przejściowym część słuchaczy percypowała nadal wysokość residualną dwutonu, a pozostała część percypowała już wysokość residualną trójttonu. Poza obszarem przejściowym rozkład odpowiedzi zachowuje rozkład normalny. Brak wartości testu dla numerów środkowej harmonicznej 4 i 6 w tab. 16, wynika z faktu, iż słuchacze bez tej harmonicznej percypowali wysokość dwutonu jako równą wysokości residualnej trójttonów (porównaj rys. 16). Dlatego też nie zostały przeprowadzone badania dla wyższych poziomów środkowej składowej o tych numerach.

Ponieważ część odpowiedzi słuchaczy nie zachowuje rozkładu normalnego, nie można użyć testu ANOVA do oceny istotności wpływu poziomu środkowej harmonicznej trójttonu na percypowaną wysokość. W takim przypadku wykorzystano nieparametryczny test Kruskalla-Wallisa, odpowiednik jednoczynnikowej ANOV-y [27][50], który do oceny wpływu danego czynnika na badaną próbę nie wymaga normalności rozkładu pomiarów w próbie i jednorodności ich wariancji.

Tabela 17. Wyniki testu Kruskala-Wallisa sprawdzenia hipotezy o braku wpływu poziomu środkowej harmonicznej trójttonu, o nieparzystym numerze, na percepcję jego wysokości. Test wykonano w całym zakresie badanych częstotliwości składowych trójttonów dla poziomu istotności 0.05.

	5	7	9	11	15	19	21
eksperyment	131.54	134.59	168.55	203.81	185.15	187.54	248.51
wartość krytyczna	18.31	18.31	18.31	18.31	18.31	18.31	18.31

Tabela 18. Wyniki testu Kruskala-Wallisa sprawdzenia hipotezy o braku wpływu poziomu środkowej harmonicznej trójttonu, o parzystym numerze, na percepcję jego wysokości. Test wykonano w całym zakresie badanych częstotliwości składowych trójttonów dla poziomu istotności 0.05.

	4	6	8	10	12	16	20	22
eksperyment	-	-	145.44	153.84	144.25	153.42	159.06	209.97
wartość krytyczna	-	-	18.31	18.31	18.31	18.31	18.31	18.31

Na podstawie wyników testu stwierdzono, że niezależnie od częstotliwości składowych trójttonu hipoteza zerowa została odrzucona (wartość testowa większa od wartości krytycznej), tak więc percypowana wysokość trójttonu zależy od poziomu środkowej harmonicznej. Brak wyników w tab. 18 dla numerów środkowej harmonicznej 4 i 6 wynika z niemożliwości przeprowadzenia testu, gdyż dla tych numerów istnieje tylko jedna wartość poziomu tej harmonicznej (tab. 16).

Dotychczasowe testy stwierdziły zależność percypowanej wysokości trójttonu od poziomu środkowej składowej. Dalsze testy posłużą do jednoznacznego określenia istnienia progu występowania zjawiska residuum o wysokości odpowiadającej częstotliwości brakującej składowej podstawowej trójttonu.

W tym celu przeprowadzono testy, które miały na celu stwierdzenie, czy poziom środkowej składowej wpływa na percepcję wysokości trójttonów osobno w obszarach nr 1 i 3 (rys. 14). Na wstępie sprawdzono jednorodność wariancji percypowanej wysokości trójttonu dla poziomów środkowej harmonicznej, w tych obszarach, za pomocą testu Bartletta [27][50].

Tabela 19. Wyniki testu Bartletta hipotezy o jednorodności wariancji percypowanej wysokości trójttonu w zależności od poziomu środkowej harmonicznej, o nieparzystym numerze, w obszarze nr 1. Test wykonano w całym zakresie badanych częstotliwości składowych trójttonów dla poziomu istotności 0.05.

	5	7	9	11	15	19	21
eksperyment	2.89	0.89	6.13	4.05	2.52	4.56	2.47
wartość krytyczna	7.82	9.48	11.07	11.07	11.07	11.07	12.59

Tabela 20. Wyniki testu Bartletta hipotezy o jednorodności wariancji percypowanej wysokości trójttonu w zależności od poziomu środkowej harmonicznej, o nieparzystym numerze, w obszarze nr 3. Test wykonano w całym zakresie badanych częstotliwości składowych trójttonów dla poziomu istotności 0.05.

	5	7	9	11	15	19	21
eksperyment	1,14	0,40	0,08	2,82	0,21	0,49	-
wartość krytyczna	7.82	5.99	3.84	3.84	3.84	3.84	-

Tabela 21. Wyniki testu Bartletta hipotezy o jednorodności wariancji percypowanej wysokości trójttonu w zależności od poziomu środkowej harmonicznej, o parzystym numerze, w obszarze nr 1. Test wykonano w całym zakresie badanych częstotliwości składowych trójttonów dla poziomu istotności 0.05.

	4	6	8	10	12	16	20	22
eksperyment	-	-	3,24	3,63	6,19	1,70	1,92	2,76
wartość krytyczna	-	-	9.48	11.07	11.07	11.07	12.59	12.59

Tabela 22. Wyniki testu Bartletta hipotezy o jednorodności wariancji percypowanej wysokości trójttonu w zależności od poziomu środkowej harmonicznej, o parzystym numerze, w obszarze nr 3. Test wykonano w całym zakresie badanych częstotliwości składowych trójttonów dla poziomu istotności 0.05.

	4	6	8	10	12	16	20	22
eksperyment	-	-	0,54	0,19	0,06	0,02	0,01	-
wartość krytyczna	-	-	5.99	3.84	3.84	3.84	3.84	-

Wyniki przeprowadzonego testu jednoznacznie stwierdzają słuszność przyjęcia hipotezy zerowej o jednorodność wariancji odpowiedzi słuchaczy, osobno dla obszarów nr 1 i 3, bez względu na poziom środkowej harmonicznej w tych obszarach. Na podstawie przedstawionych wyników można stwierdzić brak różnic w błędzie oceny wysokości trójttonów osobno w obszarach nr 1 i 3 bez względu na poziom środkowej harmonicznej.

BADANIE PROGÓW WYSTĘPOWANIA ZJAWISKA RESIDUUM

Ze względu na tylko jedną wartość poziomu środkowej składowej w obszarze nr 3, dla numerów tej harmonicznej 21 i 22 (tab. 15 i 16) test jednorodności był niemożliwy do przeprowadzenia. Nie ma jednak podstaw twierdzić, że taka jednorodność nie wystąpi, gdyż ocena wysokości dla tych numerów harmonicznej w obszarze nr 3 dokonywana była tą samą metodą i przez te same osoby. Można więc założyć, iż zmiana częstotliwości składowych trójtonu nie wpływa na jednorodność wariancji otrzymanych wyników, co potwierdzają wyniki w obszarach nr 1 (tab. 19 i 21).

Brak wyników dla pozostałych poziomów środkowej harmonicznej o numerze 4 i 6 również nie pozwolił na wykonanie testu jednorodności wariancji.

Wyniki powyższego testu, wraz z wynikami testu z tabeli nr 1 (test na normalność rozkładu), pozwalają na przeprowadzenie weryfikacji hipotezy o braku wpływu poziomu środkowej harmonicznej w obszarach nr 1 i 3 na percypowaną wysokość trójtonu.

Tabela 23. Test ANOVA sprawdzenia hipotezy o braku wpływu poziomu środkowej harmonicznej, o nieparzystym numerze, w obszarze nr 1 na percypowaną wysokość trójtonu. Test wykonano w całym zakresie badanych częstotliwości składowych trójtonów dla poziomu istotności 0.05.

	5	7	9	11	15	19	21
eksperyment	0.31	0.45	0.92	0.26	0.47	0.18	0.52
wartość krytyczna	2.63	2.35	2.23	2.23	2.23	2.23	2.12

Tabela 24. Test ANOVA sprawdzenia hipotezy o braku wpływu poziomu środkowej harmonicznej, o nieparzystym numerze, w obszarze nr 3 na percypowaną wysokość trójtonu. Test wykonano w całym zakresie badanych częstotliwości składowych trójtonów dla poziomu istotności 0.05.

	5	7	9	11	15	19	21
eksperyment	0.82	0.10	0,06	0	0.01	1	-
wartość krytyczna	2.63	3.03	4.90	4.90	4.90	4.90	-

Tabela 25. Test ANOVA sprawdzenia hipotezy o braku wpływu poziomu środkowej harmonicznej, o parzystym numerze, w obszarze nr 1 na percypowaną wysokość trójtonu. Test wykonano w całym zakresie badanych częstotliwości składowych trójtonów dla poziomu istotności 0.05.

	4	6	8	10	12	16	20	22
eksperyment	-	-	0.70	2.02	0.82	0.63	0.97	1.04
wartość krytyczna	-	-	2.39	2.23	2.23	2.23	2.23	2.12

Tabela 26. Test ANOVA sprawdzenia hipotezy o braku wpływu poziomu środkowej harmonicznej, o parzystym numerze, w obszarze nr 3 na percypowaną wysokość trójttonu. Test wykonano w całym zakresie badanych częstotliwości składowych trójttonów dla poziomu istotności 0.05.

	4	6	8	10	12	16	20	22
eksperyment	-	-	2.01	0.38	0,16	1,08	1,03	-
wartość krytyczna	-	-	3.04	4.90	4.90	4.90	4.90	-

Test ANOVA wykazał słuszność przyjęcia hipotezy zerowej, co implikuje brak wpływu poziomu środkowej harmonicznej na percypowaną wysokość trójttonu, osobno w obszarach nr 1 i 3, niezależnie od częstotliwości jego składowych. Z tych samych względów, co dla testu jednorodności wariancji, nie można było wykonać testu ANOVA dla numerów środkowej harmonicznej 4 i 6 w tab. 25 i 26, oraz dla numerów 21 i 22 w obszarze nr 3 odpowiednio w tab. 24 i 26. Z tych samych względów, co dla testu jednorodności wariancji można również założyć, iż dla numerów środkowej harmonicznej 21 i 22 w obszarze nr 3, poziom tej harmonicznej nie wpływa na percypowaną wysokość trójttonów.

Dotychczasowe testy statystyczne stwierdzają, iż poziomy środkowej harmonicznej, osobno dla wartości z obszarów nr 1 i 3, nie wpływają na percepcję wysokości trójttonu i dokładność jej oceny. Daje to podstawę to twierdzenia, iż w każdym z obszarów nr 1 i 3, słuchacze jednoznacznie percypowali określoną wysokość. W celu potwierdzenia, iż percypowane wysokości trójttonu w tych obszarach różnią się od siebie (rys. 14) zastosowano test Kruskala-Wallisa, który nie wymaga sprawdzenia jednorodności wariancji odpowiedzi słuchaczy pomiędzy tymi obszarami dla badanych poziomów środkowej harmonicznej. Ponieważ w tym wypadku sprawdzana jest hipoteza o równości percypowanych wysokości, jednakowa dokładność ich oszacowania nie jest konieczna.

Tabela 27. Test Kruskala-Wallisa sprawdzenia hipotezy o braku różnicy percypowanych wysokości trójttonu, o nieparzystym numerze środkowej harmonicznej, w obszarach nr 1 i 3. Test wykonano w całym zakresie badanych częstotliwości składowych trójttonów dla poziomu istotności 0.05.

	5	7	9	11	15	19	21
eksperyment	121.65	121.85	122.87	121.46	121.92	121.29	121.65
wartość krytyczna	3.84	3.84	3.84	3.84	3.84	3.84	3.84

Tabela 28. Test Kruskala-Wallisa sprawdzenia hipotezy o braku różnicy percypowanych wysokości trójttonu, o parzystym numerze środkowej harmonicznej, w obszarach nr 1 i 3. Test wykonano w całym zakresie badanych częstotliwości składowych trójttonów dla poziomu istotności 0.05.

	4	6	8	10	12	16	20	22
eksperyment	-	-	121.83	121.76	122.02	121.85	121.54	121.76
wartość krytyczna	-	-	3.84	3.84	3.84	3.84	3.84	3.84

Powyższe testy nie potwierdzają słuszności stawianej hipotezy, co jest jednoznaczne ze stwierdzeniem, iż percypowane wysokości w tych obszarach różnią się na zadanym poziomie istotności testu.

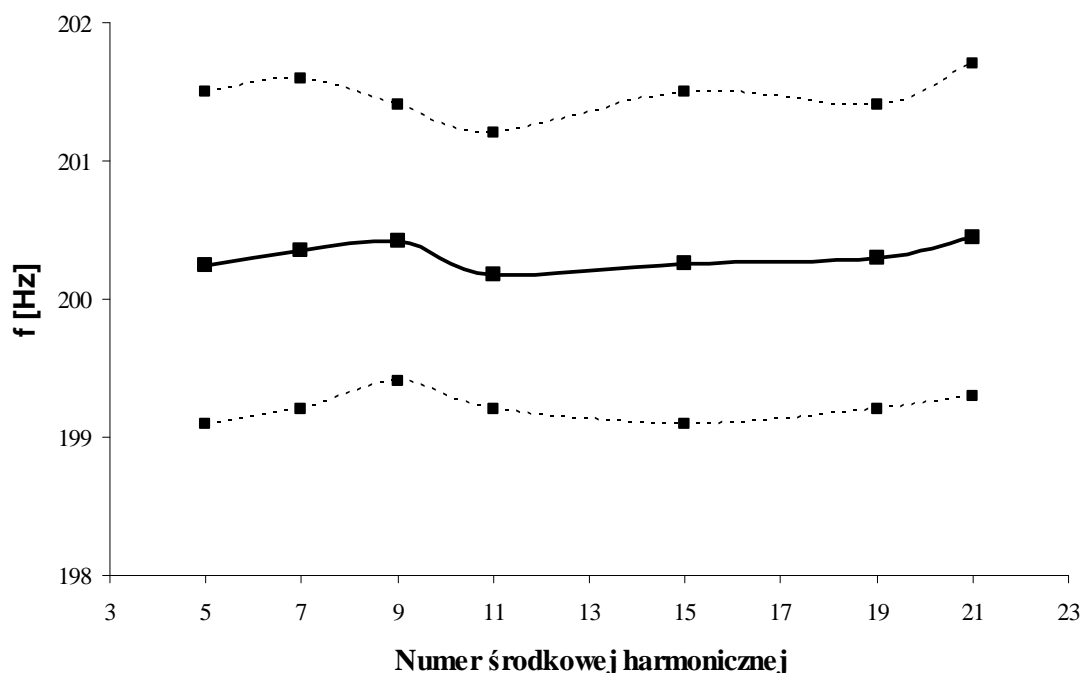
Przeprowadzone testy statystyczne w połączeniu z wynikami eksperymentu dają dowód na istnienie progów występowania zjawiska residuum (w sensie definicji 2 z rozdziału 2) w trójttonach harmonicznych o wysokości residualnej odpowiadającej częstotliwości brakującej składowej tych trójttonów i wskazują na istnienie progów w obszarze przejściowym poziomów środkowej harmonicznej ponieważ:

- Istnieje zależność pomiędzy percypowaną wysokością trójttonu, a poziomem środkowej harmonicznej (tab. 17 i 18), którą cechują trzy obszary zmienności
- W każdym z obszarów nr 1 i 3 z osobna, percypowana jest różna wysokość trójttonu niezależnie od poziomu środkowej harmonicznej w tych obszarach (tab. 27 i 28, rys. 14)
- W obszarze przejściowym wysokość trójttonu zależy od poziomu środkowej harmonicznej i istnieje taka jego wartość, dla której następuje zmiana wrażenia wysokości (rys. 15)

Za pomocą wnioskowania statystycznego stwierdzono również zależność progów występowania zjawiska residuum o wysokości residualnej odpowiadającej częstotliwości brakującej składowej trójttonu od częstotliwości składowych go tworzących (rys. 16). Ponieważ progowe wartości wyznaczone są w obszarach przejściowych, dla których nie jest zachowany rozkład normalny odpowiedzi słuchaczy, zastosowano nieparametryczny test Kruskala-Wallisa w celu weryfikacji hipotezy zerowej o braku wpływu częstotliwości składowych trójttonu na próg występowania zjawiska residuum. Wartość statystyki testowej na poziomie istotności 0.05 wyniosła $\chi^2(6)=116.06$ przy krytycznej wartości statystyki 12.59 dla nieparzystych numerów środkowej harmonicznej. Wartość statystyki testowej

na poziomie istotności 0.05, dla parzystych numerów środkowej harmonicznej, wyniosła $\chi^2(7)=142.72$ przy krytycznej wartości statystyki 14.07. Na podstawie tego testu hipotezę zerową odrzucono.

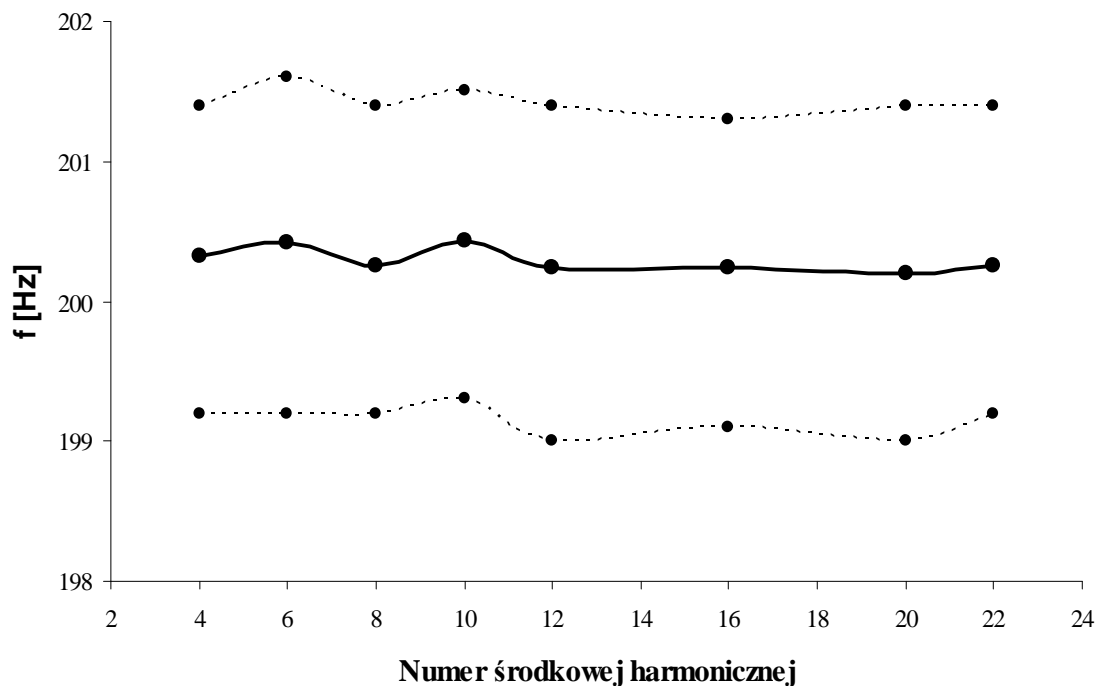
Wyniki przeprowadzonego eksperymentu potwierdzają również fakt braku wpływu częstotliwości składowych trójtonów harmoniczných na percypowaną wysokość residualną dla wartości poziomów środkowej harmonicznej powyżej progu jej występowania, co prezentują poniższe wykresy:



Rys. 17. Zależność percypowanej wysokości trójtonu, wyrażonej w Hz, w funkcji częstotliwości jego składowych wyrażony poprzez numer środkowej harmonicznej, o nieparzystych jej numerach, dla poziomów tej harmonicznej powyżej progu występowania zjawiska residuum. Wynik uśredniono dla wszystkich słuchaczy. Linia ciągła przedstawia średnią percypowaną wysokość, natomiast linie przerywane określają odchylenie standardowe reprezentujące siłę wrażenia residuum.

Dane z rys. 17 i 18 pokazują, iż percypowana wysokość trójtonu dla poziomu środkowej harmonicznej powyżej progu (obszar nr 3) występowania zjawiska residuum, odpowiada częstotliwości brakującej składowej podstawowej trójtonu i nie zależy od częstotliwości jego składowych. Wartość odchylenia standardowego ($\Delta f < 2$ Hz) reprezentująca siłę wrażenia wysokości residualnej świadczy o jednoznacznej jej percepcji przez słuchaczy. Hipotezę zerową o braku wpływu częstotliwości składowych trójtonu na percypowaną wysokość residualną zbadano testem ANOVA. Wcześniej jednak sprawdzono jednorodność wariancji odpowiedzi słuchaczy testem Bartletta na poziomie istotności 0.05 i przyjęto hipotezę zerową, o braku różnic pomiędzy wariancjami

dla statystyki testowej $\chi^2(6)=3.17$ przy wartości krytycznej 12.59 dla nieparzystych numerów środkowej harmonicznej. Na poziomie istotności 0.05 test ANOVA wykazał słusność hipotezy zerowej dla statystyki testowej $F(6,553)=0.67$ przy wartości krytycznej 2.12 dla tych numerów środkowej harmonicznej.



Rys. 18. Zależność percypowanej wysokości trójttonu wyrażonej w Hz w funkcji częstotliwości jego składowych wyrażony poprzez numer środkowej harmonicznej, o parzystych jej numerach, dla poziomów tej harmonicznej powyżej progu występowania zjawiska residuum. Wynik uśredniono dla wszystkich słuchaczy. Linia ciągła przedstawia średnią percypowaną wysokość, natomiast linie przerywane określają odchylenie standardowe reprezentujące siłę wrażenia residuum.

Te same testy wykonano dla trójttonów o parzystym numerze środkowej harmonicznej. Test Bartletta na poziomie istotności 0.05 wykazał słusność hipotezy zerowej o braku różnic pomiędzy wariancjami dla statystyki testowej $\chi^2(7) = 1.84$ przy wartości krytycznej 14.07. Test ANOVA wykazał słusność hipotezy zerowej o braku różnic w percypowanej wysokości residualnej trójttonów bez względu na częstotliwość ich składowych. Na poziomie istotności 0.05 statystyka testowa $F(7,632)=0.59$ przy krytycznej wartości 2.03.

7.5 DYSKUSJA

Wykonane eksperymenty i testy statystyczne jednoznacznie stwierdzają istnienie progu występowania zjawiska residuum w trójttonach harmonicznym o wysokości residualnej odpowiadającej częstotliwości brakującej składowej tych trójttonów ($f=200$ Hz). Interpretacja

występowania progu przy pomocy istniejących modeli percepcji zjawiska residuum jest podobna do tej przedstawionej w poprzednich eksperymentach. Biorąc pod uwagę model analizy pobudzenia, próg występowania zjawiska residuum o określonej wysokości residualnej w trójttonach, można tłumaczyć jako taki poziom środkowej harmonicznej, dla którego ta składowa jest percypowana na tyle wyraźnie, aby stać się istotnym składnikiem pobudzenia i wywołać wrażenie wysokości residualnej odpowiadające częstotliwości brakującej składowej podstawowej tego trójttonu [106][110]. Biorąc pod uwagę model struktury czasowej próg powstawania tego zjawiska jest to taki poziom środkowej składowej pobudzenia, dla którego drgania błony podstawnej wywołują akcję neuronową powodującą powstanie wrażenia wysokości residualnej o częstotliwości brakującej składowej podstawowej trójttonu [106][110]. W oparciu o modele korelacyjne natomiast, próg powstawania zjawiska residuum, określony w tym rozdziale, można tłumaczyć jako taki poziom środkowej harmonicznej trójttonu, dla którego w przebiegu sumarycznej funkcji autokorelacji, reprezentującej strukturę czasową wyładowań neuronowych, pojawia się maksimum odpowiedzialne za percepcję wysokości residualnej odpowiadającej częstotliwości brakującej składowej trójttonu. [106][110]

Analizując zachowanie się progu występowania zjawiska residuum z rys. 16 można zauważyć, że dla trójttonów o nieparzystej środkowej składowej w całym zakresie częstotliwości, słuchacze potrzebują określonego poziomu tej składowej do percepcji wysokości residualnej odpowiedzialnej częstotliwości brakującej składowej podstawowej trójttonu (200 Hz). Dzieje się tak gdyż bez środkowej harmonicznej, pobudzenia są dwutonami, których składowe są kolejnymi harmonicznymi składowej podstawowej 400 Hz. Aby zmienić wrażenie wysokości na takie, które odpowiada częstotliwości brakującej składowej podstawowej trójttonów potrzebna jest dodatkowa składowa, środkowa harmoniczna, o określonym poziomie.

Z rys. 16 wynika, iż niższe wartości progu występują dla numerów tej harmonicznej z zakresu od 5 do 9. Najniższa wartość progu koresponduje z rejonem dominującym zjawiska residuum (od 3. do 6. harmonicznej). Wraz z oddalaniem się od tego rejonu wartość progu wzrasta, co spowodowane jest zmieniającą się barwą składowej residualnej. Wraz ze wzrostem numeru środkowej harmonicznej, w zakresie od 5 do 9, wzrastająca chropowatość barwy składowej residualnej wymusza u słuchaczy zwiększenie poziomu tej składowej w celu jednoznacznej percepcji wysokości odpowiadającej częstotliwości brakującej składowej podstawowej trójttonu.

Dla trójttonów o parzystych numerach środkowej harmonicznej, próg zachowuje się nieco inaczej. Dla najniższych numerów środkowej harmonicznej (4 i 6) słuchacze nie potrzebują jej udziału do percepcji wysokości residualnej odpowiadającej częstotliwości brakującej składowej podstawowej trójttonów [106]. W tym zakresie, zgodnie z modelem analizy pobudzenia, percepcja wysokości opiera się na analizie składowych pobudzenia i określeniu wspólnej podharmonicznej dla tych składowych. Dla tych numerów otrzymujemy dwutony, (600 i 1000 Hz oraz 1000 i 1400 Hz), których składowe mają największy wspólny dzielnik równy 200 Hz, który odpowiada zarówno wysokości residualnej tych dwutonów, jak i wysokości residualnej trójttonów (600, 800, 1000 Hz oraz 1000, 1200, 1400 Hz).

W zakresie numerów środkowej harmonicznej od 8 do 22, składowe trójttonu nie są rozróżniane jako osobne składowe. W takim przypadku percepcja wysokości, zgodnie z modelem struktury czasowej, opiera się na periodyczności wyładowań impulsów neuronowych, które są powodowane przez periodyczność obwiedni czasowej pobudzenia. W tym zakresie, periodyczność obwiedni czasowej pobudzenia, bez względu na nieparzystość czy parzystość środkowej składowej, wywołuje wrażenie percypowanej wysokości odpowiadające częstotliwości 400 Hz. Dlatego też dla trójttonów o parzystym numerze środkowej harmonicznej, w tym zakresie, słuchacze potrzebują określonego poziomu tej harmonicznej do zmiany wrażenia percypowanej wysokości na takie, które odpowiadałoby wysokości residualnej związanej z częstotliwością brakującej składowej podstawowej trójttonu (200 Hz).

Stałość progu w zakresie od 9 do 20 harmonicznej można tłumaczyć brakiem znaczącej zmiany barwy składowej residualnej, która nie wymusza u słuchaczy wzrostu poziomu środkowej harmonicznej do jednoznacznej percepcji wysokości residualnej [110].

Próg wzrasta dla najwyższych numerów środkowej harmonicznej (21 i 22), ponieważ dla tych numerów zjawisko residuum staje się niejednoznaczne ze względu na stopniowy zanik synchroniczności fazowej wyładowań neuronowych [123][149]. W celu minimalizacji wpływu tego efektu, słuchacze potrzebowali większego poziomu środkowej harmonicznej do jednoznacznej percepcji zjawiska residuum.

Z rys. 17 i 18 wynika, iż percypowana wysokość residualna trójttonu nie zależy od częstotliwości jego składowych jeśli tylko zostanie przekroczony próg występowania tej wysokości (obszar nr 3 na rys. 14). Potwierdza to wyniki otrzymane przez innych autorów [14][144][198], którzy stosowali pobudzenia zapewniające przekroczenie progu występowania zjawiska residuum.

7.6 PODSUMOWANIE

Wyniki powyższego eksperymentu dowodzą:

- Istnienia progu powstawania zjawiska residuum (w sensie definicji 2 z rozdziału 2) o określonej wysokości residualnej w trójtonach harmonicznym (z wyjątkiem trójtonów o parzystych numerach środkowej harmoniczej dla najniższych jej numerów 4 i 6, dla których wynosi on zero)
- Zależności progu powstawania zjawiska residuum od częstotliwości składowych trójtonu, a ściślej od numeru składowych

8. WYZNACZENIE PROGU WYSTĘPOWANIA ZJAWISKA RESIDUUM DLA TRÓJTONÓW NIEHARMONICZNYCH O WYSOKOŚCI RESIDUALNEJ ODPOWIADAJĄCEJ CZĘSTOTLIWOŚCI BRAKUJĄCEJ SKŁADOWEJ PODSTAWOWEJ TYCH TRÓJTONÓW

CEL

SPRAWDZENIE WPLYWU TONU RÓŻNICOWEGO NA PERCEPCJĘ ZJAWISKA RESIDUUM W TRÓJTONACH

8.1 BODZIEC WZORCOWY

W eksperymencie słuchacze określali wysokość trójtonów, których składowe były sąsiadującymi harmonicznymi brakującej składowej podstawowej 200 Hz przesuniętymi w górę w dziedzinie częstotliwości o $\Delta f = 30$ Hz. W każdym trójtonie poziom najniższej i najwyższej składowej był stały i wynosił $L_n = L_{n+2} = 50$ dB SPL, natomiast poziom środkowej składowej L_{n+1} był zmieniany w zakresie od 0 do 50 dB SPL z krokiem 5 dB, w celu wyznaczenia progu występowania zjawiska residuum o częstotliwości odpowiadającej składowej podstawowej trójtonu $f = 200$ Hz.

8.2 EKIPA ODSŁUCHOWA

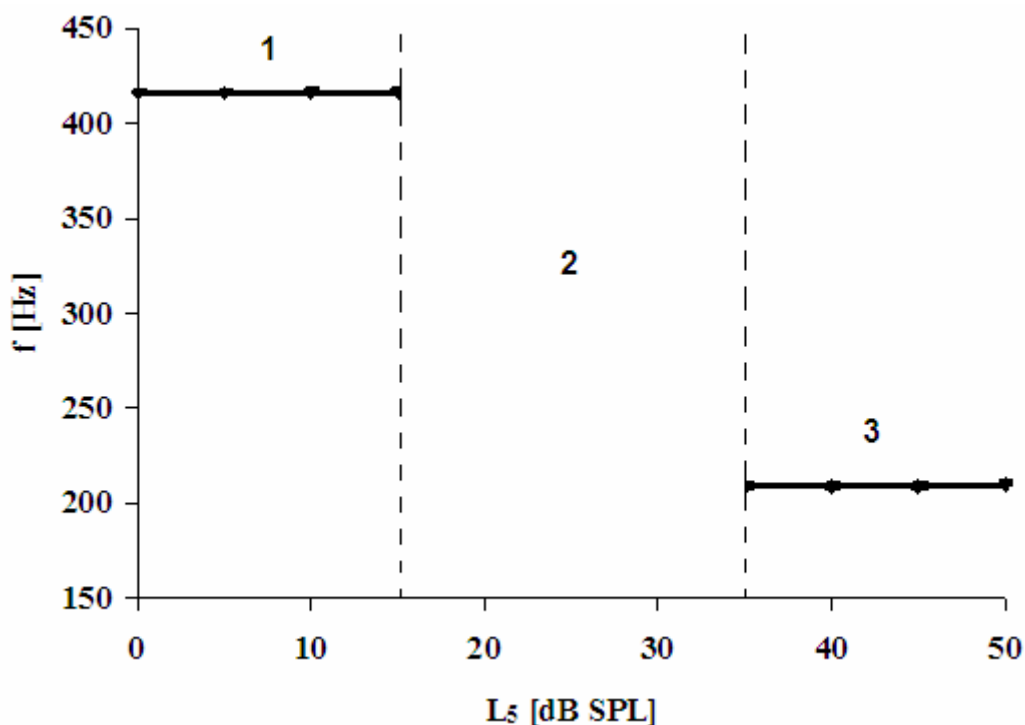
W eksperymencie brały udział te same osoby co w poprzednich eksperymentach.

8.3 PROCEDURA POMIAROWA

W eksperymencie zastosowano tę samą metodę pomiarową jak w eksperymencie nr 3. Również w tym eksperymencie dane dotyczące trójtonów o nieparzystych i parzystych numerach środkowej składowej zostaną przedstawione osobno, ze względu na czytelność prezentowanych wyników.

8.4 WYNIKI

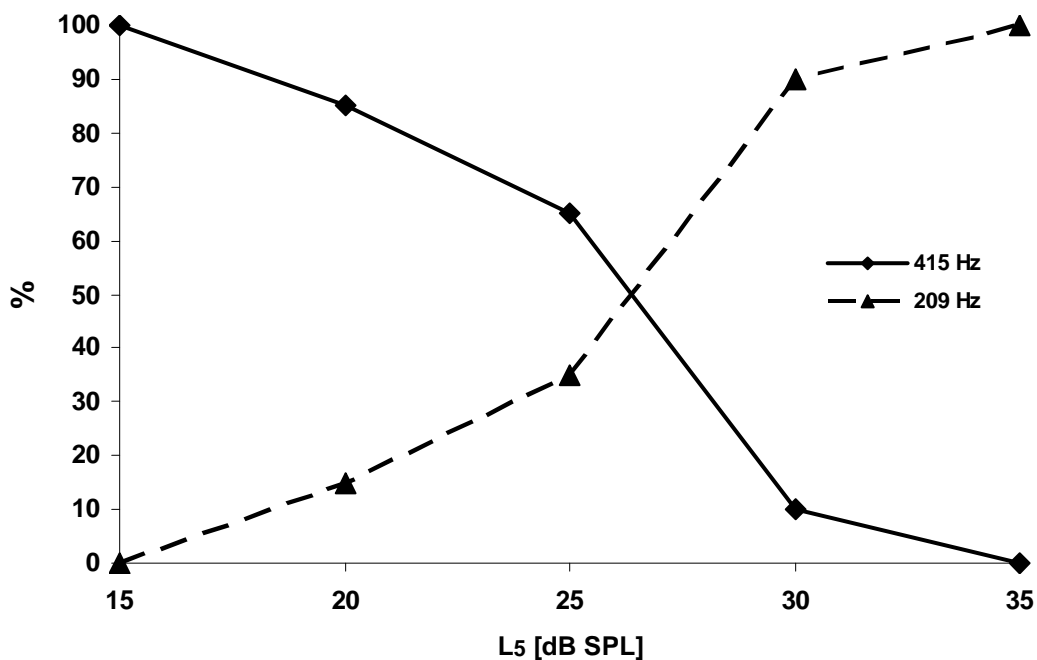
Wyniki eksperymentu pozwoliły na wyznaczenie progu występowania zjawiska residuum o wysokości residualnej odpowiadającej częstotliwości brakującej składowej podstawowej w trójttonach nieharmonicznych. Dane z wykresu nr 19 przedstawiają zależność percypowanej wysokości trójttonu, o nieparzystym numerze środkowej składowej złożonego ze składowych o częstotliwościach $s_4=830 \text{ Hz}$, $s_5=1030 \text{ Hz}$ i $s_6=1230 \text{ Hz}$, od poziomu środkowej składowej:



Rys. 19. Zależność percypowanej wysokości trójttonu, złożonego ze składowych s_4 , s_5 i s_6 , od poziomu środkowej składowej. Percypowaną wysokość wyrażono w Hz.

Rys. 19 wskazuje na zależność percypowanej wysokości trójttonów, o nieparzystym numerze środkowej składowej, od poziomu tej składowej. Obszar nr 1 odpowiada zakresom poziomów środkowej składowej od 0 do 15 dB SPL włącznie. W tym obszarze słuchacze percypowali wysokość związaną z częstotliwością residualną dwutonu utworzonego z pozostałych dwóch składowych trójttonu $s_4=830 \text{ Hz}$ i $s_6=1230 \text{ Hz}$. Wysokość ta odpowiadała brakującej składowej podstawowej tego dwutonu i wynosiła 415 Hz, gdyż poziom środkowej składowej $s_5=1030 \text{ Hz}$ był za niski, aby wywołać wrażenie wysokości residualnej odpowiadającej częstotliwości brakującej składowej podstawowej trójttonu 209 Hz.

W obszarze nr 2, w zakresie poziomów s_5 od 20 do 30 dB SPL włącznie, poziom tej składowej był wystarczająco duży, aby słuchacze stopniowo zauważali wpływ tej składowej na percypowaną wysokość trójtynu. W zależności od indywidualnych spostrzeżeń, część słuchaczy nadal percypowała wysokość związaną z wysokością residualną dwutonu o składowych s_4 i s_6 (415 Hz), natomiast pozostała część słuchaczy określała już percypowaną wysokość jako odpowiadającą częstotliwości brakującej składowej trójtynu (209 Hz). Obszar ten nazwano obszarem przejściowym.



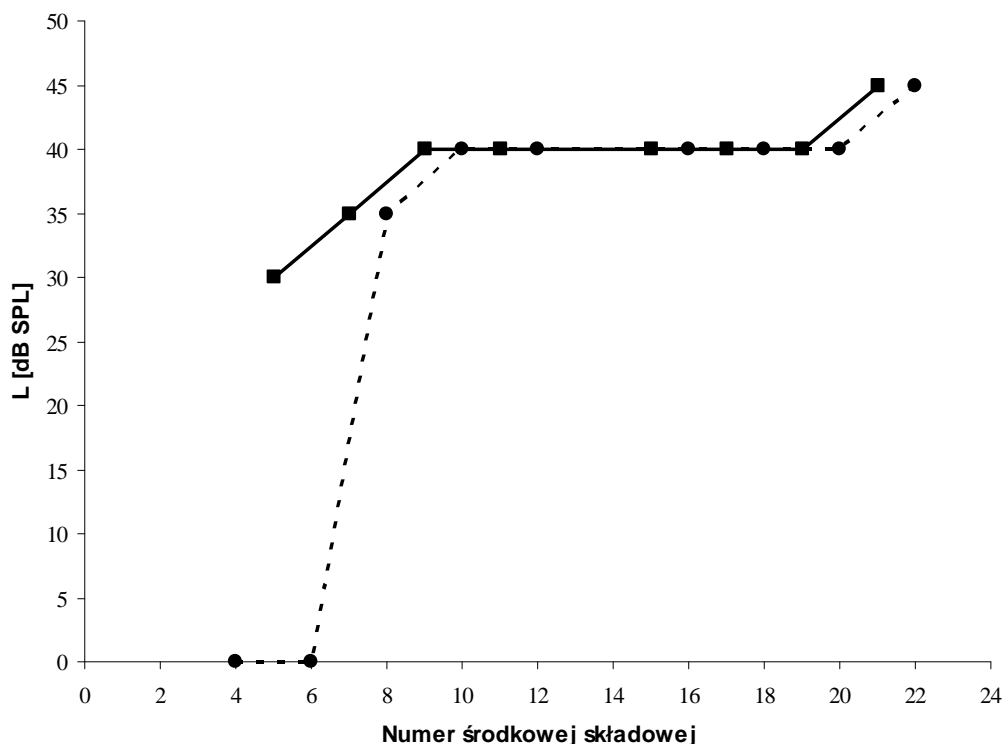
Rys. 20. Rozkład odpowiedzi słuchaczy (wyrażony w %) percypujących określoną wysokość trójtynu, złożonego ze składowych s_4 , s_5 i s_6 , od poziomu środkowej składowej w obszarze przejściowym. Percypowaną wysokość wyrażono w Hz.

W obszarze nr 3, gdy poziom s_5 osiągnął 35 dB SPL, wszyscy słuchacze jednoznacznie percypowali wysokość trójtynu odpowiadającą częstotliwości $f = 209$ Hz. Dalszy wzrost poziomu s_5 nie powodował zmiany percepcji wysokości trójtynu.

Należy zwrócić uwagę, że dla tego trójtynu, percypowana wysokość residualna (209 Hz) jest przesunięta w stosunku do wysokości residualnej trójtynu harmonicznego (200 Hz). Jest to wynikiem występowania I efektu przesunięcia wysokości na skutek przesunięcia częstotliwości składowych trójtynu (podrozdział 1.3.5.5).

Dla pozostałych trójtynów, o nieparzystych numerach środkowej składowej, przebieg percepcji wysokości zachodził również w trzech obszarach. Jedyną różnicą były wielkości tych obszarów tzn. zakresy poziomów środkowej składowej wchodzące do danego obszaru.

Również dla części trójtónów, o parzystym numerze środkowej składowej, percepcja wysokości przebiegała zgodnie ze schematem przedstawionym na rys. 19. Natomiast część z nich (dla najmniejszych numerów składowych) wykazywała brak wpływu poziomu środkowej składowej na percypowaną wysokość, co przedstawia rys. 21.



Rys. 21. Zależność poziomu środkowej składowej, wymaganego do jednoznacznej percepcji wysokości residualnej odpowiadającej częstotliwości brakującej składowej podstawowej trójtónu, w funkcji częstotliwości składowych wyrażonej poprzez numer tej składowej. Wynik wyznaczony dla co najmniej 75% poprawnych odpowiedzi słuchaczy. Linia ciągła reprezentuje trójtóny o nieparzystych numerach środkowej składowej, natomiast linia przerywana reprezentuje trójtóny o parzystych numerach środkowej składowej

Rys. 21 wskazuje na zależność progu występowania wysokości residualnej trójtónu od częstotliwości jego składowych wyrażonych poprzez numer środkowej składowej. Porównując tę zależność z rys. 16 można stwierdzić, iż przesunięcie częstotliwości składowych trójtónu nie powoduje zmian w przebiegu progu. Interpretacja tego przebiegu jest identyczna z tą, zawartą w rozdziale 7.4 dla trójtónów harmoniczných.

W celu weryfikacji postawionej w tej pracy tezy, w tym eksperymencie, zastosowano wnioskowanie statystyczne jak w poprzednich eksperymentach.

Wpływ poziomu środkowej składowej na percypowaną wysokość trójtónu (rys. 19), zbadano przy użyciu statystycznej analizy wariancji ANOVA [27][50]. Należy jednak dokonać oceny normalności rozkładu odpowiedzi słuchaczy (percypowanych wysokości) dla danego poziomu środkowej składowej, w celu użycia testu ANOVA.

Tabela 29. Wynik testu Jarque-Bera sprawdzenia hipotezy o normalność rozkładu odpowiedzi słuchaczy (percypowanych wysokości trójttonu) w zależności od poziomu środkowej składowej dla trójttonów o nieparzystym numerze tej składowej. Test wykonano w całym zakresie badanych częstotliwości składowych trójttonów dla poziomu istotności 0.05.

	5	7	9	11	15	19	21
0	2.55	2.82	0.71	2.80	1.84	1.00	2.84
5	3.85	0.76	2.91	1.40	0.23	4.69	1.81
10	0.55	2.80	0.22	1.27	0.99	0.59	2.20
15	1.76	0.28	0.39	1.47	0.41	3.23	1.90
20	241.02	0.30	1.40	1.13	0.19	1.47	1.34
25	22.60	171.52	0.20	0.38	0.71	1.55	1.41
30	126.38	14.21	353.71	241.34	126.33	353.65	2.19
35	0.24	126.31	14.03	14.46	13.90	14.22	171.04
40	1.30	0.95	126.41	126.34	171.50	126.32	14.03
45	2.39	1.33	2.16	1.26	2.95	1.42	241.05
50	0.73	1.90	1.04	1.04	1.99	3.04	0.32

Tabela 30. Wynik testu Jarque-Bera sprawdzenia hipotezy o normalność rozkładu odpowiedzi słuchaczy (percypowanych wysokości trójttonu) w zależności od poziomu środkowej składowej dla trójttonów o parzystym numerze tej składowej. Test wykonano w całym zakresie badanych częstotliwości składowych trójttonów dla poziomu istotności 0.05.

	4	6	8	10	12	16	20	22
0	1.03	1.00	1.76	1.11	0.86	0.57	0.85	0.69
5	-	-	3.46	4.44	3.02	0.67	3.35	2.71
10	-	-	0.81	2.92	0.50	3.03	1.95	2.15
15	-	-	2.37	1.27	1.87	1.71	0.83	1.62
20	-	-	0.33	0.85	1.35	1.74	1.46	3.94
25	-	-	171.02	2.02	1.70	0.30	1.52	1.39
30	-	-	15.84	353.31	171.36	240.77	126.24	1.09
35	-	-	171.48	15.84	14.22	14.47	17.59	353.52
40	-	-	3.51	126.30	241.01	171.47	241.03	13.65
45	-	-	0.56	1.84	0.28	0.87	1.28	353.66
50	-	-	1.19	1.72	2.02	1.86	1.55	1.93

Wiersze tabeli odpowiadają poziomom środkowej składowej trójttonu, a kolumny reprezentują trójttony o określonym numerze tej składowej. Wartości w tabeli reprezentują wartości statystyki χ^2 o wartości krytycznej **5.99**. Dane z pierwszej kolumny tab. 29 odzwierciedlają zachowanie się słuchaczy przedstawione na rys. 16. Łatwo też zauważyć, że dane z obu tabel korespondują z danymi z rys. 21 i świadczą o istnieniu obszaru przejściowego, w którym określono próg powstawania zjawiska residuum o wysokości odpowiadającej częstotliwości brakującej składowej podstawowej trójttonu. W tym obszarze wartości testowe są większe od wartości krytycznej, co świadczy o braku normalności rozkładu odpowiedzi słuchaczy. Wynika to z faktu, iż w obszarze przejściowym część

BADANIE PROGÓW WYSTĘPOWANIA ZJAWISKA RESIDUUM

sluchaczy percypowała nadal wysokość residualną dwutonu, a pozostała część percypowała już wysokość residualną trójtonu. Poza obszarem przejściowym rozkład odpowiedzi zachowuje rozkład normalny. Brak wartości testu dla numerów środkowej składowej 4 i 6 w tabeli nr 30, wynika z faktu, iż słuchacze bez tej składowej percypowali wysokość dwutonu jako równą wysokości residualnej trójtonów (porównaj rys. 21). Dalszy wzrost poziomu tej składowej nie zmieniał wrażenia wysokości.

Ze względu na brak normalności rozkładu w całym zakresie poziomów środkowej składowej, wykorzystano nieparametryczny test Kruskala-Wallisa w celu zweryfikowania hipotezy o braku zależności pomiędzy percypowaną wysokością trójtonu, a poziomem tej składowej.

Tabela 31. Wyniki testu Kruskala-Wallisa sprawdzenia hipotezy o braku wpływu poziomu środkowej składowej trójtonu, o nieparzystym numerze, na percepcję jego wysokości. Test wykonano w całym zakresie badanych częstotliwości składowych trójtonów dla poziomu istotności 0.05.

	5	7	9	11	15	19	21
eksperyment	79.99	107.92	126.99	183.75	89.47	78.18	144.33
wartość krytyczna	18.31	18.31	18.31	18.31	18.31	18.31	18.31

Tabela 32. Wyniki testu Kruskala-Wallisa sprawdzenia hipotezy o braku wpływu poziomu środkowej składowej trójtonu, o parzystym numerze, na percepcję jego wysokości. Test wykonano w całym zakresie badanych częstotliwości składowych trójtonów dla poziomu istotności 0.05.

	4	6	8	10	12	16	20	22
eksperyment	-	-	105.20	124.08	127.82	135.51	126.64	-
wartość krytyczna	-	-	43.77	43.77	43.77	43.77	43.77	-

Wyniki testów świadczą o braku podstaw do przyjęcia hipotezy zerowej (wartość testowa większa od wartości krytycznej), tak więc percypowana wysokość trójtonu zależy od poziomu środkowej składowej. Brak wyników w tab. 32 dla numerów środkowej składowej 4 i 6 wynika z niemożliwości przeprowadzenia testu, gdyż dla tych numerów istnieje tylko jedna wartość poziomu tej składowej (tab. 30).

Dotychczasowe testy stwierdzają zależność percypowanej wysokości trójtonu od poziomu środkowej składowej. Dalsze testy posłużą do jednoznacznego stwierdzenia

BADANIE PROGÓW WYSTĘPOWANIA ZJAWISKA RESIDUUM

istnienia progów występowania zjawiska residuum o wysokości odpowiadającej częstotliwości brakującej składowej podstawowej trójttonu.

W tym celu sprawdzono, czy poziom środkowej składowej wpływa na percepcję wysokości trójttonów osobno w obszarach nr 1 i 3 (rys. 19). Na wstępie sprawdzono jednorodność wariancji percypowanej wysokości trójttonu dla poziomów środkowej składowej, w tych obszarach, za pomocą testu Bartletta [27][50].

Tabela 33. Wyniki testu Bartletta hipotezy o jednorodności wariancji percypowanej wysokości trójttonu w zależności od poziomu środkowej składowej o nieparzystym numerze w obszarze nr 1. Test wykonano w całym zakresie badanych częstotliwości składowych trójttonów dla poziomu istotności 0.05.

	5	7	9	11	15	19	21
eksperyment	2,77	0,80	10,17	3,05	3,34	3,91	2,48
wartość krytyczna	7.82	9.48	11.07	11.07	11.07	11.07	12.59

Tabela 34. Wyniki testu Bartletta hipotezy o jednorodności wariancji percypowanej wysokości trójttonu w zależności od poziomu środkowej składowej o nieparzystym numerze, w obszarze nr 3. Test wykonano w całym zakresie badanych częstotliwości składowych trójttonów dla poziomu istotności 0.05.

	5	7	9	11	15	19	21
eksperyment	2,69	1,34	1,06	0,29	1,25	0,83	-
wartość krytyczna	7.82	5.99	3.84	3.84	3.84	3.84	-

Tabela 35. Wyniki testu Bartletta hipotezy o jednorodności wariancji percypowanej wysokości trójttonu w zależności od poziomu środkowej składowej o parzystym numerze, w obszarze nr 1. Test wykonano w całym zakresie badanych częstotliwości składowych trójttonów dla poziomu istotności 0.05.

	4	6	8	10	12	16	20	22
eksperyment	-	-	0,68	8,65	3,62	3,85	6,83	4,64
wartość krytyczna	-	-	9.48	11.07	11.07	11.07	12.59	12.59

BADANIE PROGÓW WYSTĘPOWANIA ZJAWISKA RESIDUUM

Tabela 36. Wyniki testu Bartletta hipotezy o jednorodności wariancji percypowanej wysokości trójttonu w zależności od poziomu środkowej składowej o parzystym numerze, w obszarze nr 3. Test wykonano w całym zakresie badanych częstotliwości składowych trójttonów dla poziomu istotności 0.05.

	4	6	8	10	12	16	20	22
eksperyment	-	-	2,30	0,10	0,01	1,78	0,21	-
wartość krytyczna	-	-	5.99	3.84	3.84	3.84	3.84	-

Wyniki przeprowadzonego testu jednoznacznie stwierdzają słuszność przyjęcia hipotezy zerowej o jednorodność wariancji odpowiedzi słuchaczy, osobno dla obszarów nr 1 i 3, bez względu na poziom środkowej składowej w tych obszarach. Na podstawie przedstawionych wyników można stwierdzić brak różnic w błędzie oceny wysokości trójttonów, osobno w obszarach nr 1 i 3 bez względu na poziom środkowej składowej. Ze względu na tylko jedną wartość poziomu środkowej składowej w obszarze nr 3, dla numerów tej składowej 21 i 22 (tab. 29 i 30), test jednorodności był niemożliwy do przeprowadzenia. Nie ma jednak podstaw twierdzić, że taka jednorodność nie wystąpi, gdyż ocena wysokości dla tych numerów składowej w obszarze nr 3 dokonywana była tą samą metodą i przez te same osoby. Można więc założyć, iż zamiana częstotliwości składowych trójttonu nie wpływa na jednorodność wariancji otrzymanych wyników, co potwierdzają wyniki w obszarach nr 1 (tab. 33 i 35).

Brak wyników dla pozostałych poziomów środkowej składowej o numerach 4 i 6 również nie pozwolił na wykonanie testu jednorodności wariancji.

Wyniki powyższego testu, wraz z wynikami testu z tab. 29 i 30 (test na normalność rozkładu), pozwalają na przeprowadzenie weryfikacji hipotezy o braku wpływu poziomu środkowej składowej, w obszarach nr 1 i 3, na percypowaną wysokość trójttonu.

Tabela 37. Test ANOVA sprawdzenia hipotezy o braku wpływu poziomu środkowej składowej o nieparzystym numerze, w obszarze nr 1 na percypowaną wysokość trójttonu. Test wykonano w całym zakresie badanych częstotliwości składowych trójttonów dla poziomu istotności 0.05.

	5	7	9	11	15	19	21
eksperyment	1.25	1.36	0.25	0	1.54	1.87	0.68
wartość krytyczna	2.63	2.35	2.23	2.23	2.23	2.23	2.12

Tabela 38. Test ANOVA sprawdzenia hipotezy o braku wpływu poziomu środkowej składowej o nieparzystym numerze, w obszarze nr 3 na percypowaną wysokość trójtonu. Test wykonano w całym zakresie badanych częstotliwości składowych trójtonów dla poziomu istotności 0.05.

	5	7	9	11	15	19	21
eksperyment	2.12	0.47	0.01	2.31	0.80	0.34	-
wartość krytyczna	2.63	3.03	4.90	4.90	4.90	4.90	-

Tabela 39. Test ANOVA sprawdzenia hipotezy o braku wpływu poziomu środkowej składowej o parzystym numerze, w obszarze nr 1 na percypowaną wysokość trójtonu. Test wykonano w całym zakresie badanych częstotliwości składowych trójtonów dla poziomu istotności 0.05.

	4	6	8	10	12	16	20	22
eksperyment	-	-	0.08	0.95	1.00	0.50	0.97	0.48
wartość krytyczna	-	-	2.39	2.23	2.23	2.23	2.23	2.12

Tabela 40. Test ANOVA sprawdzenia hipotezy o braku wpływu poziomu środkowej składowej o parzystym numerze, w obszarze nr 3 na percypowaną wysokość trójtonu. Test wykonano w całym zakresie badanych częstotliwości składowych trójtonów dla poziomu istotności 0.05.

	4	6	8	10	12	16	20	22
eksperyment	-	-	2.08	2.06	0,12	3.73	1.54	-
wartość krytyczna	-	-	3.04	4.90	4.90	4.90	4.90	-

Test ANOVA wykazał słuszność przyjęcia hipotezy zerowej. Stwierdzono więc brak wpływu poziomu środkowej składowej na percypowaną wysokość trójtonu, osobno w obszarach nr 1 i 3, niezależnie od częstotliwości jego składowych. Z tych samych względów, co dla testu jednorodności wariancji, nie można było wykonać testu ANOVA dla numerów środkowej składowej 4 i 6 w tab. 25 i 26, oraz dla numerów 21 i 22 w obszarze nr 3 odpowiednio w tab. 24 i 26. Z tych samych względów, co dla testu jednorodności wariancji można również założyć, iż dla numerów środkowej składowej 21 i 22 w obszarze nr 3, poziom tej składowej nie wpływa na percypowaną wysokość trójtonów.

Dotychczasowe testy statystyczne stwierdzają, iż poziomy środkowej składowej, osobno dla wartości z obszarów nr 1 i 3, nie wpływają na percepcję wysokości trójtonu i dokładność jej oceny. Daje to podstawę to twierdzenia, iż w każdym z obszarów nr 1 i 3,

BADANIE PROGÓW WYSTĘPOWANIA ZJAWISKA RESIDUUM

sluchacze jednoznacznie percypowali określoną wysokość. W celu potwierdzenia, iż percypowane wysokości trójtynu, w tych obszarach, różnią się od siebie (rys. 19) zastosowano test Kruskala-Wallisa.

Tabela 41. Test Kruskala-Wallisa sprawdzenia hipotezy o braku różnicy percypowanych wysokości trójtynu, o nieparzystym numerze środkowej składowej, w obszarach nr 1 i 3. Test wykonano w całym zakresie badanych częstotliwości składowych trójtynów dla poziomu istotności 0.05.

	5	7	9	11	15	19	21
eksperyment	121.77	121.16	122.65	121.90	122.05	123.03	122.42
wartość krytyczna	3.84	3.84	3.84	3.84	3.84	3.84	3.84

Tabela 42. Test Kruskala-Wallisa sprawdzenia hipotezy o braku różnicy percypowanych wysokości trójtynu, o parzystym numerze środkowej składowej, w obszarach nr 1 i 3. Test wykonano w całym zakresie badanych częstotliwości składowych trójtynów dla poziomu istotności 0.05.

	4	6	8	10	12	16	20	22
eksperyment	-	-	121.77	121.90	122.80	117.04	121.64	122.15
wartość krytyczna	-	-	3.84	3.84	3.84	3.84	3.84	3.84

Powyższe testy nie potwierdzają słuszności stawianej hipotezy, co jest jednoznaczne ze stwierdzeniem, iż percypowane wysokości w tych obszarach różnią się na zadanym poziomie istotności testu.

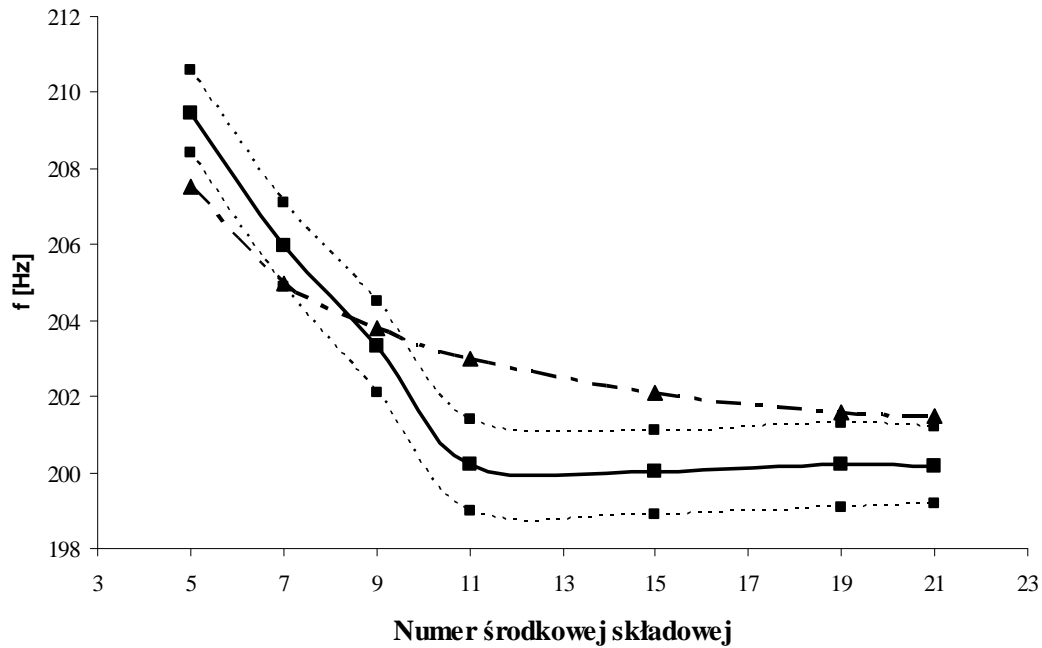
Przeprowadzone testy statystyczne, w połączeniu z wynikami eksperymentu, dają dowód na istnienie progów występowania zjawiska residuum (w sensie definicji 2 z rozdziału 2) w trójtynach nieharmonicznych o wysokości residualnej odpowiadającej częstotliwości brakującej składowej podstawowej tych trójtynów i wskazują na istnienie tego progów w obszarze przejściowym ponieważ:

- Istnieje zależność pomiędzy percypowaną wysokością trójtynu, a poziomem środkowej składowej (tab. 31 i 32), którą cechują trzy obszary zmienności
- W każdym z obszarów nr 1 i 3 z osobna, percypowana jest różna wysokość trójtynu niezależnie od poziomu środkowej składowej w tych obszarach (tab. 41 i 42, rys. 19)
- W obszarze przejściowym wysokość trójtynu zależy od poziomu środkowej składowej i istnieje taka jego wartość, dla której następuje zmiana wrażenia wysokości (rys. 20)

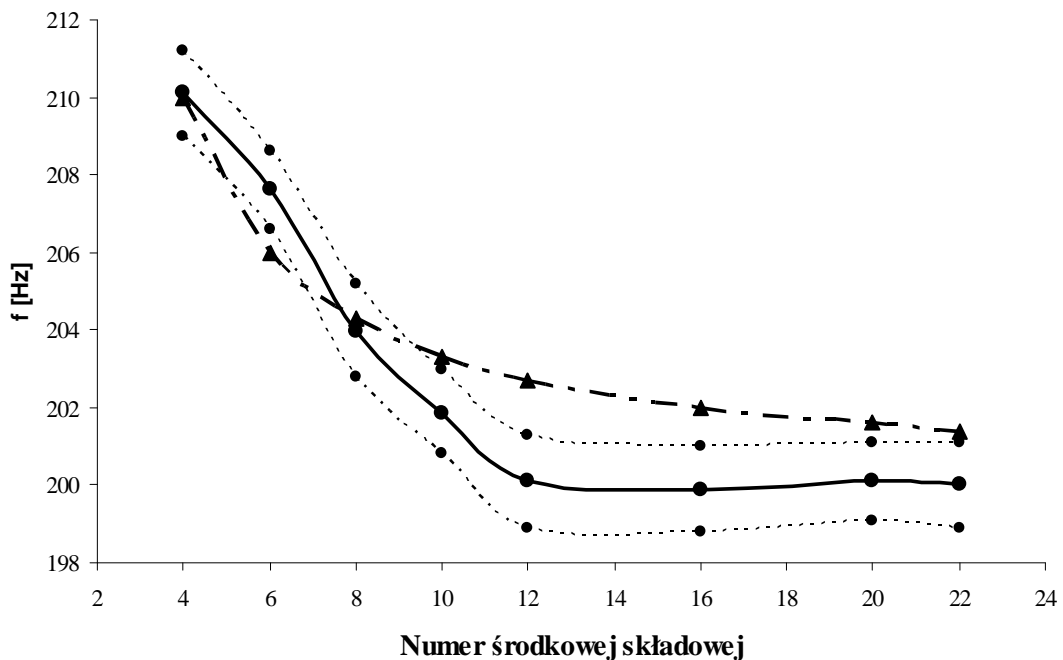
Testy statystyczne pozwoliły również na potwierdzenie zależności progów występowania zjawiska residuum o wysokości residualnej odpowiadającej częstotliwości brakującej składowej podstawowej trójtynu od częstotliwości składowych go tworzących (rys. 21). Ponieważ progowe wartości wyznaczone zostały w obszarach przejściowych, dla których nie jest zachowany rozkład normalny odpowiedzi słuchaczy, zastosowano nieparametryczny test Kruskala-Wallisa w celu weryfikacji hipotezy zerowej, o braku wpływu częstotliwości składowych trójtynu na próg występowania zjawiska residuum. Wartość statystyki testowej na poziomie istotności 0.05 wyniosła $\chi^2(6)=116.06$ przy krytycznej wartości statystyki 12.59, dla nieparzystych numerów środkowej składowej. Wartość statystyki testowej na poziomie istotności 0.05, dla parzystych numerów środkowej składowej, wyniosła $\chi^2(7)=142.72$ przy krytycznej wartości statystyki 14.07. Na podstawie tego testu hipotezę zerową odrzucono.

Na podstawie przeprowadzonego eksperymentu stwierdzono wpływ częstotliwości składowych trójtynów nieharmonicznych na percypowaną wysokość residualną, dla wartości poziomów środkowej składowej powyżej progów jego występowania (obszar nr 3), co prezentują wykresy nr 22 i 23.

Wartość odchylenia standardowego ($\Delta f < 2$ Hz) reprezentująca siłę wrażenia wysokości residualnej świadczy o jednoznacznej jej percepcji przez słuchaczy. Hipotezę zerową o braku wpływu częstotliwości składowych trójtynu na percypowaną wysokość residualną zbadano testem ANOVA. Wcześniej jednak sprawdzono jednorodność wariancji odpowiedzi słuchaczy, testem Bartletta, na poziomie istotności 0.05 i przyjęto hipotezę zerową o braku różnic pomiędzy wariancjami dla statystyki testowej $\chi^2(6) = 3.17$ przy wartości krytycznej 12.59, dla nieparzystych numerów środkowej składowej. Na poziomie istotności 0.05 test ANOVA wykazał brak słuszności hipotezy zerowej, o braku wpływu częstotliwości składowych trójtynu na percypowaną wysokość. Statystyka testowa przyjęła wartość $F(6,553)=1247.10$ przy wartości krytycznej 2.12, dla tych numerów środkowej składowej.



Rys. 22. Zależność percypowanej wysokości trójttonu, wyrażonej w Hz , w funkcji częstotliwości jego składowych wyrażony poprzez numer środkowej składowej o nieparzystych jej numerach, dla poziomów tej składowej powyżej progu występowania zjawiska residuum. Wynik uśredniono dla wszystkich słuchaczy. Linia gruba ciągła przedstawia średnią percypowaną wysokość, linie cienkie przerywane określają odchylenie standardowe reprezentujące siłę wrażenia residuum, linia gruba przerywana została obliczona na podstawie eksperymentu Schoutena (zależność 32, podrozdział 1.3.5.5)



Rys. 23. Zależność percypowanej wysokości trójttonu, wyrażonej w Hz , w funkcji częstotliwości jego składowych wyrażony poprzez numer środkowej składowej, o parzystych jej numerach, dla poziomów tej składowej powyżej progu występowania zjawiska residuum. Wynik uśredniono dla wszystkich słuchaczy. Linia gruba ciągła przedstawia średnią percypowaną wysokość, linie cienkie przerywane określają odchylenie standardowe reprezentujące siłę wrażenia residuum, linia gruba przerywana została obliczona na podstawie eksperymentu Schoutena (zależność 32, podrozdział 1.3.5.5)

Powyższe testy wykonano również dla trójttonów o parzystym numerze środkowej składowej. Test Bartletta na poziomie istotności 0.05 wykazał słuszność hipotezy zerowej o braku różnic pomiędzy wariancjami dla statystyki testowej $\chi^2(7) = 1.84$ przy wartości krytycznej 14.07. Na podstawie testu ANOVA odrzucono hipotezę zerową, o braku różnic w percypowanej wysokości residualnej trójttonów w zależności od częstotliwości ich składowych. Na poziomie istotności 0.05 statystyka testowa przyjęła wartość $F(7,632) = 1342.68$ przy wartości krytycznej 2.03.

8.5 DYSKUSJA

Wyniki eksperymentu i przeprowadzone testy statystyczne dowodzą istnienia progu występowania zjawiska residuum o wysokości residualnej odpowiadającej częstotliwości brakującej składowej w trójttonach nieharmonicznych. Interpretacja istnienia progu występowania określonej wysokości residualnej, w oparciu o modele percepcji zjawiska residuum, jest identyczna jak w przypadku trójttonów harmonicznych [106].

Analizując zachowanie się progu występowania zjawiska residuum w trójttonach nieharmonicznych można zauważyć, że jest ono identyczne z zachowaniem się progu dla trójttonów harmonicznych [106][110]. Wprowadzenie stosunkowo małego przesunięcia składowych w dziedzinie częstotliwości $\Delta f = 30 \text{ Hz}$ nie spowodowało zmiany percepcji tego trójttonu w stosunku do jego harmonicznego odpowiednika. Dlatego też nie nastąpiła zmiana poziomu środkowej składowej, dla określonej częstotliwości składowych, potrzebna do zrównania wrażenia wysokości residualnej w porównaniu do trójttonu harmonicznego (porównaj rys. 16 i 21). Z tego powodu, interpretacja zachowania się progu występowania wysokości residualnej odpowiadającej częstotliwości brakującej składowej dla trójttonów harmonicznych (zawarta w rozdziale 7.5), może być również użyta w stosunku do trójttonów nieharmonicznych.

Istotny jest również fakt przesunięcia się percypowanej wysokości residualnej trójttonów od wartości częstotliwości $f = 200 \text{ Hz}$ (składowa podstawowa trójttonów harmonicznych), na skutek wprowadzenia przesunięcia składowych trójttonu. Z rys. 22 i 23 wynika, że to przesunięcie wysokości residualnej zależy od numeru najniższej składowej. Zależność ta opisana wyrażeniem (32) (podrozdział 1.3.5.5) nazwana jest I efektem przesunięcia wysokości residualnej. Wystąpienie tego efektu jest dowodem na brak wpływu

tonu różnicowego (200 Hz) na percepcję wysokości residualnej w trójttonach, a w konsekwencji na próg jego występowania.

Należy jednak zauważyć, iż dla numerów środkowej składowej trójttonów powyżej 8, istnieje różnica pomiędzy interpretacją Schoutena, a wynikami eksperymentu. Na podstawie modeli struktury czasowej można stwierdzić, iż dla składowych nierozróżnialnych słuchem, percypowana wysokość związana jest z periodycznością obwiedni czasowej pobudzenia. W przypadku prezentowanych tu pobudzeń, periodyczność obwiedni czasowej odpowiada częstotliwości 200 Hz i nie występuje przesunięcie wysokości residualnej.

Niektóre eksperymenty dotyczące pobudzeń nieharmonicznych [158][170] stwierdziły jednak istnienie przesunięcia wysokości residualnej dla składowych nierozróżnialnych słuchem. Dopiero badania Morre'a [118] wyjaśniły te rozbieżności. Stosowanie tego samego rodzaju pobudzeń (ta sama liczba i częstotliwość składowych) jako bodźców wzorcowych i porównawczych powoduje, iż słuchacze dostrajają się do wysokości związanej ze wzorcem pobudzenia, a nie do wysokości związanej z periodycznością fali pobudzenia. W celu uniknięcia tego problemu stosuje się, jako bodźce porównawcze, pobudzenia o odpowiednio ukształtowanej obwiedni widmowej lub używa się pobudzeń z innego zakresu częstotliwości.

Wyniki tego eksperymentu potwierdzają, iż użycie tonu prostego jako bodźca porównawczego, nie powoduje u słuchaczy dostrajania się do wzorca pobudzenia.

8.6 PODSUMOWANIE

Wyniki powyższego eksperymentu dowodzą:

- Istnienia progu powstawania zjawiska residuum (w sensie definicji 2 z rozdziału 2) o określonej wysokości residualnej w trójttonach nieharmonicznych (z wyjątkiem trójttonów o parzystych numerach środkowej składowej dla najniższych jej numerów 4 i 6, dla których wynosi on zero)
- Zależności progu powstawania zjawiska residuum od częstotliwości składowych trójttonu, a ściślej od ich numeru
- Braku wpływu tonu różnicowego na percepcję zjawiska residuum w trójttonach

9. PODSUMOWANIE

Na podstawie otrzymanych wyników pomiarów i testów statystycznych z całą pewnością można stwierdzić, iż istnieje próg występowania zjawiska residuum, o określonej wysokości residualnej odpowiadającej częstotliwości brakującej składowej podstawowej danego dwutonu bądź trójtynu.

Wyniki eksperymentów oraz testów istotności dowodzą, że postawiona teza pracy:

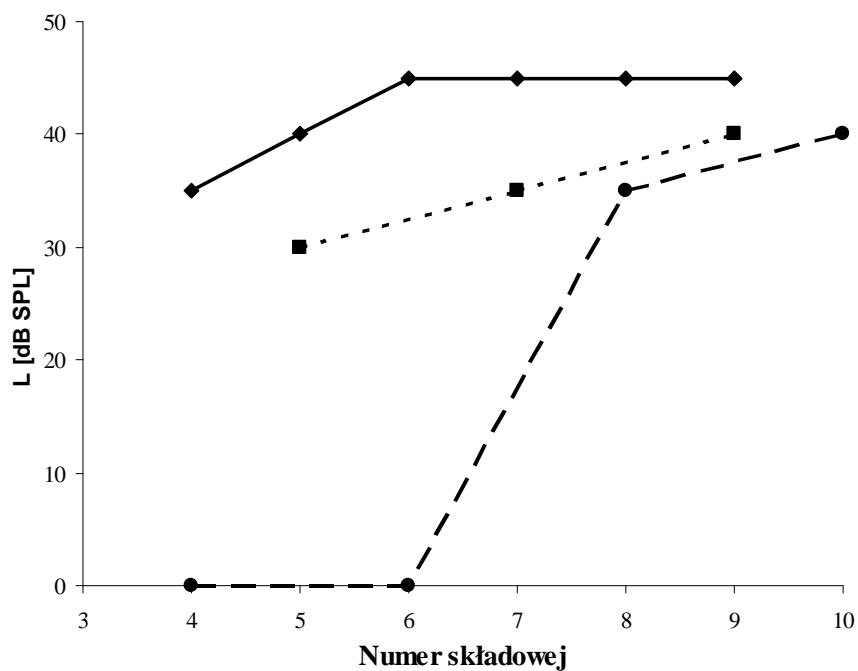
Istnieje próg występowania zjawiska residuum o określonej wysokości residualnej i zależy on od częstotliwości składowych tworzących pobudzenie

jest prawdziwa.

Wyniki dowodzą również zależności progu występowania określonej wysokości residualnej od częstotliwości składowych pobudzenia, a dokładniej od numeru ich składowych. Wyniki potwierdzają więc rolę wstęp krytycznych w procesie percepcji wysokości dźwięku.

Otrzymane wyniki potwierdzają również brak zależności percypowanej wysokości residualnej od numeru harmonicznej dla pobudzeń harmoniczných (eksperyment nr 1 i 3). Natomiast pobudzenia nieharmoniczne wykazują taką zależność, ze względu na występowanie I efektu przesunięcia wysokości (eksperyment 2 i 4). Ponadto występowanie tego efektu potwierdziło brak udziału tonu różnicowego na percepcję zjawiska residuum, a w szczególności na próg jego powstawania.

Należy również zwrócić uwagę, iż próg występowania zjawiska residuum przyjmuje różne wartości w zależności od pobudzenia, co prezentuje poniższy wykres:



Rys. 24. Zależność progu występowania zjawiska residuum w zależności od numeru składowej, która reprezentuje numer wyższej składowej dwutonów jak i również środkową składową trójtonów. (♦- dane dla dwutonów, ■- dane dla trójtonów o nieparzystym numerze środkowej składowej, ●- dane dla trójtonów o parzystym numerze środkowej składowej)

Różnice w wartości progu dla trójtonów o nieparzystym i parzystym numerze środkowej harmonicznej zostały wyjaśnione w dyskusji eksperymentów nr 7 i 8. Natomiast ważnym spostrzeżeniem jest fakt, iż próg występowania zjawiska residuum dla dwutonów jest wyższy niż dla trójtonów. Wyniki te potwierdzają wcześniejsze stwierdzenia, że zjawisko residuum w dwutonach jest „słabsze” w porównaniu do pobudzeń o większej liczbie składowych.

LITERATURA

- [1] Abraham O., Schaefer K. L., *Studien über Unterbrechungstone*, Arch. Ges. Physiol., 83, 207-211, 1901
- [2] Abraham O., Schaefer K. L., *Studien über Unterbrechungstone*, Arch. Ges. Physiol., 88, 475-491, 1902
- [3] Abraham O., Schaefer K. L., *Zur Lehre von den so Genannten Unterbrechungstonen*, Ann. Phys., 13, 996-1009, 1904
- [4] American Standards Association (1960) *Acoustical Terminology SI, 1-1960*, American Standards Association, New York 1960
- [5] Bekesy G. von, *The Variation of Phase Along the Basilar Membrane with Sinusoidal Vibrations*, JASA, 19, 452-460, 1947
- [6] Bekesy G. von, *Experiments in Hearing*, Mc Graw-Hill, New York, 1960
- [7] Bernstein J. G., Oxenham A.J, *Pitch discrimination of diotic and dichotic tone complexes: Harmonic resolvability or harmonic number?*, JASA, 113,3323-3334, 2003
- [8] Bernstein J. G. W., Oxenham A. J., *An autocorrelation model with place dependence to account for the effect of harmonic number on fundamental frequency discrimination*, JASA, 117, 3816-3831, 2005
- [9] Bilsen F. A., *Repetition pitch: Monaural interaction with a sound with the repetition of the same, but phase shifted, sound*, Acustica, 17, 295-300, 1966
- [10] Bilsen F. A, *Pronounced binaural pitch phenomenon*, JASA, 59, 467-468, 1976
- [11] Bilsen F. A., Goldstein J. L., *Pitch of dichotically delayed noise and its possible spectral basis*, JASA, 55, 292-296, 1974
- [12] Bilsen, F. A., and Raatgever, J., *On the dichotic pitch of simultaneously presented interaurally delayed white noises. Implications for binaural theory*, J. Acoust. Soc. Am., 108, 272–284, 2000
- [13] Bilsen F. A., Ritsma R. J., *Repetition pitch mediated by temporal fine structure at dominant spectral regions*, Acustica, 19, 114-116, 1967
- [14] Boer E., de, *On the residue in hearing*, rozprawa doktorska, Uniwersytet Amsterdamski, Holandia, 1956
- [15] Boer E., de, *Synthetic whole-nerve action potentials for the cat*, JASA, 58, 1030-1045, 1975

- [16] Boer E., de., *On the residue and auditory pitch perception*, Handbook of Sensory Physiology, W. D. Keidel, W. D. Neff, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, tom V/3, 479-583, 1976
- [17] Boer E., de Jongh H. R., *On cochlear encoding: Potentialities and limitations of the revers-correlation technique*, JASA, 63, 115-135, 1978
- [18] Carlyon, R. P., and Shackleton, T. M., *Comparing the fundamental frequencies of resolved and unresolved harmonics: Evidence for two pitch mechanisms?*, J. Acoust. Soc. Am. 95, 3541–3554, 1994
- [19] Cartwright J. H. E., Gonzales D. L., Piro O., *Nonlinear Dynamics of the Perceived Pitch of Complex Sounds*, PRL, 82, 5389-5392, 1999
- [20] Cedolin, L., and Delgutte, B., *Pitch of complex tones: Rate-place and interspike-interval representations in the auditory nerve*, J. Neurophysiol., 2005
- [21] Chaveigne Alain, *Cancellation model of pitch perception*, JASA, 103, 1261-1271, 1998
- [22] Culling, J. F., and Summerfield, Q., *Perceptual separation of concurrent speech sounds: absence of across-frequency grouping by common interaural delay*, J. Acoust. Soc. Am. 98, 785–797, 1995
- [23] Dai H., *On the relative influence of individual harmonics on pitch judgment*, JASA, 107, 953- 959, 2000
- [24] Davis H., Silverman S. R., McAuliffe D. R., *Some observation on pitch and frequency*, JASA, 23, 40-42, 1951
- [25] Dennert H., *Akustisch-physiologische Untersuchungen*, Arch. Öhrenheilk., 24, 171-184, 1887
- [26] Djupesland G., Zwislocki J. J., *Sound pressure distribution in the outer ear*, Scand. Audiol. 1, 197-203, 1972
- [27] Dobosz M., *Wspomagana komputerowo statystyczna analiza wyników badań*, AOW Exit, Warszawa, 2001
- [28] Egan J. P., Egan, Donald R. M., *Changes in Pitch of Tones of Low Frequency as a Function of the Pattern of Excitation Produced by a Band of Noise*, JASA, 22, 827 (1950)
- [29] Evans E. F., Pratt S. R., Cooper N. P., *Correspondence between behavioral and physiological frequency selectivity in the guinea pig*, Brit. J. Audiol., 23, 151-152, 1989
- [30] Everett J. D., *On resultant tones*, Phil. Mag. 5th Ser., 41, 199-207, 1896
- [31] Falangan J. L., Guttman N., *Pitch of periodic pulses without fundamental component*, JASA, 32, 1319-1328, 1960

- [32] Faulkner A., Ball V., Rosen S., Moore B. C. J., Fourcin A., *Speech pattern hearing aids for the profoundly hearing impaired: Speech perception and auditory abilities*, JASA, 91, 2136-2155, 1992
- [33] Fine P.A., Moore B. C. J., *Frequency analysis and musical ability*, Music Percept., 11, 39-53, 1993
- [34] Fishler H., *Time pattern of complex basilar-membrane vibrations and its relation to pitch phenomena*, MIT Res. Lab. Elect. Quart. Progr. Rept., 82, 263-266, 1966
- [35] Fishler H., *Model of the "secondary" residue effect in the perception of complex tones*, JASA, 42, 759-764, 1967
- [36] Fletcher H., *The physical criterion for determining the pitch of a musical tone*, Phys. Rev., 23, 427-437, 1924
- [37] Fletcher H., *Auditory patterns*, Rev. Mod. Phys. 12, 47-56, 1940
- [38] Fourcin A. J., *Central pitch and auditory localization*, Freq. Anal. Per. Det. Her., ed. R. Plomp, G.F. Smoorenburg, 319-328, 1970
- [39] Frijns J. H. M., Raatgever J., Bilsen F. A., *A central spectrum theory of binaural processing. The binaural pitch revisited*, JASA, 80, 442-451, 1986
- [40] Glasberg B. R., Moore B. C. J., *Derivation of auditory filter shapes from notched-noise data*, Hear. Res. 47, 103-138, 1990
- [41] Gockel H., Carlyon R. P., Plack C. J., *Dominance region for pitch: Effects of duration and dichotic presentation*, JASA, 117, 1326, 2005
- [42] Gockel H., Moore B. C. J., Plack C. J., Carlyon R. P., *Effect of noise on the detectability and fundamental frequency discrimination of complex tones*, JASA, 120, 957, 2006
- [43] Goldstein J. L., *Auditory nonlinearity*, JASA, 41, 676-689, 1967
- [44] Goldstein J. L., *An optimum processor theory for the central formation of the pitch of complex tones*, JASA, 54, 1469-1516, 1973
- [45] Goldstein J. L., Houtsma A. J. M., *Aural tracking of musical notes: The problem of the missing fundamental*, Quarterly Progress Report, Research Laboratory of Electronics, MIT, 98, 195-203, 1970
- [46] Goldstein J. L., Houtsma A. J. M., *Perception of musical intervals: Evidence for the central origin of musical pitch*, Technical Report, Research Laboratory of Electronics, MIT, 484, 1971
- [47] Goldstein J. L., Houtsma A. J. M., *The central origin of the pitch of complex tones: Evidence from musical interval recognition*, JASA, 51, 520-529, 1972
- [48] Greenwood D. D., *Auditory masking and the critical band*, JASA, 33, 484-501, 1961

- [49] Greenwood D. D., *Critical bandwidth and the frequency coordinates of the basilar membrane*, JASA, 33, 1344-1356, 1961
- [50] Greń J., *Statystyka matematyczna, modele i zadania*, PWN, Warszawa, 1982
- [51] Grimault, N., Micheyl, C., Carlyon, R. P., and Collet, L., *Evidence for two pitch encoding mechanisms using a selective auditory training paradigm*, Percept. Psychophys., 64, 189–197, 2002
- [52] Guttman N., *Pitch and loudness of a binaural subjective tone*, JASA, 34, 1996 (A), 1962
- [53] Hall J. L., *Auditory distortion products f_2-f_1 and $2f_1-f_2$* , JASA, 51, 1863-1871, 1972
- [54] Hall J. W., Peters R. W., *Pitch from nonsimultaneous successive harmonics in quiet and noise bandwidth*, JASA, 69, 509-513, 1981
- [55] Hall J. W., Soderquist D. R., *Encoding and pitch strength of complex tones*, JASA, 58, 1257-1261, 1984, 1975
- [56] Hamilton P. M., *Noise masked thresholds as a function of tonal duration and masking noise bandwidth*, JASA, 29, 506-511, 1957
- [57] Hartmann W. M., and B. J. Blumenstock, *Time dependence of pitch perception-pitch step experiment*, JASA, 60, S40 (1976)
- [58] Hartmann, W. M., *Signals, Sound, and Sensation*, AIP Press, Woodbury, NY, 1997
- [59] Hartmann W. M., McMillon C. D., *Binaural coherence edge pitch*, JASA, 109, 3400-3409, 2001
- [60] Hartmann W. M., Zhang P. X., *Binaural models and strength of dichotic pitches*, JASA, 114, 3317-3326, 2003
- [61] He N., Schmiedt R. A., *Fine structure of the $2f_1/2f_2$ acoustic distortion product: Effects of primary level and frequency ratios*, JASA, 101, 3554-3565, 1997
- [62] Helmholtz H. L. F. von, *Die Lehre von dem Tonempfindungen als Physiologische Grundlage für die Theorie der Musik*, F. Vieweg & Sohn, Braunschweig, 1st edition, 1863
- [63] Hermann L., *Phonographische Untersuchungen III*, Arch. Ges. Physiol., 47, 249-294, 1890
- [64] Hermann L., *Neue Versuche zur Frage der Unterbrechungstone*, Arch. Ges. Physiol., 146, 249-294, 1912
- [65] Hicks M. L., Bacon S. P., *Psychophysical measures of auditory nonlinearities as a function of frequency in individuals with normal hearing*, JASA, 105, 326-338, 1999
- [66] Hilgard E. R., *Wprowadzenie do psychologii*, Warszawa, 1967

- [67] Houtgast T., *Subharmonic pitches of a pure tone at low S/N ratio*, JASA, 60, 405-409, 1976
- [68] Houtsma A. J.M., *Noise-induced shifts in the pitch of pure and complex tones*, JASA, 70, 1661 (1981)
- [69] Houtsma, A. J. M., and Smurzynski, J., *Pitch identification and discrimination for complex tones with many harmonics*, J. Acoust. Soc. Am. 87, 304–310, 1990
- [70] Humes L. E., *Perception of simple difference tone f_2-f_1* , JASA, 66, 1064-1074, 1979
- [71] Irino T., *A 'Gammachirp', Function as an Optimal Auditory Filter with the Mellin Transform*, IEEE ICASSP96, Atlanta, May, 981-984, 1996
- [72] Irino T., Unoki M., *An Analysis/Synthesis Auditory Filterbank Based on an IIR Implementation of the Gammachirp*, JASJ, (E),20, 397-406, 1999
- [73] Irino T., Unoki M., *A Time-Varying, Analysis/Synthesis Auditory Filterbank Using the Gammachirp*, IEEE Int. Conf. Acoust., Speech Signal Processing (ICASSP-98), Phoenix, AZ, 1999.
- [74] Javel E., *Coding of AM tones in chinchilla auditory nerve: implication for the pitch of complex tones*, JASA, 68, 133-146, 1980
- [75] Jeffers L. A., *The pitch of complex tones*, Am. J. Psychol., 53, 240-250, 1940
- [76] Jestead W., *An adaptive procedure for subjective judgments*, Percept. Psychophys., 28, 85-88, 1980
- [77] Johannesma P., I., M., *The pre-response stimulus ensemble of neurons in the cochlear nucleus*, Proc. Symposium on Hearing Theory, IPO, Eindhoven, The Netherlands, 58-69, 1972
- [78] Jorasz, U., *Wykłady z psychoakustyki*, Wydawnictwo Naukowe Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza w Poznaniu, 1998
- [79] Kaernbach Ch., Demay L., *Psychophysical evidence against the autocorrelation theory of auditory temporal processing*, JASA, 104, 2298-2306, 1998
- [80] Kiang N. Y. S., Watanabe T., Thomas E. C., Clark L. F., *Discharge patterns of single fibers in the cat's auditory nerve*, MIT Press, Cambridge, Mass., 1965
- [81] Kleczkowski, P., „Właściwości słuchu w analizie sygnałów akustycznych”, Rozprawy, Monografie 109., Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne, Kraków, 2002
- [82] Klein M. A., Hartmann W. M., *Binaural edge pitch*, JASA, 70, 51-61, 1980
- [83] König R., *Über den Zusammenklang zweier Tone*, Ann. Psych. Chem., 157, 177-237, 1876

- [84] Krumbholz K., Patterson R. D., Pressnitzer D., *The lower limit of pitch as determined by rate discrimination*, JASA, 108, 1170-1180, 2000
- [84] Krumbholz K., Patterson R. D., Pressnitzer D., *The lower limit of melodic pitch*, JASA, 109, 2074-2084, 2001
- [86] Krumbholz, K., Patterson, R. D., Nobbe, A., and Fastl, H., *Microsecond temporal resolution in monaural hearing without spectral cues?*, JASA, 113, 2790–2800, 2003
- [87] Liberman A. M., *The cochlear frequency map for the cat: labeling auditory-nerve fibers of known characteristic frequency*, JASA, 72, 1441-1449, 1982
- [88] Licklider I. C. R., *Periodicity pitch and place pitch*, JASA, 26, 945, 1951
- [89] Licklider J. C. R., *A duplex theory of pitch perception*, Experientia, 7, 128-134, 1951
- [90] Licklider J. C. R., *Three auditory theories*, Psychology: Study of a science, ed. S. Koch, New York, 1959
- [91] Licklider J. C. R., *Auditory frequency analysis*, Information Theory, ed. C. Cherry, New York, 1956
- [92] Lopez-Poveda, E. A., Meddis, R., *A human nonlinear cochlear filterbank*, JASA, 110, 3107–3118, 2001
- [93] Lutfi R. A., Patterson R. D., *On the growth of masking asymmetry with stimulus intensity*, JASA, 76, 739-745, 1984
- [94] Lyon R.F., *Computational model of neural auditory processing*, IEEE Proc., 36.1.1-36.1.4, 1986
- [95] Lyon R. F., *The allpole gammatone filter and auditory filtering*, Forum Acusticum '96, Antwerp, Belgium, 1996
- [96] MaxxBass Incorporation, *MaxxBass ASIC for psycho-acoustic bass extension*, MX3000DS datasheet, 2006
- [97] Meddis R., *Simulation of mechanical to neural transduction In the auditory receptor*, JASA, 79, 702-711, 1986
- [98] Meddis R., *Simulation of auditory-neural transduction: Further studies*, JASA, 83, 1056-1063, 1988
- [99] Meddis, R., *Auditory-nerve first-spike latency and auditory absolute threshold: A computer model*, JASA, 119, 406–417, 2006
- [100] Meddis R., Hewitt M. J., Shackleton T. M., *Implementation details of a computation model of the inner hair-cell/auditory-nerve synapse*, JASA, 87, 1813-1816, 1990
- [101] Meddis R., Hewitt M. J., *Virtual pitch and phase sensitivity of a computer model of the auditory periphery. I. Pitch identification*, JASA, 89, 2883-2894, 1991

- [102] Meddis R., O'Mard L., *A unitary model of pitch perception*, JASA, 102, 1811-1820, 1997
- [103] Meddis R., O'Mard L. P., *Virtual pitch in a computational physiological model*, JASA, 120, 3861-3869, 2006
- [104] Mielczarek A., *Residual pitch of the two-component complexes*, materiały konferencyjne Subjective and Objective Assessment of Sound, Poznań, Poland, 2004, (Dokument elektroniczny)
- [105] Mielczarek A., *The explanation of the formation of the residual pitch perception threshold in two-frequency stimuli on the basis of the pitch perception models*, materiały konferencyjne 9th International Student Conference on Electrical Engineering, Prague, Czech Republic, 2005, (Dokument elektroniczny)
- [106] Mielczarek A., *The threshold of the residue phenomenon in three-component inharmonic stimuli*, Archives of Acoustics, 31, 4, 425-430, 2006
- [107] Mielczarek A., *Masking the residual pitch phenomenon by environmental noise*, Euronoise, Tampere, Finlandia, 2006 (Dokument elektroniczny)
- [108] Mielczarek A., *The nonlinear component $2f_1-f_2$ and the pitch of two-component complexes*, 19 ICA, Madryt, Hiszpania, 2007 (Dokument elektroniczny)
- [109] Mielczarek A., Dobrucki A., *Detecting of residual pitch in two-component complexes*, materiały konferencyjne Forum Acusticum, Budapest, Węgry, 2005, (Dokument elektroniczny)
- [110] Mielczarek A., Dobrucki A., *The threshold of the residue phenomenon in three-component harmonic stimuli*, Archives of Acoustics, 30, 4, 165-168, 2005
- [111] Mielczarek A., Dobrucki A., *The threshold of the residual pitch in three-component inharmonic stimuli*, Archives of Acoustics 31, 4, 2006, 425-430
- [112] Miller G. A., Taylor W. G., *The perception of repeated bursts of noise*, JASA, 20, 171-182, 1948
- [113] Moore B. C. J., *Some experiments relating to the perception of complex tones*, Q. J. Exp. Psych., 25, 451-457, 1973
- [114] Moore B. J. C., *Wprowadzenie do psychologii słyszenia*, PWN, Warszawa-Poznań, 1999
- [115] Moore B. C. J., Glasberg B. R., *Suggested formulae for calculating auditory-filter bandwidths and excitation patterns*, JASA, 74, 750-753, 1983
- [116] Moore B. C. J., Glasberg B. R., Shailer M. J., *Frequency and intensity difference limens for harmonics within complex tones*, JASA, 75, 550-561, 1984

- [117] Moore B. C. J., Glasberg B. R., Low K. E., Cope T., Cope W., *Effects of level and frequency on the audibility of partials in inharmonic complex tones*, JASA, 120, 934-944, 2006
- [118] Moore G. A., Moore B.C.J., *Perception of the low pitch of frequency-shifted complexes*, J. Acoust. Soc. Am. 113, 977-985, 2003
- [119] Moore B. C. J., Ohgushi K., *Audibility of partials in inharmonic complex tones*, JASA, 93, 452-461, 1993
- [120] Nedzelnitsky, *Sound pressure in the basal turn of the cat cochlea*, JASA, 68, 1676-1689, 1980
- [121] Ohm G.S., “*Über die definition des tones,ebst daran geknupfter. Theorie der sirene und ahnlicher tonbildener vorrichtungen*, Ann. Phys. Chem. 59,513-565
- [122] Oxenham, A. J., and Bacon, S. P., *Cochlear compression: Perceptual measures and implications for normal and impaired hearing*, Ear Hear., 24, 352–366, 2003
- [123] Palmer A. R., Russell I. J., *Phase-locking in the cochlear nerve of the guinea-pig and its relation to the receptor potential of inner hair-cells*, Hear. Res., 24, 1-15, 1986
- [124] Patterson R. D., *Auditory filter shapes derived with noise stimuli*, JASA, 59, 640-654,1976
- [125] Patterson, R. D., *Auditory filter shapes derived with noise stimuli*, JASA, 59, 640-654, 1976
- [126] Patterson, R. D., Allerhand M., Giguere C., *Time-domain modeling of peripheral auditory processing: a modular architecture and a software platform*, JASA, 98, 1890-1894, 1995
- [127] Patterson, R. D., Handel, S., Yost, W. A., Datta, A. J., *The relative strength of the tone and noise components in iterated rippled noise*, JASA, 107, 1578–1588, 1996
- [128] Patterson R. D., Wightman F. L., *Residue pitch as a function of component spacing*, JASA, 59, 1450-1459, 1976
- [129] Patterson, R. D., Yost, W. A., Handel, S., and Datta, A. J., *The perceptual tone/noise ratio of merged iterated rippled noises*, JASA, 107, 1578–1588, 2000
- [130] Pickles, J. O., *An Introduction to the Physiology of Hearing*, Academic, London, 1988
- [131] Plomp R., *Ear as a frequency analyzer I*, JASA, 36, 1628-1636, 1964
- [132] Plomp R., *Detectability threshold for combination tones*, JASA, 37, 1110-1123, 1965
- [133] Plomp R., *Pitch of complex tones*, JASA, 41, 1526-1533, 1967
- [134] Plomp R., Mimpfen A. M., *The ear as a frequency analyzer II*, JASA, 43, 764-767, 1968

- [135] Plomp R., Steeneken H. J. M., *Interference between two simple tones*, JASA, 43, 883-884, 1968
- [136] PN- EN ISO 389-7, Akustyka – Zero odniesienia do wzorcowania aparatury audiometrycznej – Część 7: Wartości odniesienia progu słyszenia w warunkach odsłuchu w polu swobodnym i w polu dyfuzyjnym, 2005
- [137] Pressnitzer, D., Patterson, R. D., and Krumbholz, K., *The lower limit of melodic pitch*, JASA, 109, 2074–2084, 2001
- [138] Raatgever, J., and Bilsen, F. A., *Lateralization and dichotic pitch as a result of spectral pattern recognition*, Psychophysics and Physiology of Hearing, ed. E. F. Evans and J. P. Wilson, Academic, London, 1977
- [139] Raatgever, J., and Bilsen, F. A., *A central theory of binaural processing. Evidence from dichotic pitch*, J. Acoust. Soc. Am. 80, 429–441, 1986
- [140] Rakowski A., *Measurements of pitch*, Catgut Acoustical Society, Newsletter 27, 1977
- [141] Renken R., Ester J., Wiersinga-Post C., Tomaskovic S., Duifhuis H., *Dominance of missing fundamental versus spectrally cued pitch: Individual differences for complex tones with unresolved harmonics*, JASA, 115, 2257-2263, 2004
- [142] Renowski J., *Akustyka psychofizjologiczna*, PWR, Wrocław, 1976
- [143] Riesz R. R., *Differential intensity sensitivity of the ear for pure tones*, Phys. Rev., 31, 867-875, 1928
- [144] Ritsma R. J., *Existence region of the tonal residue I*, JASA, 34, 1224-1229, 1962
- [145] Ritsma R. J., *Existence region of the tonal residue II*, JASA, 35, 1241-1245, 1963
- [146] Ritsma R. J., *Frequencies dominant in the perception of the pitch of complex sounds*, JASA, 42, 191-198, 1967
- [147] Ritsma R. J., *Frequencies dominant in the perception of periodic pulses of alternating polarity*, IPO Annual Prog. Rep., 2, 14-24, 1967
- [148] Robinson D. W., Dadson R. S., *A re-determination of the equal-loudness relations for pure tones*, Brit. J. Appl. Phys., 7, 166-181, 1956
- [149] Rose J. E., Brugge J. F., Anderson D. J., Hind J. E., *Patterns of activity in single auditory nerve fibers of the squirrel monkey*, Hearing Mechanism in Vertebrates, ed. A. V. S. de Reuck, J. Knight, Churchill, London, 1968
- [150] Rose J. E., Hind J. E., Anderson D. J., Brugge J. F., *Some effects of the stimulus intensity of response of auditory nerve fibers in the squirrel monkey*, J. Neurophysiol., 34, 685-699, 1971

- [151] Rosen, S., Baker, R. J., Kramer, S., *Characterizing Changes in Auditory Filter Bandwidth as a Function of Level*, ed. Y. Cazals, L. Demany, & K. Horner, *Auditory Physiology and Perception*. Pergamon Press, Oxford, 171-177, 1992
- [152] Ruggero M. A., *Responses to sound of the basilar membrane of the mammalian cochlea*, *Curr. Opin. Neurobiol.* 2, 449-456, 1992
- [153] Schaefer K. L., *Eine neue Erklärung der subjektiven Combinationstone auf Grund der Helmholtzschen Resonanzhypothese*, *Aech. Ges. Physiol.*, 78, 505-526, 1899
- [154] Schooneveldt G. P., Moore B. C. J., *Comodulation masking release CMR as a function of masker bandwidth, modulator bandwidth and signal duration*, *JASA*, 85, 273-281, 1989
- [155] Schouten J. F., *The perception of subjective tones*, *Proc. Kon. Nederl. Akad. Wetensch.*, 41, 356-365, 1938
- [156] Schouten J.F., *The residue, a new component in subjective sound analysis*, *Proc. Kon. Nederl. Akad. Wetensch.*, 43, 356-365 (1940a)
- [157] Schouten J.F., *The residue and the mechanism of hearing*, *Proc. Kon. Nederl. Akad. Wetensch.*, 43, 991-999 (1940b)
- [158] Schouten J.F., *The perception of pitch*, *Philips Tech. Rev.*, 5, 286-294, (1940c)
- [159] Schouten J. F., Ritsma R. J., Cardozo B. L., *Pitch of the residue*, *JASA*, 34, 1418-1424, 1962
- [160] Seebeck A., *Über die Sirene*, *Ann. Phys. Chem.*, 60, 449-481 (1843)
- [161] Seebeck A., *Über die Definition des Tones*, *Ann. Phys. Chem.*, 63, 353-368, 1844
- [162] Seebeck A., *Über die Erzeugung von Tönen durch getrennte Eindrücke, mit Beziehung auf die Definition des Tones*, *Ann. Phys. Chem.*, 63, 368-380, 1844
- [163] Shackleton, T. M., and Carlyon, R. P., *The role of resolved and unresolved harmonics in pitch perception and frequency modulation discrimination*, *JASA*, 95, 3529-3540, 1994
- [164] Shaw E. A. G., *The external ear*, *Handbook of Auditory Physiology*, ed. W. D. Keidel, W.D. Neff, Berlin, 1974
- [165] Shihab Shamma and David Klein, *The case of the missing pitch templates: How harmonic templates emerge in the early auditory system*, *JASA*, 107, 2631-2644, 2000
- [166] Slaney M., *An Efficient Implementation of the Patterson-Holdsworth Auditory Filter Bank*, Apple Computer Technical Report #35, Apple Computer, Inc., 1993
- [167] Slaney M., Lyon R. F., *A perceptual detector*, *Proc. Int. Conf. Acoustic Speech Signal Process.*, 5, 357-360, 1990

- [168] Slaney M., Lyon R. F., *On the importance of time- a temporal representation of time*, Apple Comp. Tech. Rep., 5, 1-22, 1998
- [169] Small A. M. Jr., *Some parameters influencing the pitch of amplitude modulated signal*, JASA, 27, 751-760, 1955
- [170] Smoorenburg G. F., *Pitch perception of two-frequency stimuli*, JASA, 48, 924-942, 1970
- [171] Smoorenburg G. F., *Audibility region of combination tones*, JASA, 52, 603-614, 1972
- [172] Snow W.B., *Change of Pitch with Loudness at Low Frequencies*, JASA, 7, 238 (1936)
- [173] Snow W.B., *Change of Pitch with Loudness at Low Frequencies*, JASA, 8, 14 (1936)
- [174] Spiegel M. F., *Thresholds for tones in maskers of various bandwidths and for signals of various bandwidths as a function of signal frequency*, JASA, 69, 791-795, 1981
- [175] Steinschneider, M., Reser, D. H., Fishman, Y. I., Schroeder, C. E., and Arezo, J. C., *Click train encoding in primary auditory cortex of the awake monkey: Evidence for two mechanisms subserving pitch perception*, J. Acoust. Soc. Am. 104, 2935–2955, 1998
- [176] Stevens S.S., *The relation of pitch to intensity*, JASA 6, 150-154, 1935
- [177] Stevens S.S., Ekdah A. G., *The Relation of Pitch to the Duration of a Tone*, JASA, 10, 255 (1939)
- [178] Terhardt E., *Pitch, consonance and harmony*, JASA, 55, 1061-1069
- [179] Terhardt E., *Zur Tonhohenwahrnehmung von Klängen I. Psychoakustische Grundlagen*, Acustica, 26, 173-186, 1972
- [180] Terhardt E., *Zur Tonhöhenwahrnehmung von Klängen II., Ein Funktionsschema*, Acustica, 26, 187-199, 1972
- [181] Terhardt E., *Calculating virtual pitch*, Hearing Research (1), 1979, 155–182.
- [182] Thurlow W. R., Small A. M. Jr., *Pitch perception for certain periodic auditory stimuli*, JASA, 27, 132-137, 1955
- [183] Thurlow W. R., *Perception of low auditory pitch: a multicue mediation theory*, Psychol. Rev., 70, 461-470, 1963
- [184] U.S Patent 5930373, *Method and system for enhancing quality of sound signal*, 1999
- [185] Vogten L. L. M., *Pure-tone masking: A new results from a new method*, Facts and Models in Hearing, ed. E. Zwicker and E. Terhardt, Berlin, 1974
- [186] Walliser K., *Über ein Funktionsschema für die Bildung der Periodentonhohe aus dem Schallreiz*, Kybernetik, 6, 65-72, 1969

- [187] Watkinson R. K., Plack Ch. J., Fantini D. A., *Pitch shift for complex tones with unresolved harmonics and the implications for models of pitch perception*, JASA, 118, 934-945, 2005
- [188] Whitfield I. C., *Central nervous processing in relation to spatiotemporal discrimination of auditory patterns*, Frequency Analysis and Periodicity Detection in Hearing, ed. R. Plomp, G.F. Smoorenburg, Sijthof, Leiden, 1970
- [189] Wiegrecbe, L., *Searching for the time constant of neural pitch extraction*, JASA, 109, 1082–1091, 2001
- [190] Wiegrecbe, L., and Meddis, R., *The representation of periodic sounds in simulated sustained chopper units of the ventral cochlear nucleus*, JASA, 115, 1207–1218, 2004
- [191] Wiener F. M., Ross D. A., *The pressure distribution in the auditory canal in a progressive sound field*, JASA, 18, 401-408, 1946
- [192] Wightman F. L., *The pattern-transformation model of pitch*, JASA, 54, 407-416, 1973
- [193] Yost, W. A., Patterson, R. D., and Sheft, S., *A time domain description for the pitch strength of iterated rippled noise*, JASA, 99, 1066–1078, 1996
- [194] Zwicker E., *Der ungewöhnliche Amplitudengang der nichtlinear Verzerrungen den Ohres*, Acustica 5, 67-74, 1955
- [195] Zwicker E., *Der kubische Differenzton und die Erregung des Gehörs*, Acustica, 20, 206-209, 1967
- [196] Zwicker E., Fastl H., *Psychoacoustics: Facts and Models*, Springer-Verlag, Heidelberg, Germany, 1990
- [197] Zurek P. M., Leshowitz B. H., *Measurements of the combinations tones f_2-f_1 and $2f_1-f_2$* , JASA, 60, 155-168, 1976
- [198] Żera J., *Udział składowych harmoniczných w tworzeniu wysokości dźwięku*, Praca doktorska, Wrocław, 1989

DODATEK

Do statystycznej analizy wyników badań użyto następujących testów:

Jarque'a-Bera

Test normalności rozkładu z próby n elementów x_i o średniej \bar{x} . Bazuje na statystyce, której postać jest następująca:

$$JB = \frac{n}{6} \left[S^2 + \frac{(K-3)^2}{4} \right]$$

gdzie:

S – współczynnik skośności

$$S = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^3}{\left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right]^{\frac{3}{2}}}$$

K – współczynnik kurtozy

$$K = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^4}{\left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right]^2}$$

Hipotezę zerową H_0 o normalności rozkładu próby testuje się wobec hipotezy alternatywnej H_1 o braku normalności rozkładu. Statystyka JB ma rozkład χ^2 o wartości krytycznej 5,991. Jeśli $JB > 5,991$ hipotezę zerową odrzucamy.

Bartletta

Test służący do określenia jednorodności wariancji pomiędzy k grupami o n_i elementach charakteryzujących się rozkładem normalnym, gdzie x_{ij} określa pojedynczy wynik z próby ($i=1,2,\dots,k; j=1,2,\dots,n$), a \bar{x}_i ich średnią. Test Bartletta bazuje na charakterystyce $\chi^2(k-1)$ o postaci:

$$\chi^2 = \frac{2,303}{c} \left[(n-k) \log \tilde{s}^2 - \sum_{i=1}^k (n_i - 1) \log \hat{s}_i^2 \right]$$

gdzie:

$$c = 1 + \frac{1}{3(k-1)} \left(\sum_{i=1}^k \frac{1}{n_i - 1} - \frac{1}{n-k} \right)$$

$$\tilde{s}^2 = \frac{1}{n-k} \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (x_{ij} - \bar{x}_i)^2$$

$$\hat{s}_i^2 = \frac{1}{n_i - 1} \sum_{j=1}^{n_i} (x_{ij} - \bar{x}_i)^2$$

Hipotezę zerową H_0 o braku różnic w wariancjach testuje się wobec hipotezy alternatywnej H_1 o istniejącej różnicy w wariancjach. Jeżeli $\chi^2 \geq \chi^2_{kr}$ to hipotezę zerową odrzucamy

Jednoczynnikowa ANOVA

Test służący do zbadania wpływu danego czynnika o a poziomach na równość średnich pochodzących z k grup o n_i elementach, gdzie x_{ij} określa pojedynczy wynik z próby ($i=1,2,\dots,k; j=1,2,\dots,n$), a \bar{x}_i ich średnią. Test bazuje na statystyce Fishera $F(k-1, n-k)$:

$$F = \frac{s_1^2}{s_2^2}$$

gdzie:

$$s_1^2 = \sum_{i=1}^k (\bar{x}_i - \bar{\bar{x}})^2 n_i$$

$$s_2^2 = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (x_{ij} - \bar{x}_i)^2$$

$$\bar{x}_i = \frac{1}{n_i} \sum_{j=1}^{n_i} x_{ij}$$

$$\bar{\bar{x}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} x_{ij}$$

Hipotezę zerową H_0 o braku różnic w średnich testuje się wobec hipotezy alternatywnej H_1 o istnieniu różnic w średnich. Jeżeli $F \geq F_{kr}$ to hipotezę zerową odrzucamy.

Kruskala-Wallisa

Nieparametryczny test, odpowiednik jednoczynnikowej ANOV-y, który bada wpływ czynnika o a poziomach na różnice pomiędzy wynikami uzyskanymi w eksperymencie. Test nie wymaga normalności rozkładu wyników eksperymentu. Procedura obliczeniowa przebiega następująco:

- 1) wszystkie wyniki są szeregowane od najmniejszego do największego
- 2) każdemu wynikowi x_{ij} z tego szeregu przypisywane są kolejne rangi R_{ij} o wartości od 1 do n (gdzie n jest liczbą wszystkich obserwacji)
- 3) dla wyników na i -tym poziomie czynnika wyznacza się sumę rang

$$R_i = \sum_{j=1}^{n_i} R_{ij}$$

gdzie

R_{ij} – ranga j -tej obserwacji na i -tym poziomie czynnika

- 4) wyznaczana jest statystyka testowa, która bazuje na rozkładzie $\chi^2(a-1)$, o postaci:

$$W = \frac{\left[\frac{12}{n(n+1)} \sum_{i=1}^a n_i R_i \right] - 3(n+1)}{1 - \frac{\sum_{k=1}^m u_k^3 - \sum_{k=1}^m u_k}{n(n^2 - 1)}}$$

gdzie:

u_k – liczba powtórzeń obserwacji powiązanych taką samą rangą

m – liczba grup o takich samych rangach

Hipotezę zerową H_0 o braku różnic w średnich testuje się wobec hipotezy alternatywnej H_1 o istnieniu różnic w średnich. Jeżeli $W \geq \chi^2_{kr}$ to hipotezę zerową odrzucamy.