



AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA

im. Stanisława Staszica w Krakowie

**WYDZIAŁ INŻYNIERII
MECHANICZNEJ I ROBOTYKI**

Magisterska praca dyplomowa

Paweł Synowiec

Imię i nazwisko

Inżynieria Akustyczna

Kierunek studiów

**Analiza i parametryzacja sygnałów akustyki
nieliniowej**

Temat pracy dyplomowej

Dr inż. Bartosz Ziółko

Promotor pracy

.....
*Ocena, data,
podpis Promotora*

Kraków, rok 2012/2013

Kraków,

Imię i nazwisko: Paweł Synowiec
Nr albumu: 220060
Kierunek studiów: Inżynieria Akustyczna
Specjalność: Inżynieria dźwięku w mediach i kulturze

OŚWIADCZENIE

Świadomy/a odpowiedzialności karnej za poświadczanie nieprawdy oświadczam,

że niniejszą magisterską pracę dyplomową wykonałem/łam osobiście i samodzielnie oraz nie korzystałem/łam ze źródeł innych niż wymienione w pracy.

Jednocześnie oświadczam, że dokumentacja praca nie narusza praw autorskich w rozumieniu ustawy z dnia 4 lutego 1994 roku o prawie autorskim i prawach pokrewnych (Dz. U. z 2006 r. Nr 90 poz. 631 z późniejszymi zmianami) oraz dóbr osobistych chronionych prawem cywilnym. Nie zawiera ona również danych i informacji, które uzyskałem/łam w sposób niedozwolony. Wersja dokumentacji dołączona przeze mnie na nośniku elektronicznym jest w pełni zgodna z wydrukiem przedstawionym do recenzji.

Zaświadczam także, że niniejsza magisterska praca dyplomowa nie była wcześniej podstawą żadnej innej urzędowej procedury związanej z nadawaniem dyplomów wyższej uczelni lub tytułów zawodowych.

.....
podpis dyplomanta

Kraków,

Imię i nazwisko: Paweł Synowiec

Adres korespondencyjny: ul. Sportowa 39, 32-040 Świątniki Górne

Temat magisterskiej pracy dyplomowej: Analiza i parametryzacja sygnałów akustyki nieliniowej

Rok ukończenia: 2013

Nr albumu: 220060

Kierunek studiów: Inżynieria Akustyczna

Specjalność: Inżynieria dźwięku w mediach i kulturze

OŚWIADCZENIE

Niniejszym oświadczam, że zachowując moje prawa autorskie, udzielam Akademii Górniczo-Hutniczej im. S. Staszica w Krakowie nieograniczonej w czasie nieodpłatnej licencji niewyłącznej do korzystania z przedstawionej dokumentacji magisterskiej pracy dyplomowej, w zakresie publicznego udostępniania i rozpowszechniania w wersji drukowanej i elektronicznej.

Kraków,

data

podpis

dyplomanta

ⁱ Na podstawie Ustawy z dnia 27 lipca 2005 r. Prawo o szkolnictwie wyższym (Dz.U. 2005 nr 164 poz. 1365) Art. 239. oraz Ustawy z dnia 4 lutego 1994 r. o prawie autorskim i prawach pokrewnych (Dz.U. z 2000 r. Nr 80, poz. 904, z późn. zm.) Art. 15a. "Uczelni w rozumieniu przepisów o szkolnictwie wyższym przysługuje pierwszeństwo w opublikowaniu pracy dyplomowej studenta. Jeżeli uczelnia nie opublikowała pracy dyplomowej w ciągu 6 miesięcy od jej obrony, student, który ją przygotował, może ją opublikować, chyba że praca dyplomowa jest częścią utworu zbiorowego."

Kraków, dnia

**AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA
WYDZIAŁ INŻYNIERII MECHANICZNEJ I ROBOTYKI**

TEMATYKA MAGISTERSKIEJ PRACY DYPLOMOWEJ
dla studenta II roku studiów stacjonarnych

Paweł Synowiec

imię i nazwisko studenta

TEMAT MAGISTERSKIEJ PRACY DYPLOMOWEJ:

Analiza i parametryzacja sygnałów akustyki nieliniowej

Promotor pracy: dr inż. Bartosz Ziółko

Recenzent pracy: dr hab. inż. Wiesław Wszolek

.....
Podpis dziekana:

Miejsce praktyki dyplomowej: nie dotyczy

PROGRAM PRACY I PRAKTYKI DYPLOMOWEJ

1. Omówienie tematu pracy i sposobu realizacji z promotorem.
2. Zebranie i opracowanie literatury dotyczącej tematu pracy.
3. Praktyka dyplomowa:
 - a.
 - b.
 - c.
 - d.
4. Zebranie i opracowanie wyników badań.
5. Analiza wyników badań, ich omówienie i zatwierdzenie przez promotora.
6. Opracowanie redakcyjne.

Kraków, 19.10.2014

data

podpis dyplomanta

TERMIN ODDANIA DO DZIEKANATU:

..... 20..... r.

.....
podpis promotora

Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki

Kraków, 19.10.2014

Kierunek: Inżynieria Akustyczna

Specjalność: Inżynieria dźwięku w mediach i kulturze

Paweł Synowiec

Magisterska praca dyplomowa

Analiza i parametryzacja sygnałów akustyki nieliniowej

Opiekun: dr inż. Bartosz Ziółko

STRESZCZENIE

Niniejsza praca opisuje próbę stworzenia metody analizy dźwięków wystrzałów i wybuchów pod kątem znalezienia cech charakterystycznych dla tych sygnałów. Założeniem projektu było stworzenie parametrów liczbowych, w prosty sposób opisujących sygnały, tak aby można było łatwo je użyć w synteźatorze takich dźwięków na potrzeby gier komputerowych. W badaniu skupiono się na parametrach pozwalających na klasyfikację sygnałów do dwóch grup dźwięków: wybuchów lub wystrzałów. Badanie przeprowadzono na 85 nagraniach dostępnych w sieci internetowej, w tym 47 wystrzałów oraz 38 wybuchów. W pracy podjęto próbę zastosowania do analizy nieliniowych sygnałów metody znane z analizy mowy lub zaproponowano własne algorytmy analizy stworzone na potrzeby badania. Testy podzielono na badanie w dziedzinie czasu oraz częstotliwości. Wartości wyznaczonych parametrów zostały zebrane dla każdej grupy i następnie zestawione w celu wybrania tych, które jednoznacznie pozwalają określić czy dany sygnał brzmi jak wybuch bądź wystrzał. W pracy przedstawiono wszystkie użyte metody, przedstawiono zaproponowane algorytmy, ich wyniki oraz dokonano dyskusji wyników i wnioski na dalsze badania w tej dziedzinie.

Faculty of Mechanical Engineering and Robotics

Field of Study: Acoustical Engineering

Specialisations: Sound Engineering in media and culture

Paweł Synowiec

Master Diploma Thesis

Analysis and parametrization of non-linear acoustic signals

Supervisor: dr inż. Bartosz Ziółko

SUMMARY

This paper describes an attempt to create methods for the analysis of sounds of gunfire and explosions in terms of finding the characteristics of these signals. The main basis of the project was to create a simple numeric parameters, which describes the signals, so they can be easily used for digital synthesis of that kind of sounds for the purpose of computer games. The study focused on the parameters which allow the classification signals to the two groups of sounds: explosion or gunfire. The analysis was performed on 85 recordings available on the Web, including 47 shots and 38 explosions. The paper attempts to analyze the non-linear signals using analysis methods known from speech recognition algorithms or using analysis algorithms developed for the study. The tests were divided into the time domain analysis and the frequency domain analysis. The values of the derived parameters were collected for each group and then compiled in order to select those that explicitly allow you to specify whether the signal sounds like an explosion or gunshot. The paper presents all the methods presented the proposed algorithms and the results were discussed and conclusions for further research in this area was presented.

Serdecznie dziękuję mojemu promotorowi,
panu dr inż. Bartoszowi Ziółce, za wszelką
okazaną pomoc przy wykonaniu niniejszej
pracy. Dziękuję także moim rodzicom
i przyjaciołom za motywację oraz wsparcie
potrzebne do ukończenia pracy.

Spis treści

1	Wprowadzenie	13
1.1	Cele pracy	14
1.2	Zawartość pracy	14
2	Analiza zjawiska	15
2.1	Definicja wybuchu	15
2.2	Rodzaje wybuchów	16
2.3	Opis matematyczny zjawiska	16
2.4	Podział sygnałów do analizy	17
3	Badane Parametry	19
3.1	Analiza częstotliwościowa	20
3.1.1	Energia w pasmach	20
3.1.2	Środek ciężkości widma	20
3.2	Czas narastania sygnału	21
3.3	Czas opadania sygnału	23
3.4	Składowa harmoniczna	24
3.5	Współczynnik płaskości widma	25
4	Analiza wybuchów	26
4.1	Analiza częstotliwościowa	26
4.1.1	Energia w pasmach	26
4.1.2	Środek ciężkości widma	26
4.2	Czas narastania sygnału	27
4.3	Czas opadania sygnału	28
4.4	Składowa tonalna	31

4.5	Współczynnik płaskości widma	31
5	Analiza wystrzałów	35
5.1	Analiza częstotliwościowa	35
5.1.1	Energia w pasmach	35
5.1.2	Środek ciężkości widma	35
5.2	Czas narastania sygnału	36
5.3	Czas opadania sygnału	37
5.4	Składowa tonalna	37
5.5	Współczynnik płaskości widma	40
6	Analiza wyników i wnioski	44

Rozdział 1

Wprowadzenie

Rozwijający się rynek gier komputerowych zwraca coraz większą uwagę na realistyczne odwzorowanie akustyki i odgłosów otoczenia gracza. Dużą gałęzią tego rynku są gry akcji, w której bohater przemierza świat gry z bronią w ręku, w towarzystwie kanonad armat i wybuchów granatów. Stwarza to zapotrzebowanie na dźwięki tego rodzaju - wybuchów bomb, granatów i wystrzałów różnego rodzaju broni. Jednakże każdorazowe nagrania różnego rodzaju broni do kolejnych produkcji wiąże się z koniecznością wynajmowania tej broni, strzelnicy i opłacania personelu ją obsługującego. Jeszcze większe problemy napotyka się w przypadku nagrań wybuchów - uzyskanie tego typu dźwięków są często niemożliwe. Dodatkowo z uwagi na wyjątkowo wysokie ciśnienie akustyczne produkowane przez np. pistolet wymaga specjalnego sprzętu umożliwiającego poprawne zarejestrowanie tych sygnałów.

Bardzo ważną, a nie zawsze oczywistą kwestią jest także zjawisko odbiegających od rzeczywistości realiów gier komputerowych. Poprzez ostatnie kilkanaście lat filmy i gry komputerowe wykreowały w branży rozrywkowej i wpołyły do świadomości odbiorców zupełnie inne wyobrażenie o brzmieniu karabinu czy eksplozji, niż prawdziwe. Poniższy projekt ma w założeniu uwzględnienie tego zjawiska i skupienie się na analizie dźwięków pod kątem przemysłu rozrywkowego. Stworzenie narzędzia umożliwiającego łatwą syntezę efektów dźwiękowych pozwoliłoby na szybkie i tanie udźwiękowanie produkcji, zachowując jednak obecne standardy jakości.

1.1 Cele pracy

Celem pracy jest analiza sygnałów akustyki nieliniowej, w szczególności sygnałów wybuchów i wystrzałów. Podjęta została także próba stworzenia modelu klasyfikacji i parametryzacji sygnałów tego typu, mającego umożliwić rozróżnienie typu sygnałów i wykonanie syntezy tych dźwięków. Jako finalny cel projektu postawione zostało stworzenie zestawu parametrów charakteryzujących dźwięki: wystrzału i wybuchu, pozwalających na sklasyfikowanie danej próbki dźwiękowej. Wyznaczone parametry mają posłużyć jako baza kolejnego etapu pracy - do syntezy dźwięków, wskazując cechy kluczowe dla danego typu sygnału.

Pracę rozpoczęto od kompletowania bazy próbek dźwiękowych, służących za przedmiot analizy. Do pracy użyto rozpowszechnionych, darmowych nagrań dostępnych za pośrednictwem internetu przez serwisy przeznaczone do wymiany darmowych nagrań. Po skompletowaniu nagrań dokonano wstępnej selekcji, odrzucając nagrania przesterowane, zaszumione, lub brzmiące subiektywnie nieodpowiednio (nieefektywnie, nienaturalnie).

W oparciu o skompletowaną bazę nagrań wybuchów i wystrzałów, podjęty został proces analizy i próba wypracowania metodyki wyznaczania parametrów pozwalających na sklasyfikowanie dowolnego nagrania jako wystrzału bądź wybuchu. Wyznaczone parametry mają być podstawą do konstrukcji syntezy takich wybuchów, będąc wskazówką, które cechy sygnałów decydują o percepcji przez człowieka dźwięku jako wybuchu lub wystrzału.

1.2 Zawartość pracy

W rozdziale 2 przedstawiono opis i naturę zjawiska wybuchu. Dokonano analizy sygnału, przedstawiono jego matematyczny opis. W rozdziale 3 przedstawiono sposób analizowania sygnałów, zastosowanych narzędzi DSP, procesów przetwarzania przykładowych sygnałów i poszukiwanych wyników tej analizy. W rozdziale 4 przedstawiono zjawisko wybuchu. Pokazano także wykresy z analizy serii nagrań testowych. W rozdziale 5 przedstawiono zjawisko wystrzału. Pokazano wykresy z analizy serii nagrań testowych. W rozdziale 6 dokonano oceny wyników oraz wyciągnięto wnioski z przeprowadzonych analiz.

Rozdział 2

Analiza zjawiska

W rozdziale tym przedstawiono podstawowe informacje dotyczące zjawiska wybuchu.

2.1 Definicja wybuchu

Wybuchem nazywany jest wzrost objętości i uwolnienie energii w sposób gwałtowny, zazwyczaj z wytworzeniem wysokiej temperatury i uwolnieniem gazów. Odgłos wybuchu powiązany jest także ze zjawiskiem gromu dźwiękowego, występującego podczas rozchodzenia się fali dźwiękowej z prędkością naddźwiękową [7].

Wybuchy występują w naturze. Przyczyną ich jest gwałtowne wyrzucenie w przestrzeń gazów, wulkanicznych, lub wybuchy gwiazd. Głównym jednak obiektem badań poniższej pracy są wybuchy sztuczne, chemiczne. Wykoszystanie materiałów wybuchowych przez człowieka, w szczególności prochu, opiera się na tej samej zasadzie, co wybuchy występujące w naturze. Spowodowanemu przez gwałtowne spalanie się materiału wybuchowego uwolnieniu zawartej w nim ogromnej ilości energii często z towarzyszy ciepło, światło i dźwięk. Ten właśnie sygnał jest obiektem badań tej pracy. Materiały wybuchowe znalazły ogromne zastosowanie w wielu aspektach życia człowieka. Były one jednym z największych czynników rewolucjonizujących możliwości walki. Wynalezienie broni palnej i ładunków wybuchowych było przełomowym momentem w historii nowożytnej.

2.2 Rodzaje wybuchów

Wyróżnia się trzy rodzaje wybuchów:

- eksplozja

wybuch, fala reakcji chemicznych, rozprzestrzeniających się w materiale wybuchowym z prędkością ponaddźwiękową, powodujących powstanie w otaczającym go ośrodku fali uderzeniowej. Na jej czole występuje bardzo wysokie ciśnienie (do ok. 50 GPa) i temperatura

- deflagracja

spalanie (szybka reakcja utleniania), które propaguje się w danym materiale z prędkością niższą, niż wynosi prędkość dźwięku w tym materiale. Mechanizm deflagracji polega na przekazywaniu energii termicznej poprzez promieniowanie i przewodzenie ciepła od warstwy, w której zachodzi utlenianie do dalszych warstw. Przekazywana energia wywołuje reakcję w kolejnych warstwach materiału.

- detonacja

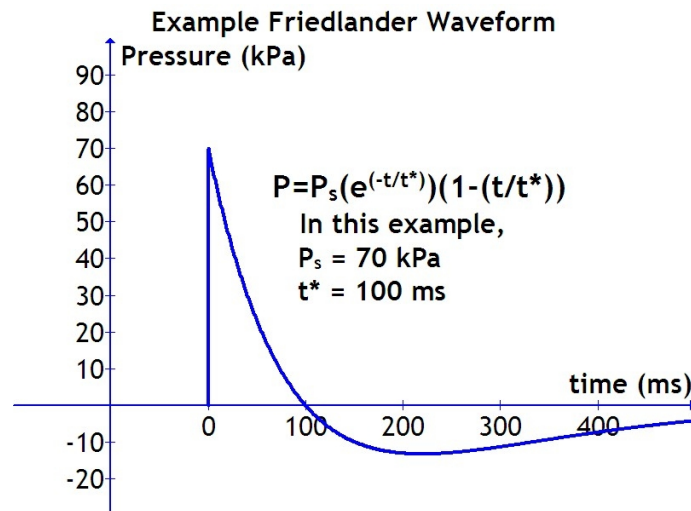
gwałtowny wybuch powodujący powstanie fali uderzeniowej rozchodzącej się z prędkością powyżej 400 m/s – ale poniżej maksymalnej prędkości możliwej dla danego materiału wybuchowego.

2.3 Opis matematyczny zjawiska

Eksplozja w powietrzu powoduje powstanie fali uderzeniowej, propagującej z prędkością naddźwiękową kuliście od miejsca wybuchu. Przyjęty model matematyczny, służący do opisu zjawiska, zakłada jednorodność ośrodka, w którym rozchodzi się zaburzenie, a źródło, z którego rozchodzi się fala symetryczne. Wynikiem tak przyjętego modelu jest idealna fala uderzeniowa, cechująca się rozkładem ciśnienia jak na rysunku 2.1 [1]

Zanim czoło fali osiąga dany punkt, ciśnienie wynosi p_0 , równe ciśnieniu atmosferycznemu. W chwili dotarcia czoła fali, ciśnienie rośnie do wartości szczytowej P_s^+ , a następnie opada do ciśnienia atmosferycznego, po czym wytwarza się chwilowe podciśnienie. Przedstawione zjawisko opisane zostało przez zmodyfikowane równanie Friedlanda [2]:

$$p(t) = p_0 + P_s^+ \left(1 - \frac{t}{T^+}\right) e^{\frac{-bt}{T^+}} \quad (2.1)$$



Rysunek 2.1: Wykres ciśnienia fali uderzeniowej

Istnieją wzory pozwalające określić wartość maksymalnego nadciśnienia fali podmuchowej w zależności od typu ładunku [3], jego kształtu i miejsca detonacji (w przestrzeni nieograniczonej lub przy powierzchni ziemi). Jednak ze względu na ogromną złożoność wszystkich elementów broni - takich jak konstrukcja ładunku, typ ładunku, miejsce detonacji, sposób rejestracji sygnału, odległość w jakiej sygnał został zarejestrowany - i ogromny ich wpływ na zarejestrowany sygnał dźwiękowy, analiza formalna i matematyczna tych zjawisk nie jest tematem niniejszej pracy. Z uwagi na powyższe autor zdecydował się skupić na analizie dostępnych w internecie nagrań, skupiając się na próbie znalezieniu różnic w zarejestrowanych sygnałach audio.

2.4 Podział sygnałów do analizy

Pracę rozpoczęto od kompletowania bazy próbek dźwiękowych, służących za przedmiot analizy. Do pracy użyto rozpowszechnionych, darmowych nagrań dostępnych za pośrednictwem internetu przez serwisy przeznaczone do wymiany tego typu nagrań, m.in. soundbible.com i freesound.org. Po skompletowaniu nagrań, dokonano wstępnej selekcji, odrzucając nagrania przesterowane, zaszumione, lub brzmiące subiektywnie nieodpowiednio. Ostatecznie jako materiał do badań posłużyło łącznie 85 nagrań, z czego 38 nagrań wybuchów oraz 47 wystrzałów. Wszystkie nagrania były w bezstratnym formacie .wav, o częstotliwości próbkowania minimum 44,1 kHz (za wyjątkiem dziewięciu nagrań

z częstotliwością 22 kHz) i przynajmniej 16 bitowej rozdzielczości (za wyjątkiem 4 nagrań z 8 bitową rozdzielczością).

Rozdział 3

Badane Parametry

W ramach przeprowadzanej analizy zdecydowano się na badanie przygotowanej bazy próbek pod kątem rozróżnienia sygnałów:

- wybuchów
- wystrzałów

Poniższy podział ma doprowadzić do stworzenia zestawu parametrów, pozwalających na jednoznaczne określenie i scharakteryzowanie danego sygnału, pozwalającego na zaklasyfikowanie ich jako wystrzału bądź wybuchu.

Na podstawie wstępnych eksperymentów i testów, zdecydowano się na badanie następujących parametrów:

- analiza częstotliwościowa
 - energia w pasmach
 - środek ciężkości widma
- czas narastania sygnału
- czas opadania sygnału
- składowa harmoniczna
- współczynnik płaskości widma

Do analizy sygnałów użyto metod znanych z algorytmów przetwarzania sygnałów bądź też analizy mowy. W niektórych przypadkach metody te zostały zmodyfikowane,

bądź też uproszczone. Należy pamiętać, że wiele metod dotyczących np. analizy mowy posiadają określone założenia, np. okresową stacjonarność sygnałów, których analizowane sygnały nie spełniają. W przypadku analizy sygnałów nieliniowych, podjęta została próba aplikacji tych metod do analizowanych sygnałów. Analiza częstotliwościowa oparta została o 32 pasma tercjowe, podobnie jak w algorytmach przetwarzania dźwięku. Środek ciężkości widma został użyty jako parametr określający główny punkt skupienia energii sygnałów. Czas narastania i opadania sygnału (zdefiniowany tak jak krzywe ataku i opadania w modelu ADSR - Attack, Decay, Sustain, Release) mają rozróżnić sygnały w dziedzinie czasu. Składowa harmoniczna to parametr określający, czy w badanym sygnale znaleźć można znamiona pewnej okresowości, a jeśli tak, to szukana jest częstotliwość o największej amplitudzie. Badanie to wykonywane było dla poszczególnych ramek sygnału o długości 50ms z zakładkowaniem 1/4. Współczynnik płaskości widma, jako parametr pomocniczy dla składowej harmonicznej, pozwala ocenić sygnały pod względem ich tonalności.

3.1 Analiza częstotliwościowa

3.1.1 Energia w pasmach

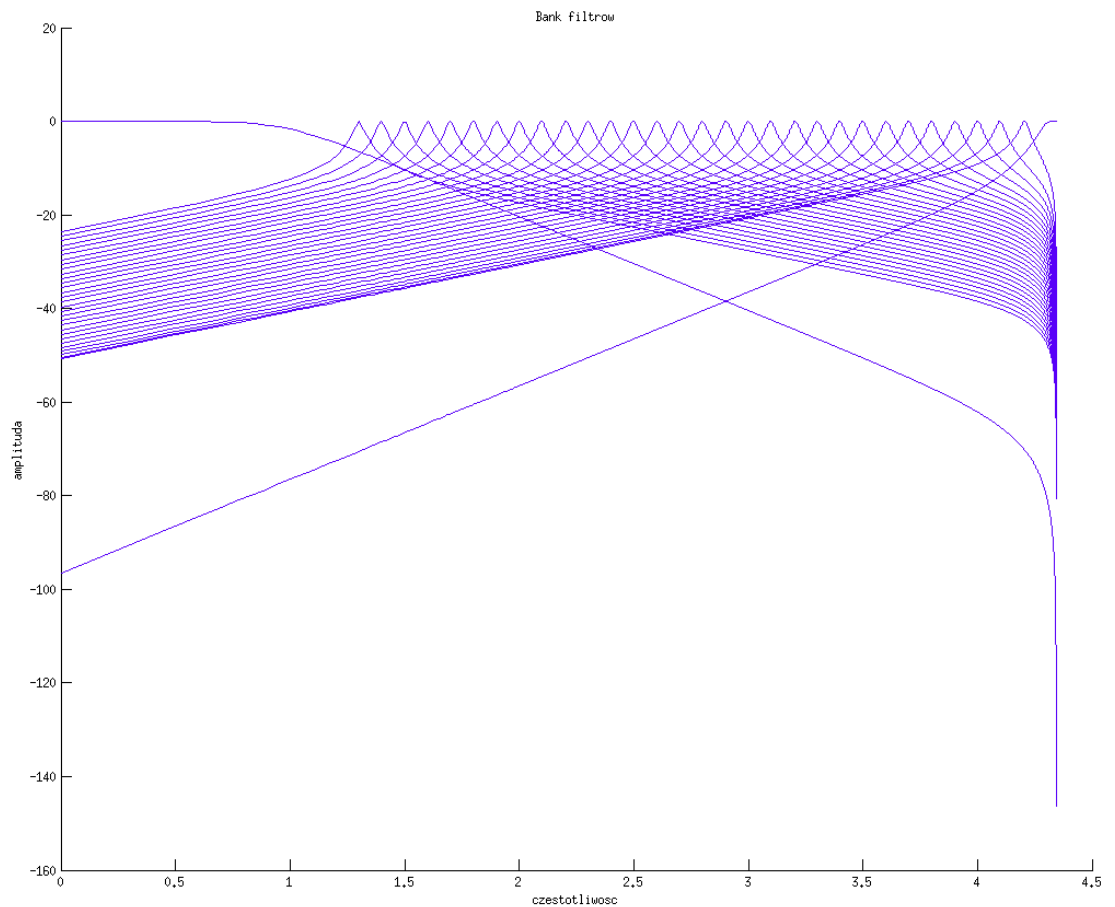
Analizę częstotliwościową przeprowadzono w 32 pasmach tercjowych, obejmujących zakres częstotliwości 0 - 20kHz. Zakres częstotliwości objętych badaniem podyktowany był zakresem słuchu człowieka (16Hz - 20kHz), poszerzony do 0Hz, aby analiza zawierała także badanie obecności składowej stałej sygnałów. Częstotliwości środkowe 32 pasm przedstawione zostały w tabeli 3.1. Wykres charakterystyki częstotliwościowej banku filtrów przedstawia rysunek 3.1.

3.1.2 Środek ciężkości widma

Analiza czasowo-częstotliwościowa została oparta na współczynniku środka ciężkości widma SC [5] (*ang. Spectral Centroid*), zdefiniowany jako:

$$SC = \frac{\sum_{n=0}^{N-1} f(n) \cdot x(n)}{\sum_{n=0}^{N-1} x(n)}, \quad (3.1)$$

gdzie $f(n)$ jest częstotliwością n -tego prążka DFT sygnału, a $x(n)$ jest amplitudą n -tego prążka DFT.



Rysunek 3.1: Charakterystyka częstotliwościowa filtrów

Analizowany sygnał podzielony został na ramki długości 50ms, dla których wyznaczona została wartość SC .

Bank filtrów oparty został o filtr Butterwortha 2 rzędu. Dobroć filtrów ustalona została na 1.0443. Filtry Butterwortha cechuje płaska charakterystyka pasma przepustowego. Wykorzystując implementację filtrów Butterwortha pakietu MATLAB wyznaczono wartości RMS dla każdego analizowanego pasma.

3.2 Czas narastania sygnału

Do badania czasu narastania sygnału autor zaproponował następującą metodę. Badana została prędkość narastania energii sygnału od początku wybuchu (umownie przyjęty jako moment przekroczenia 1% maksymalnej energii sygnału) aż do osiągnięcia 95% maksy-

Tablica 3.1: Pasma analizy częstotliwościowej

nr pasma	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$f_r[Hz]$	0	20	25	31.5	40	50	63	80	100	125
nr pasma	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$f_r[Hz]$	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250
nr pasma	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
$f_r[Hz]$	1600	2000	2500	3150	4000	5000	6300	8000	10000	12500
nr pasma	31	32								
$f_r[Hz]$	16000	20000								

malnej wartości energii chwilowej sygnału. Przyjęto następującą metodykę wyznaczania prędkości narastania sygnału:

1. Normalizacja energii sygnału

$$s(t) = \frac{s(t)}{RMS_{s(t)}} \quad (3.2)$$

Zabieg ten został zastosowany, aby dokonać normalizacji analizowanych sygnałów. Ze względu na występujące w dostępnych sygnałach zniekształcenia i różny ich poziom, zdecydowano się na normalizację każdego sygnału, aby wartość RMS każdego analizowanego sygnału wynosiła 1.

2. Określenie czasu narastania

Analizowany sygnał został ograniczony do czasu, w którym sygnał przekracza wartość 1% maksymalnej energii chwilowej aż do momentu, gdzie osiąga wartość 95% maksymalnej energii chwilowej. Zabieg taki pozwala na uzyskanie dokładniejszej aproksymacji funkcji eksponencjalnej do obwiedni sygnału. Ograniczenie do sygnału pomiędzy 1% i 95% zostało dobrane przez autora na podstawie wstępnych analiz, pozwalając odrzucić wahania amplitudy sygnału w stanach ustalonych; tj. okres ciszy, przed rozpoczęciem sygnału i po jego zakończeniu, oraz okres przesterowania, gdzie sygnał oscylował w okół maksymalnej wartości. Spadek energii do 1% i 95% odpowiada odpowiednio spadkom o 0.2 dB i 13 dB w stosunku do maksymalnej energii chwilowej. Proces ten ma za zadanie wyróżnić z nagrań moment pojawienia się sygnału, pomijając fragmenty ciszy bądź szumów.

3. Wyznaczenie obwiedni tego sygnału

Do wyznaczenia obwiedni sygnału wykorzystano algorytm Hilberta [4]. Obwiednia dowolnego sygnału dana jest zależnością:

$$s_{env}(t) = |H(s(t))|, \quad (3.3)$$

gdzie $H(s(t))$ jest transformacją Hilberta sygnału $s(t)$

4. Dopasowanie krzywej eksponencjalnej

Do obwiedni dopasowano funkcję eksponencjalną daną wzorem $f(x) = ae^{bx}$. Wartość parametru b wykorzystana będzie do porównania czasów narastania poszczególnych sygnałów.

Jako miara jakości dopasowania krzywej eksponencjalnej do obwiedni sygnału użyty został współczynnik determinacji [6]. Współczynnik determinacji jest miarą dopasowania modelu do danych. Zdefiniowany jest jako:

$$R^2 = \frac{\sum_{t=1}^n (\hat{y}_t - \bar{y})^2}{\sum_{t=1}^n (y_t - \bar{y})^2} \quad (3.4)$$

gdzie:

y_t - rzeczywista wartość zmiennej Y w momencie t , \hat{y}_t - wartość teoretyczna zmiennej objaśnianej (na podstawie modelu), \bar{y} - średnia arytmetyczna empirycznych wartości zmiennej objaśnianej. Współczynnik determinacji przyjmuje wartości $\langle 0,1 \rangle$, gdzie im dane lepiej dopasowane, tym wartość jest bliższa jedności.

3.3 Czas opadania sygnału

Do badania czasu opadania sygnału zdecydowano się zastosować podobną procedurę jak do analizy czasu narastania sygnału:

1. Normalizacja energii sygnału Normalizacja przeprowadzona została analogicznie jak powyżej, z zastosowaniem wzoru 3.2

2. Określenie czasu narastania

Analizowany sygnał został ograniczony do czasu, w którym sygnał poniżej 95%

maksymalnej energii chwilowej aż do osiągnięcia 1% wartości maksymalnej energii chwilowej. Zabieg taki pozwala na uzyskanie dokładniejszej aproksymacji funkcji eksponencjalnej do obwiedni sygnału.

3. Wyznaczenie obwiedni tego sygnału

Do wyznaczenia obwiedni sygnału wykorzystano algorytm Hilberta, według wzoru 3.3 Obwiednia dowolnego sygnału dana jest zależnością:

4. Dopasowanie krzywej eksponencjalnej

Do obwiedni dopasowano funkcję eksponencjalną daną wzorem $f(x) = ae^{bx}$. Wartość parametru b wykorzystana będzie do określenia stałej czasowej tej funkcji i określenia czasu opadania analizowanego sygnału.

3.4 Składowa harmoniczna

Badana została zawartość tonów harmonicznnych w sygnałach. Na tej podstawie określona jest jak bardzo szumowy lub tonalny charakter posiada dany sygnał.

Do wyznaczenia częstotliwości podstawowej w sygnale wykorzystano następującą procedurę, opartą na algorytmie detekcji tonu znanego z analizy mowy (PDA - Pitch Detection Algorithm), z różnicami jak podano poniżej:

1. Ramkowanie

W celu uzyskania dokładniejszych wyników, badane sygnały analizowane są w ramkach długości 50ms. Do analizy przyjęto zakładkowanie 1/4. Zdecydowano się poszerzyć znane z analizy mowy okna 20ms do długości 50ms, aby zwiększyć zakres badanych częstotliwości. Sygnał mowy jest sygnałem wąskopasmowym, natomiast badane sygnały posiadają energię zawartą bardziej równomiernie w całym paśmie. Użyte okno 50ms odpowiada długości fali o częstotliwości 20Hz.

2. Dopasowanie funkcji

Wykorzystując algorytm regresji metodą najmniejszych kwadratów. Dla każdej ramki sygnału dopasowana jest funkcja postaci:

$$y = \sum_{i=1}^n a_i \cdot \sin(b_i x + c_i), \quad (3.5)$$

gdzie a_i jest amplitudą, b_i pulsacją, a c_i jest fazą. Dla każdego dopasowania badany jest błąd. Jako miarę błędu użyto współczynnika determinacji R^2 . Jako wartość częstotliwości dominującej składowej harmonicznej dla ramek wyznaczono częstotliwość będącą medianą z wszystkich wyznaczonych wartości, dla których wartość współczynnika determinacji wynosi więcej niż 0.25.

3.5 Współczynnik płaskości widma

Dla każdego badanego sygnału wyznaczona została wartość współczynnika płaskości widma (SFM, ang. Spectral Flatness Measure). Współczynnik ten, zwany także współczynnikiem tonalności określa, jak tonalny charakter posiada badany przebieg, przyjmując wartości od 0 dla czystego tonu do 1 dla szumu białego. Wartość współczynnika wyznaczona jest wg zależności:

$$SFM = \frac{\exp\left(\frac{1}{N} \sum_{n=1}^{N-1} \ln x(n)\right)}{\frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n)}, \quad (3.6)$$

gdzie, $x(n)$ amplitudą n – tego prążka FFT.

Dla obydwu klas sygnałów wyznaczono także histogram wartości SFM, pokazujący jak rozkładają się jego wartości dla każdej z nich.

Dla każdej wartości wyznaczono standardowy błąd średniej, danej wzorem:

$$SEM = \frac{s}{\sqrt{n}}, \quad (3.7)$$

gdzie s jest odchyleniem standardowym, a n ilością obserwacji

Rozdział 4

Analiza wybuchów

Opisaną w rozdziale 3 procedurę analizy zastosowano do testowej bazy sygnałów. Poniżej przedstawiono wyniki.

4.1 Analiza częstotliwościowa

4.1.1 Energia w pasmach

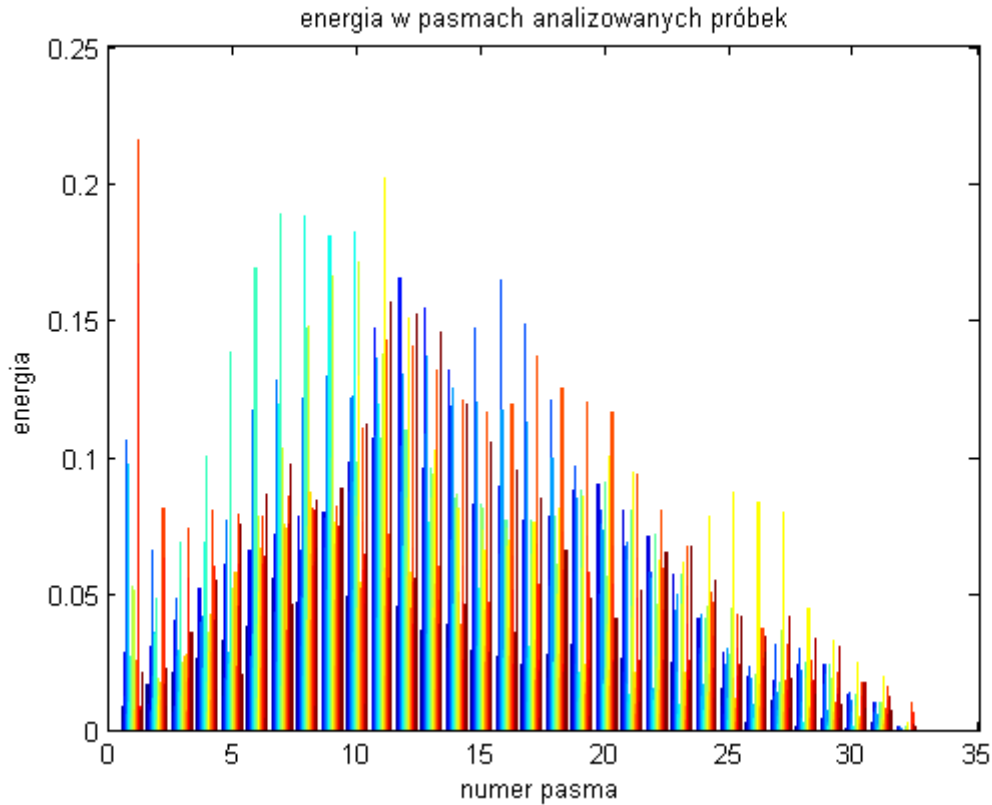
Wyniki przedstawione są na rysunku 4.1. Kolory reprezentują kolejne sygnały z bazy. Wartości średnie dla każdego pasma przedstawione są na rysunku 4.2. Łatwo zauważyć, że większość energii skumulowana jest w zakresie częstotliwości do ok. 400 Hz. Widać także obecność energii w paśmie zawierającym składową stałą - 0 Hz. Najwięcej energii przypada na pasma 10 i 11, czyli dla częstotliwości 125 - 160 Hz.

4.1.2 Środek ciężkości widma

Dla każdej analizowanej próbki wyznaczono wartość średniej geometrycznej częstotliwości środka ciężkości widma, wyznaczonej z każdej ramki sygnału. Wyniki analizy przedstawia tabela 4.1.

Tablica 4.1: Wyniki analizy środka ciężkości widma

	średnia	odchylenie standardowe
częstotliwość	2146Hz	844Hz



Rysunek 4.1: Energia w pasmach dla analizowanych nagrań

Standardowy błąd średniej, zdefiniowany jako:

$$SE = \frac{s}{\sqrt{(n)}}, \quad (4.1)$$

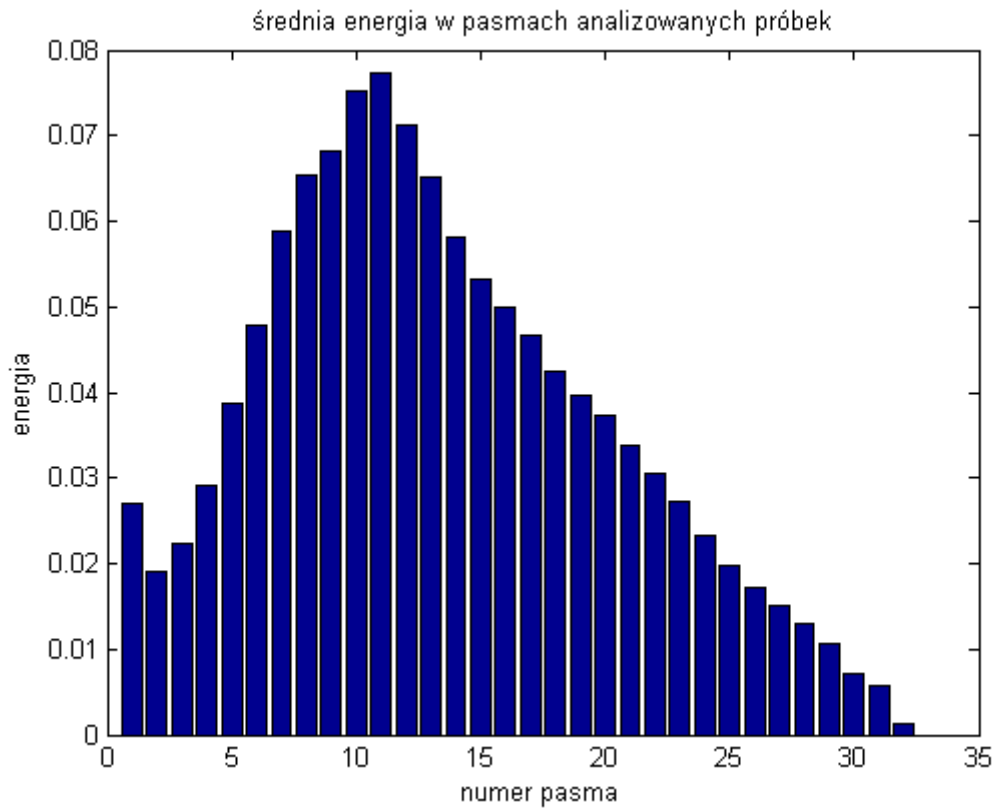
gdzie s - odchylenie standardowe próbki, n - wielkość próbki, wynosi $137Hz$.

4.2 Czas narastania sygnału

Dla badanych sygnałów wyznaczono stałą czasową dla funkcji eksponencjalnej dopasowanej do danych. Rysunek 4.3 przedstawiona przykładowe wyniki przeprowadzonej analizy.

Dla badanych sygnałów sprawdzano dokładność dopasowania. Dopasowanie na poziomie współczynnika determinacji większego niż 0.25 udało się uzyskać dla 42% badanych próbek.

Wartość błędu standardowego wynosi $0.08s$.



Rysunek 4.2: Średnia energia w pasmach dla analizowanych nagrań

Tablica 4.2: Wyniki analizy czasu narastania sygnału

	średnia	odchylenie standardowe	mediana
czas	0.15s	0.5s	0.016s

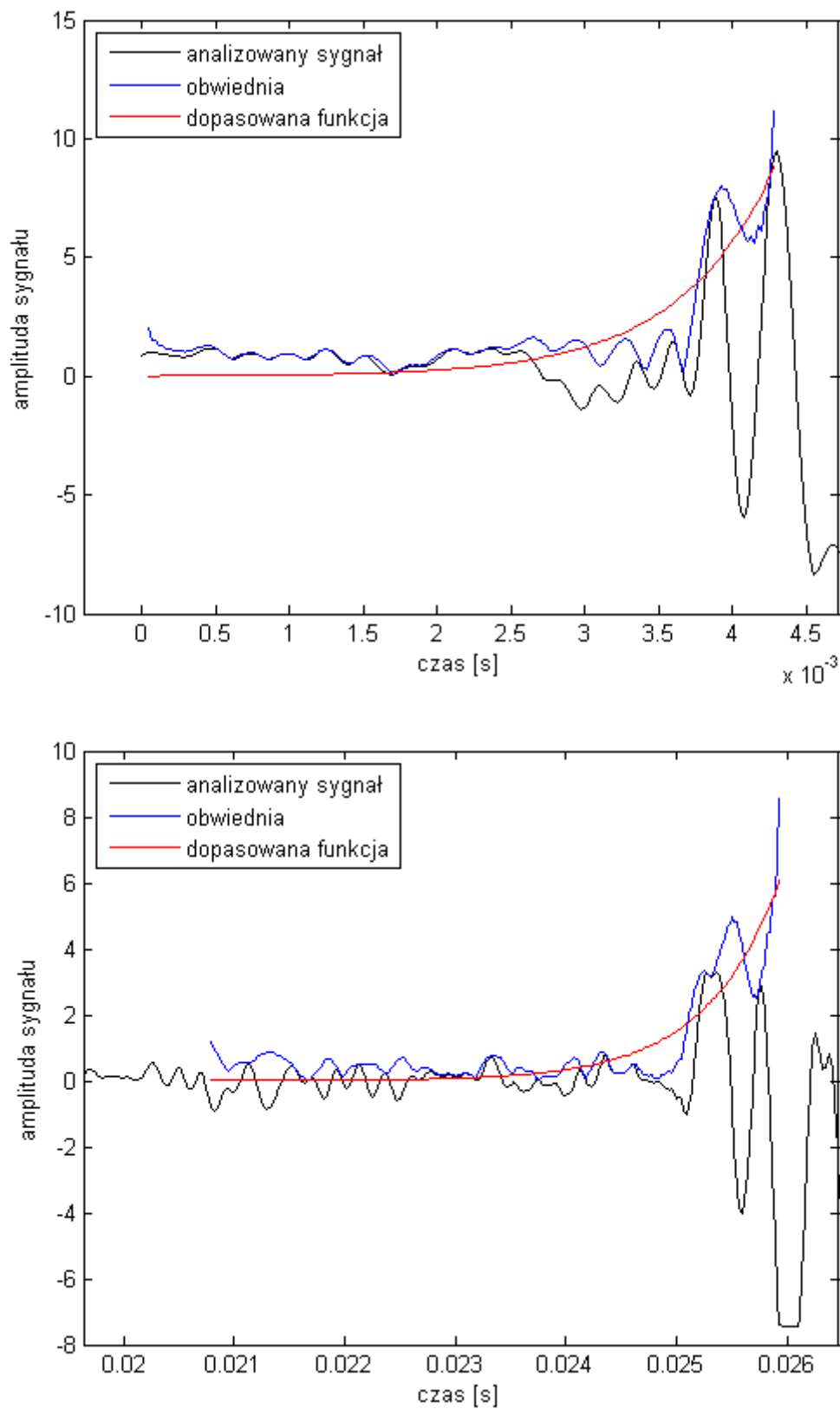
4.3 Czas opadania sygnału

Przykładowe wyniki analizy nagrań testowych przedstawione są na rysunku 4.4. Dopasowanie funkcji na poziomie wyższym niż 0.25 uzyskano dla 79% badanych próbek. Można zauważyć, że sygnały cechują się eksponencjalnym narastaniem sygnału, chociaż wysoka wartość odchylenia standardowego wskazuje, że sygnały w tym parametrze posiadają dużą rozpiętość.

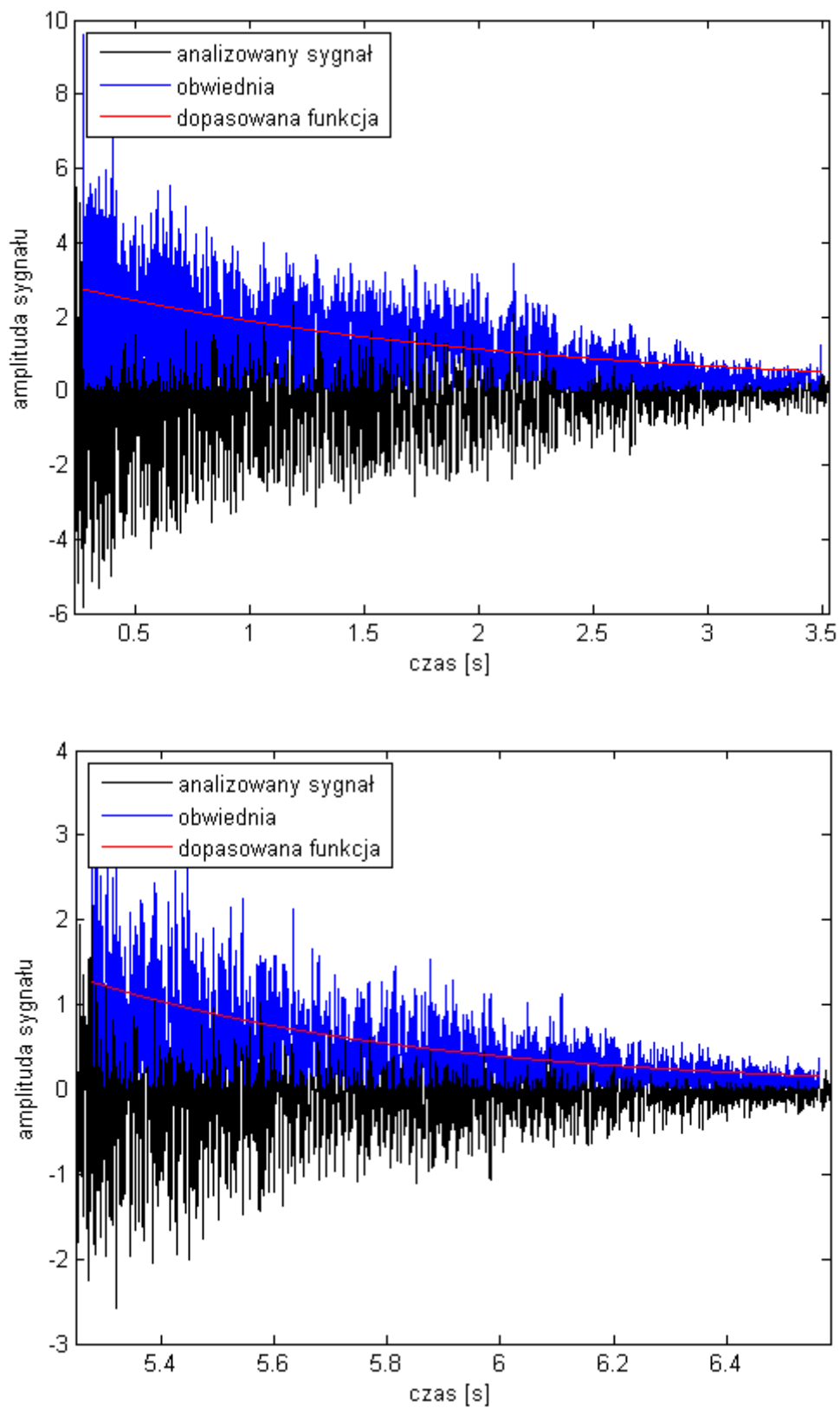
Tablica 4.3: Wyniki analizy czasu opadania sygnału

	średnia	odchylenie standardowe	mediana
czas	0.97s	0.71s	0.74s

Błąd standardowy wyznaczonej wartości średniej wynosi 0.12s.



Rysunek 4.3: Wyznaczanie czasu narastania sygnału



Rysunek 4.4: Wyznaczanie czasu opadania sygnału

4.4 Składowa tonalna

Wykorzystując przedstawioną w rozdziale 3 procedurę analizy otrzymano wartości składowych tonalnych. Jak wykazała analiza, badając sygnały w ramach, widoczna staje się pewna dominująca składowa tonalna. Rysunek 4.5 przedstawia przykłady dopasowania do ramek sygnału. Dopasowanie na poziomie współczynnika determinacji wyższym niż 0.25 udało się uzyskać dla wszystkich nagrań.

Tablica 4.4: Wyniki analizy częstotliwości składowej tonalnej

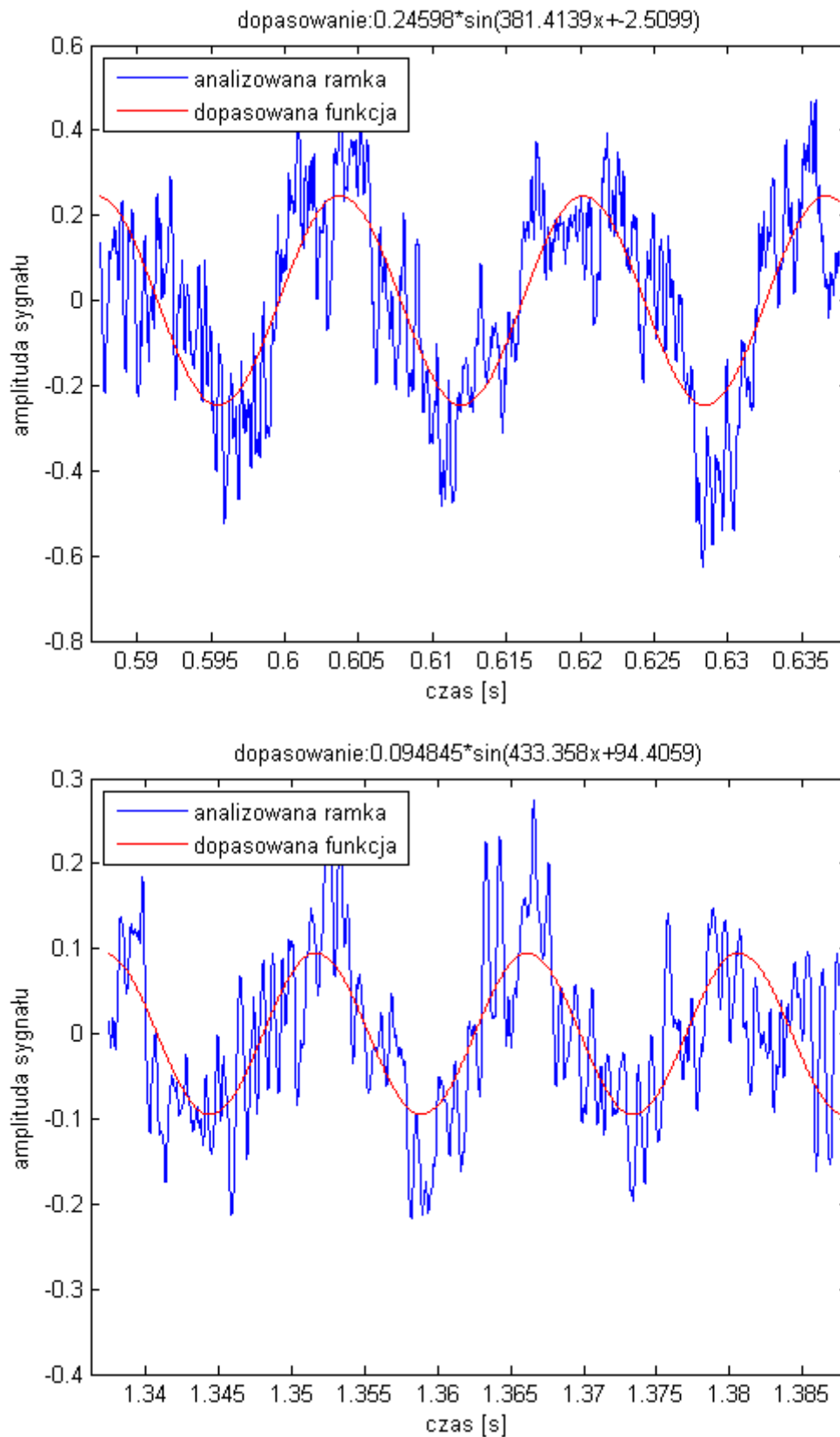
	średnia	odchylenie standardowe	mediana
częstotliwość	138Hz	226Hz	100Hz

Błąd standardowy średniej wynosi 43.15Hz.

Jak wynika z analizy, wartości średniej arytmetycznej nie oddają dobrze statystyki danych, wprowadzono więc wartość mediany jako wyznacznika najczęściej pojawiającej się wartości. Uzyskane wartości zgadzają się z wynikami analizy pasmowej, gdzie wykazane zostało, że najwięcej energii zgromadzone jest w pasmach 125 - 160 Hz.

4.5 Współczynnik płaskości widma

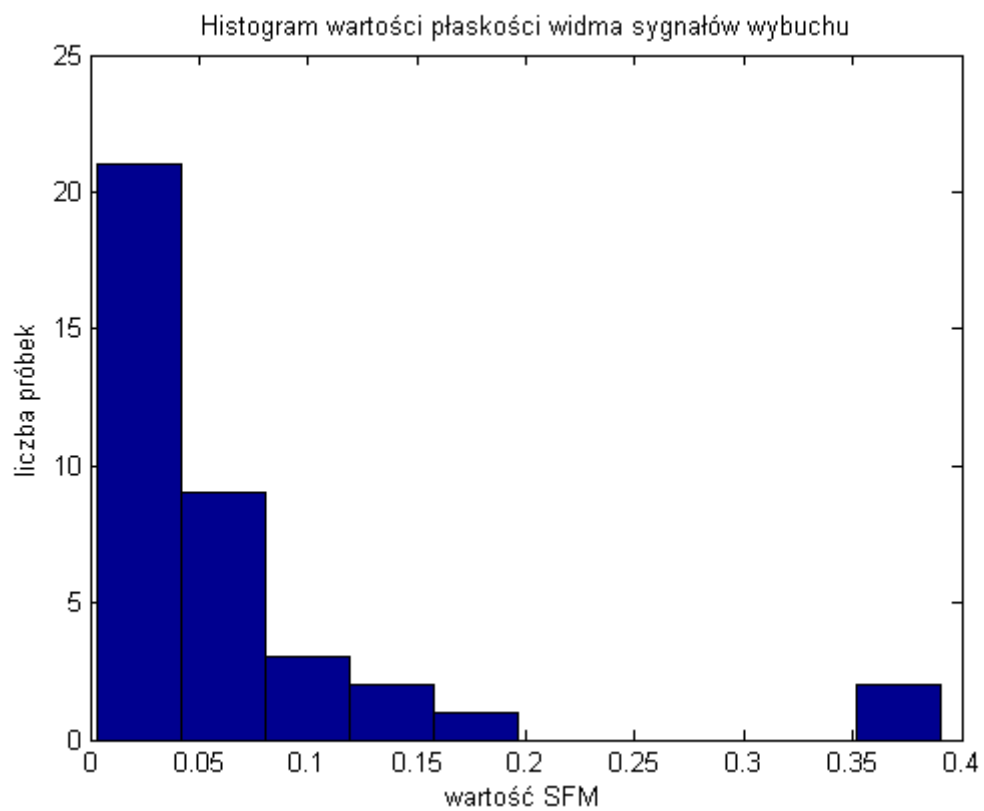
Stosując formułę przedstawioną w rozdziale 3 wyznaczono wartości SFM dla każdej z badanych próbek. Wyniki przedstawione zostały na rysunku 4.6. Histogram wartości SFM przedstawiony jest na rysunku 4.7. Jak widać, większość próbek cechuje niska wartość SFM, poniżej 0.2, co wskazuje na tonalny charakter sygnału.



Rysunek 4.5: Wyznaczanie częstotliwości składowej tonalnej



Rysunek 4.6: Wartości SFM dla poszczególnych próbek



Rysunek 4.7: Histogram wartości SFM

Rozdział 5

Analiza wystrzałów

Opisaną w rozdziale 3 procedurę analizy zastosowano do testowej bazy sygnałów. Poniżej przedstawiono przykładowe wyniki.

5.1 Analiza częstotliwościowa

5.1.1 Energia w pasmach

Wykorzystując implementację banku filtrów FIR 6 rzędu pakietu MATLAB wyznaczono wartości RMS każdego pasma. Wyniki przedstawione są na rysunku 5.1. Wartości średnie dla każdego pasma przedstawione są na rysunku 5.2.

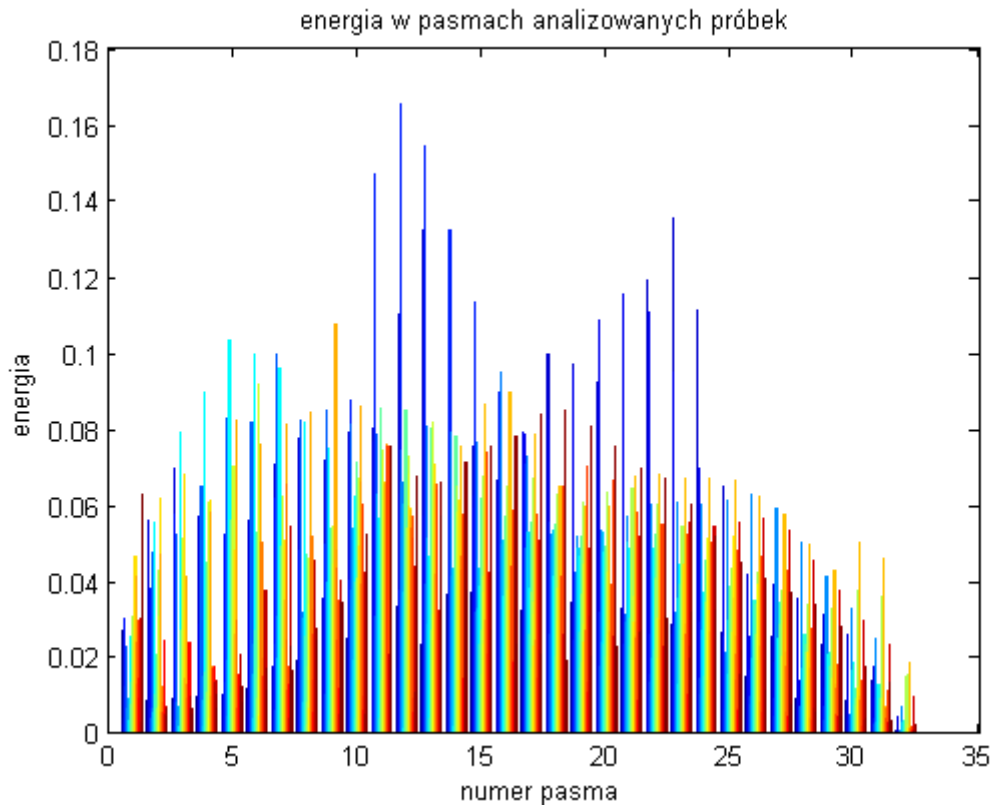
5.1.2 Środek ciężkości widma

Dla każdej analizowanej próbki wyznaczono średnią geometryczną wartość częstotliwości środka ciężkości widma, wyznaczonej z każdej ramki sygnału. Wyniki analizy przedstawia tabela 5.1.

Tablica 5.1: Wyniki analizy środka ciężkości widma

	średnia	odchylenie standardowe
częstotliwość	2447Hz	797Hz

Błąd standardowy średniej wynosi 116.25Hz.



Rysunek 5.1: Energia w pasmach dla analizowanych nagrań

5.2 Czas narastania sygnału

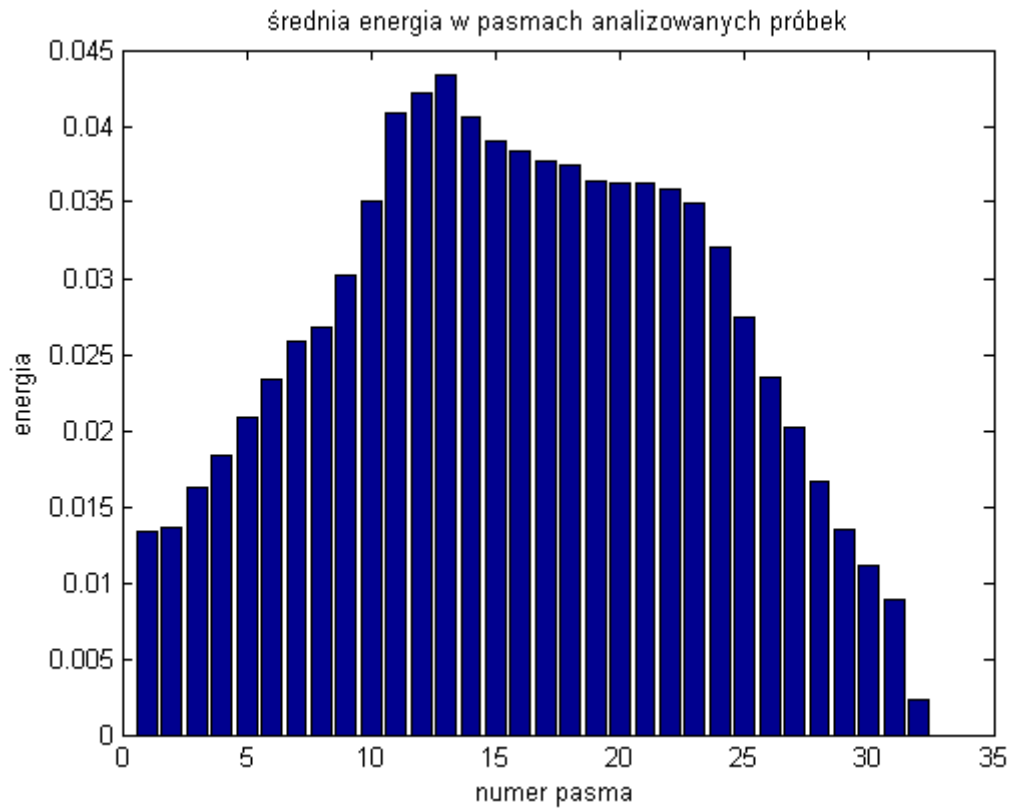
Dla badanych sygnałów wyznaczono stałą czasową dla funkcji eksponencjalnej dopasowanej do danych. Rysunek 5.3 przedstawiona przykładowe wyniki przeprowadzonej analizy.

Dla badanych sygnałów sprawdzano dokładność dopasowania. Dopasowanie na poziomie współczynnika determinacji większego niż 0.25 udało się uzyskać dla 51% badanych próbek.

Tablica 5.2: Wyniki analizy częstotliwości składowej tonalnej

	średnia	odchylenie standardowe	mediana
czas	0.008s	0.011s	0.004s

Wartość błędu standardowego średniej wynosi 0.0016s.



Rysunek 5.2: Średnia energia w pasmach dla analizowanych nagrań

5.3 Czas opadania sygnału

Przykładowe wyniki analizy nagrań testowych przedstawione są na rysunku 5.4. Dopasowanie funkcji na poziomie determinacji wyższym niż 0.25 uzyskano dla 77% badanych próbek.

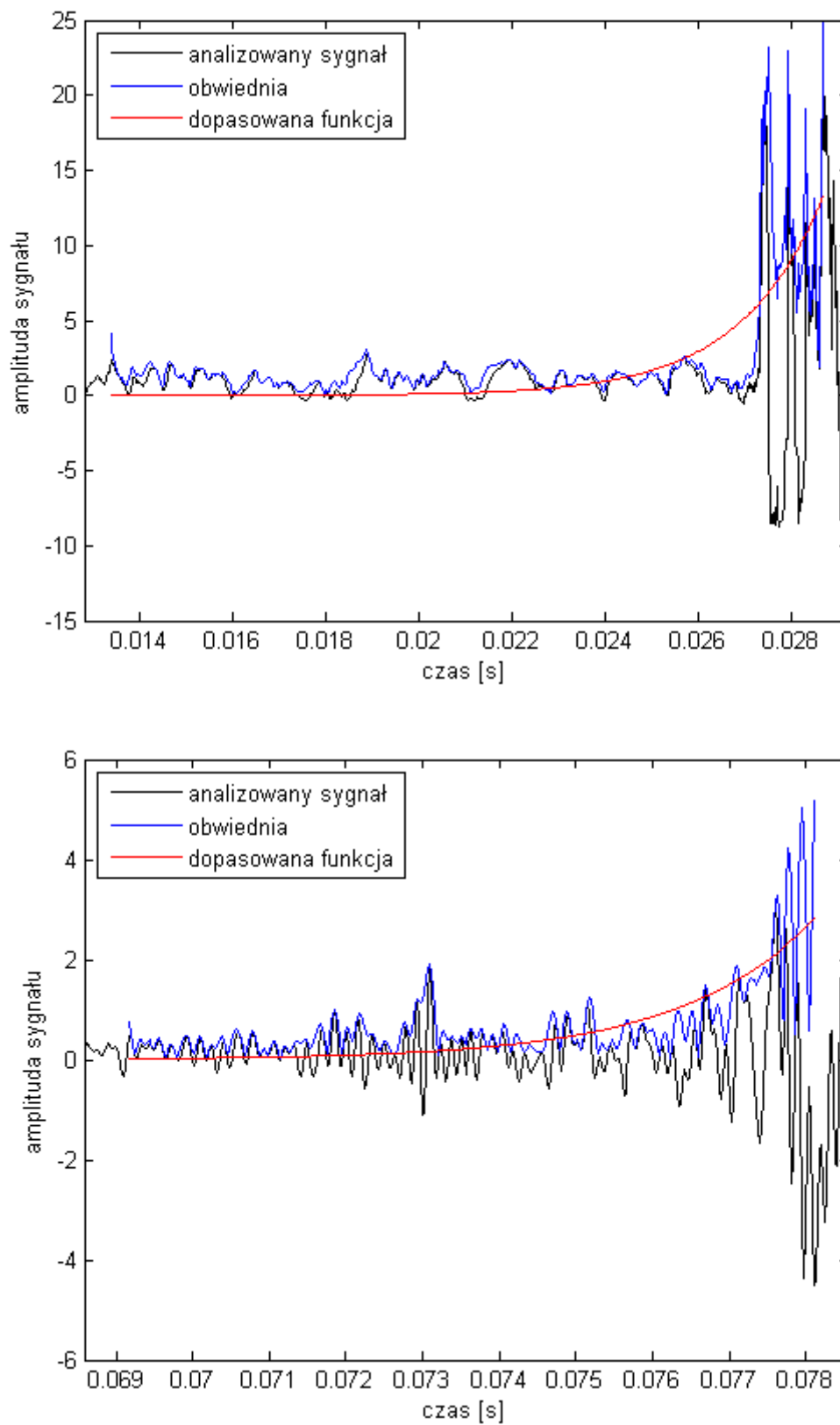
Tablica 5.3: Wyniki analizy częstotliwości składowej tonalnej

	średnia	odchylenie standardowe	mediana
czas	0.32s	0.26s	0.25s

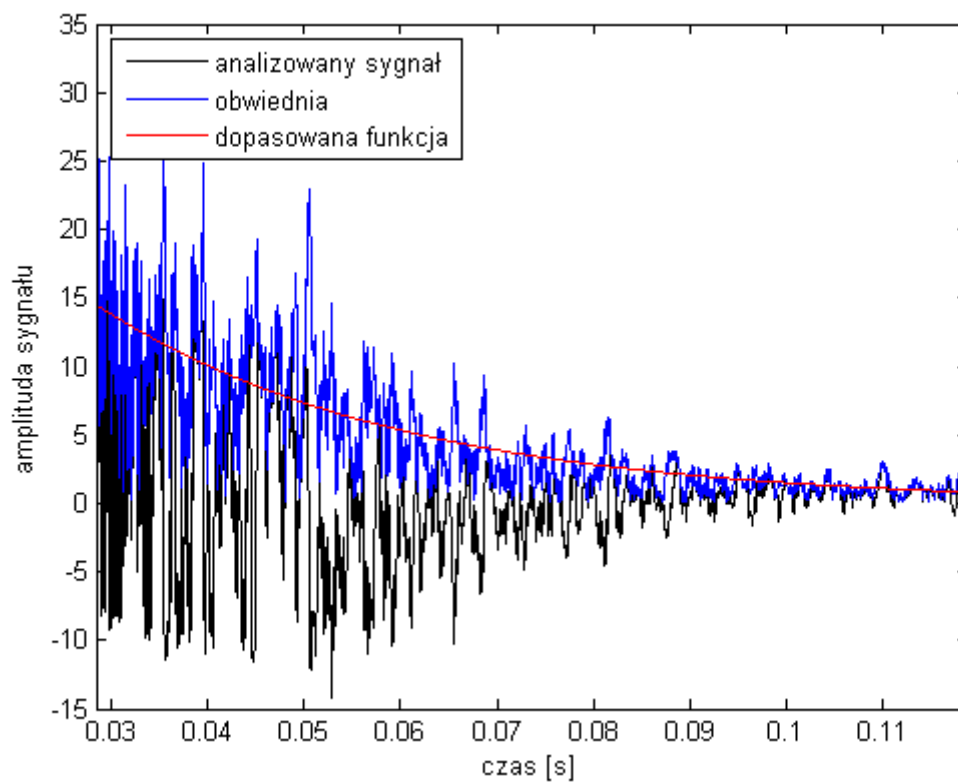
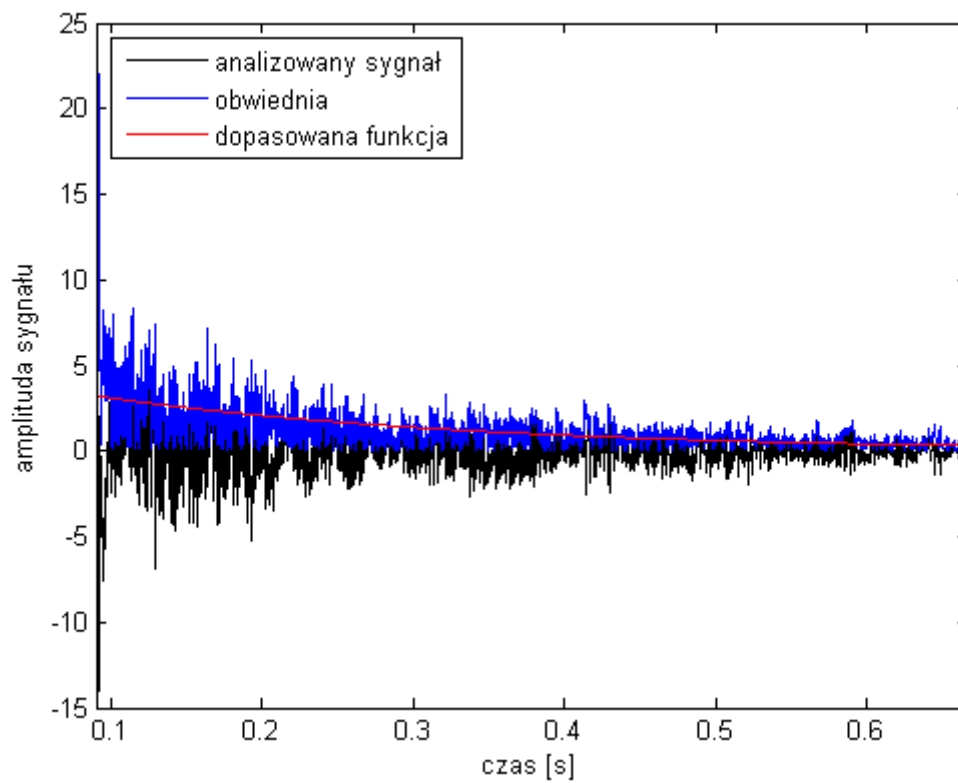
Wartość błędu standardowego średniej wynosi 0.038s.

5.4 Składowa tonalna

Wykorzystując przedstawioną w rozdziale 3 procedurę analizy otrzymano wartości składowych tonalnych. Jak wykazała analiza, badając sygnały w ramach, widoczna staje się pewna dominująca składowa tonalna. Rysunek 5.5 przedstawia przykłady dopasowania



Rysunek 5.3: Wyznaczanie czasu nastania sygnału



Rysunek 5.4: Wyznaczanie czasu natastania sygnału

do ramek sygnału. Dopasowanie na poziomie współczynnika determinacji wyższym niż 0.25 udało się uzyskać dla 83% nagrań.

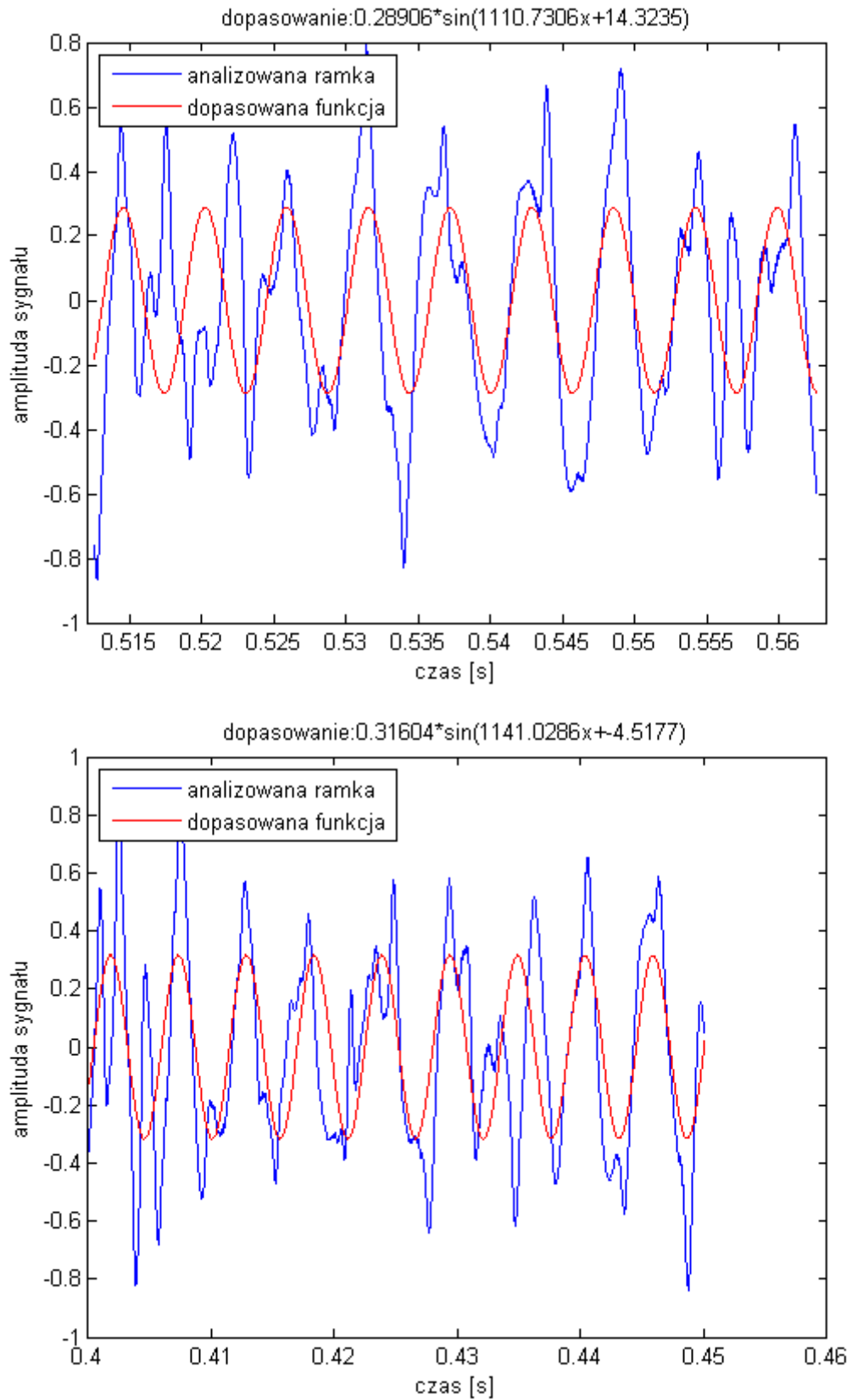
Tablica 5.4: Wyniki analizy częstotliwości składowej tonalnej

	średnia	odchylenie standardowe	mediana
częstotliwość	848Hz	3140Hz	68Hz

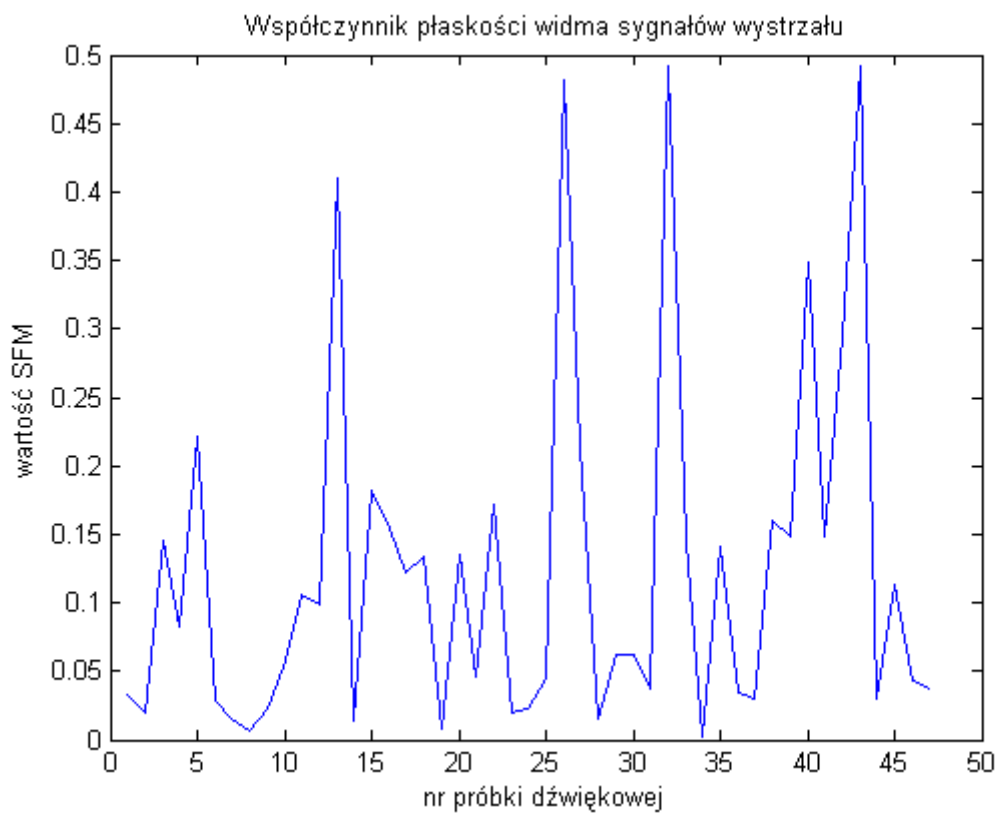
Wartość błędu standardowego średniej wynosi 458Hz.

5.5 Współczynnik płaskości widma

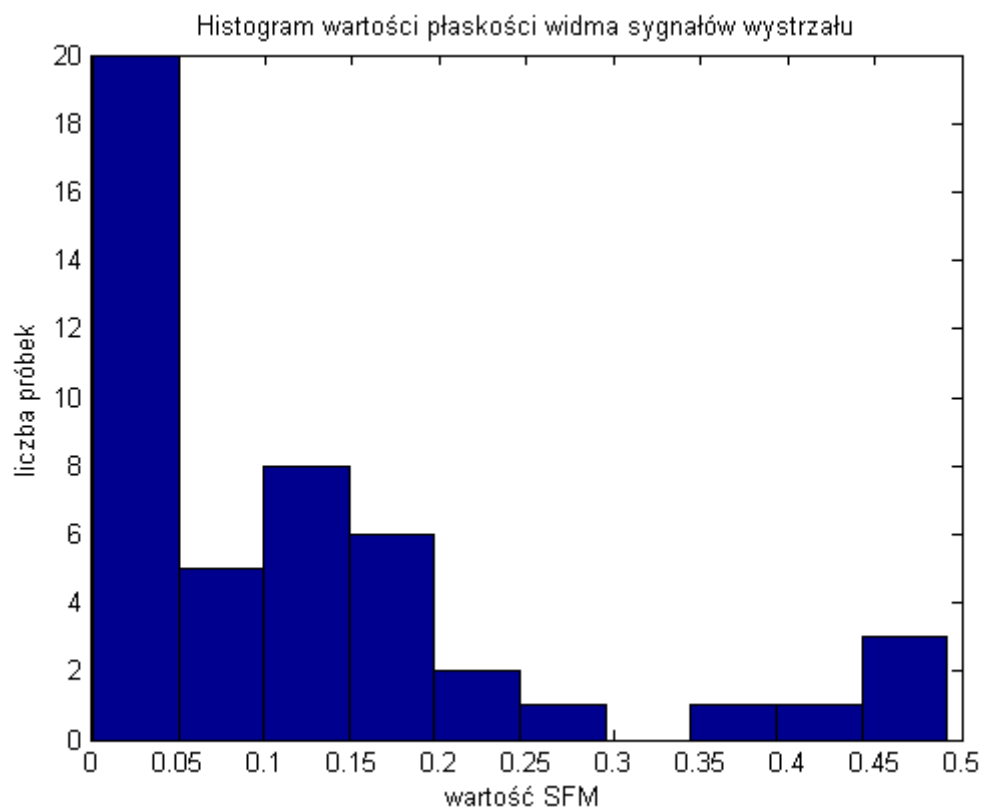
Wartości SFM i histogram wartości, wyznaczone zgodnie z przedstawioną w rozdziale 3 formułą przedstawiono na rysunku 5.6 oraz 5.7.



Rysunek 5.5: Wyznaczanie częstotliwości składowej tonalnej



Rysunek 5.6: Wartości SFM dla kolejnych próbek



Rysunek 5.7: Histogram wartości SFM dla analizowanych próbek

Rozdział 6

Analiza wyników i wnioski

Poniżej dokonano poglądowego zestawienia niektórych wyników analizy sygnałów testowych przeprowadzonych w rozdziałach 4 i 5.

Tablica 6.1: Zbiorne wyniki badań

	wybuchy	wystrzały
środek ciężkości widma	2146Hz	2447Hz
czas narastania sygnału	0.016s	0.004s
czas opadania sygnału	0.74s	0.25s
składowa tonalna	100Hz	848Hz

Analiza czasu narastania i opadania sygnałów ukazała możliwy do przewidzenia trend osiągania przez wystrzały wartości niższych od wybuchów. Jednakże otrzymane wartości odchylenia standardowego wskazują na wysoką niepewność tych wyników i nie pozwalają opracować jednoznacznego rozróżnienia sygnałów na podstawie tego parametru. Dla uzyskania wyników pozwalających zauważyć różnicę pomiędzy badanymi sygnałami konieczne wydaje się opracowanie nowej procedury pomiaru tych czasów. Analizując mediany uzyskanych wartości, można stwierdzić, że czas narastania sygnału wystrzału przyjmuje wartości ok. 2 razy mniejsze niż wybuchu, podobnie jak czas opadania sygnału.

Podobnie analiza środka ciężkości widma nie pozwoliła wyznaczyć jednoznacznych różnic pomiędzy sygnałami. Na wykresach rozkładu energii w pasmach można zauważyć, że dla nagrań wybuchu maksymalna energia zawarta jest w pasmach około 125Hz, natomiast wystrzały większość energii mają zawartą równomiernie w zakresie częstotliwości 125 - 4000Hz.

Znaczącą różnicę udało się uzyskać w wyniku analizy częstotliwości podstawowej, gdzie częstotliwość fundamentalna wybuchów skupia się wokół wartości 100Hz, natomiast wystrzały przeważnie zawierają częstotliwości znacznie wyższe, rzędu kilkuset Hz. Wyniki te są jednak także obarczone dużym błędem. Współczynnik płaskości widma pokazał także, że wybuchy mają większą tendencję do posiadania charakteru tonalnego, osiągając wartości bliskie 0, podczas gdy wystrzały przyjmują wartości wyższe, wskazując na bardziej równomierne rozłożenie energii w zależności od częstotliwości, co potwierdza analizę pasmową.

Tak duże rozbieżności w częstotliwościach mogły być wynikiem zbyt szerokiego podziału bazy próbek, bez uwzględnienia rodzajów broni czy ładunków, różnego pochodzenia nagrań i spodobu ich rejestracji. Pomimo iż dźwięki te subiektywnie są oczywiste do zaklasyfikowania jako wybuch bądź wystrzał, proponowana metoda analizy nie pozwoliła na wyznaczenie cech jednoznacznie je rozróżniających. Przeprowadzona analiza być może przyniosła by bardziej jednoznaczne wyniki przy lepszym doborze bazy dźwiękowej, skupiając się na konkretnym użyciu jednego rodzaju broni i jednego typu eksplozji, co wykluczyło by różnice w nagraniach w jednej klasie sygnałów. Zwłaszcza dla broni palnej można zauważyć większe odchylenia badanych cech - wartości odchyłeń standardowych wyznaczonych średnich są bardziej znaczące dla wystrzałów niż wybuchów. Może być to spowodowane istotnymi różnicami sygnałów dobywających się z różnego rodzaju broni.

Na podstawie otrzymanych wyników nie udało się stworzyć założonego modelu parametrycznego, ani funkcji klasyfikującej sygnały. Ze względu na nieliniowy charakter badanych zjawisk metody znane z analizy dźwięku nie znajdują praktycznego zastosowania, prowadząc do błędnych, bądź statystycznie niepoprawnych wyników. Szczególnie wyniki analizy czasów ataku i opadania sygnału doprowadziły do wyników, gdzie rząd wielkości odchylenia standardowego jest równy rzędowi wartości średniej, a błąd standardowy uzyskanej wartości średniej sięga niekiedy 50%. Pierwotne założenie stworzenia procedury pozwalającej jednoznacznie opisać i rozróżnić poszczególne typy broni nie zostało ukończone, skoro nie powiodło się rozróżnienie dwóch głównych klas sygnałów. Powyższa praca może być bazą do dalszych badań na ten temat, powinna jednak zwrócić uwagę na konieczność opracowania nowych metod analizy dźwięku. Zarówno badania w dziedzinie czasu jak i częstotliwości doprowadziły do jedynie częściowych wyników, po-

zwalając jedynie domniemywać różnic istniejących pomiędzy sygnałami. Metody znane z analizy dźwięku i mowy okazały się nieskuteczne i nieprecyzyjne. Sygnały tak złożone i charakteryzujące się nieliniowością wymagają nowego podejścia do zagadnienia ich analizy.

Bibliografia

- [1] http://en.wikipedia.org/wiki/Blast_wavemediaviewer/File:Friedlander_waveform.jpg
- [2] Dewey JM. *THE SHAPE OF THE BLAST WAVE: STUDIES OF THE FRIEDLANDER EQUATION. Presented at the 21st International Symposium on Military Aspects of Blast and Shock, Israel 2010*
- [3] Arkadiusz Kuczaj http://www.kuczaj.pl/pages/msc/akuczaj_MastersThesis.pdf
- [4] Tomasz Zieliński *Cyfrowe przetwarzanie sygnałów. Od teorii do zastosowań. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności*
- [5] Unjung Nam <https://ccrma.stanford.edu/unjung/AIR/areaExam.pdf>.
- [6] http://en.wikipedia.org/wiki/Coefficient_of_determination
- [7] Dryden Flight Research Center Fact Sheet: Sonic Booms
<http://www.nasa.gov/centers/dryden/news/FactSheets/FS-016-DFRC.html>
- [8] Krzysztof Sztekmiler *Podstawy nagłośnienia i realizacji nagrań. Podręcznik dla akustyków Wydawnictwa Komunikacji i Łączności WKŁ*
- [9] <http://www.statsoft.pl/textbook/stathome.html>
- [10] Wojciech Kordecki *Statystyka matematyczna dla kierunku Zarządzanie na studiach drugiego stopnia Wyższa Szkoła Handlowa we Wrocławiu*