



AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA

im. Stanisława Staszica w Krakowie

**WYDZIAŁ INŻYNIERII
MECHANICZNEJ I ROBOTYKI**

Praca dyplomowa inżynierska

Dominik Szymaniak

Imię i nazwisko

Inżynieria Akustyczna

Kierunek studiów

**Implementacja geometrycznej metody analizy
pola akustycznego w środowisku graficznym**

Temat pracy dyplomowej

dr inż. Ryszard Olszewski

Promotor pracy

.....

Ocena

Kraków, rok 20...../20.....

Kraków. dnia.....

Imię i nazwisko: Dominik Szymaniak
Nr albumu: 269564
Kierunek studiów: Inżynieria Akustyczna
Profil dyplomowania:

OŚWIADCZENIE

Uprzedzony o odpowiedzialności karnej na podstawie art. 115 ust 1 i 2 ustawy z dnia 4 lutego 1994 r. o prawie autorskim i prawach pokrewnych (tj. Dz.U.z 2006 r. Nr 90, poz. 631 z późn.zm.) : „Kto przywłaszcza sobie autorstwo albo wprowadza w błąd co do autorstwa całości lub części cudzego utworu albo artystycznego wykonania, podlega grzywnie, karze ograniczenia wolności albo pozbawienia wolności do lat 3. Tej samej karze podlega, kto rozpowszechnia bez podania nazwiska lub pseudonimu twórcy cudzy utwór w wersji oryginalnej albo w postaci opracowania, artystyczne wykonanie albo publicznie zniekształca taki utwór, artystyczne wykonanie, fonogram, wideogram lub nadanie”, a także uprzedzony o odpowiedzialności dyscyplinarnej na podstawie art. 211 ust.1 ustawy z dnia 27 lip[ca] 2005 r. Prawo o szkolnictwie wyższym (tj. Dz.U. z 2012 r. poz. 572, z późn.zm.) „Za naruszenie przepisów obowiązujących w uczelni oraz za czyny uchybiające godności student ponosi odpowiedzialność dyscyplinarną przed komisją dyscyplinarną albo przed sądem koleżeńskim samorządu studenckiego, zwanym dalej „sądem koleżeńskim”, oświadczam, że niniejszą pracę dyplomową wykonałem(-am) osobiście i samodzielnie i że nie korzystałem (-am) ze źródeł innych niż wymienione w pracy”.

.....
podpis dyplomanta

Kraków, dn.....

Imię i nazwisko: Dominik Szymaniak
Nr albumu: 269564
Kierunek studiów: **Inżynieria Akustyczna**
Profil dyplomowania:

OŚWIADCZENIE

Świadomy/a odpowiedzialności karnej za poświadczanie nieprawdy oświadczam, że niniejszą inżynierską pracę dyplomową wykonałem/łam osobiście i samodzielnie oraz nie korzystałem/łam ze źródeł innych niż wymienione w pracy.

Jednocześnie oświadczam, że dokumentacja oraz 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 inżynierska 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: Dominik Szymaniak

Adres korespondencyjny: Łopiennik Nadrzeczny 103, 22-351 Łopiennik Górny

Temat pracy dyplomowej inżynierskiej: Implementacja geometrycznej metody analizy pola akustycznego w środowisku graficznym.

Rok ukończenia: 2017

Nr albumu: 269564

Kierunek studiów: Inżynieria Akustyczna

Profil dyplomowania:

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 inżynierskiej pracy dyplomowej, w zakresie publicznego udostępniania i rozpowszechniania w wersji drukowanej i elektronicznej¹.

Publikacja ta może nastąpić po ewentualnym zgłoszeniu do ochrony prawnej wynalazków, wzorów użytkowych, wzorów przemysłowych będących wynikiem pracy inżynierskiej².

Kraków,
data *podpis dyplomanta*

¹ 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."

² Ustawa z dnia 30 czerwca 2000r. – Prawo własności przemysłowej (Dz.U. z 2003r. Nr 119, poz. 1117 z późniejszymi zmianami) a także rozporządzenie Prezesa Rady Ministrów z dnia 17 września 2001r. w spra-

Kraków, dnia

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

TEMATYKA PRACY DYPLOMOWEJ INŻYNIERSKIEJ
dla studenta IV roku studiów stacjonarnych

Dominik Szymaniak
imię i nazwisko studenta

TEMAT PRACY DYPLOMOWEJ INŻYNIERSKIEJ:

Implementacja geometrycznej metody analizy pola akustycznego w środowisku graficznym

Promotor pracy: dr inż. Ryszard Olszewski

Recenzent pracy: dr hab. inż. Krzysztof Kosała

.....
Podpis dziekana:

PLAN PRACY DYPLOMOWEJ

1. Omówienie tematu pracy i sposobu realizacji z promotorem.
2. Zebranie i opracowanie literatury dotyczącej tematu pracy.
3. Zebranie i opracowanie założeń do implementacji.
4. Realizacja i testowanie aplikacji.
5. Analiza wyników obliczeń.
6. Opracowanie redakcyjne.

Kraków,
data podpis dyplomanta

TERMIN ODDANIA DO DZIEKANATU: 20 r.

.....
podpis promotora

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

Kraków,

Kierunek: Inżynieria Akustyczna

Profil dyplomowania:

Dominik Szymaniak

Praca dyplomowa inżynierska

Implementacja geometrycznej metody analizy pola akustycznego w środowisku graficznym.

Opiekun: dr inż. Ryszard Olszewski

STRESZCZENIE

Praca stanowi przegląd metod analizy pola akustycznego, skupiając się na metodach geometrycznych. Przedstawia założenia metody źródeł pozornych pokazując jej działanie i zastosowanie.

Głównym celem pracy jest implementacja metody źródeł pozornych w środowisku komputerowym przy spełnieniu następujących założeń:

- realizacja algorytmu z funkcjonalnym interfejsem graficznym użytkownika
- optymalizacja znanych algorytmów
- rozszerzenie zakresu stosowania o figury wklęsłe.

Aplikacja została zaimplementowana jako wtyczka do programu Google SketchUp, który służy do tworzenia grafiki trójwymiarowej. API udostępnione przez twórców programu pozwala na rozszerzenie jego działania o własne narzędzia z wykorzystaniem wbudowanych algorytmów i narzędzi. Połączenie środowiska graficznego z algorytmem obliczeniowym umożliwia, w jednej aplikacji, przygotowanie modelu geometrii i przeprowadzenie obliczeń.

Napisana aplikacja posłużyła do przeprowadzenia obliczeń testowych sprawdzających użyteczność metody źródeł pozornych. Wyniki w postaci echogramów i obliczonych czasów pogłosu zostały zestawione z obliczeniami metodą promieniową i w oparciu o statystyczną teorię pola akustycznego.

Metoda źródeł pozornych pozwala na określenie kierunkowości dźwięku dochodzącego do odbiornika. Jednak przy ocenie pogłosowości wyniki pokazują, że wykorzystanie tej metody ma sens tylko dla silnie pochłaniających pomieszczeń. Czyni to tę metodę użyteczną tylko dla szczególnych pól akustycznych, lub jako uzupełnienie innych metod obliczeniowych.

AGH University of Science and Technology
Faculty of Mechanical Engineering and Robotics

Kraków, the.....

Field of Study: Acoustic Engineering

Specialisations:

Dominik Szymaniak

Engineer Diploma Thesis

Implementation of acoustic field geometric analysis method into graphical environment.

Supervisor: dr inż. Ryszard Olszewski

SUMMARY

The diploma is an overview through some acoustic analysis methods, focusing on geometrical methods. It shows assumptions of an image-source method presenting its mode of action and utility.

The main purpose of the diploma is implementation of an image-source method into computer environment maintaining following design assumptions:

- realization of the algorithm with functional guide user interface,
- optimization of common algorithms,
- extension of the method to use it with convex figures.

The application was implemented as an extension for Google SketchUp, which is a computer program for three dimensional modeling. API provided by developers allows to extend its functionality with own tools based on built in algorithms and tools. Combining graphical environment with calculation algorithm allows in one application preparing the model of geometry and do the calculations.

Written applications was used to carry some test calculations, which check utility of image-source method. The results, presented as echograms and reverberation times, was summarized with results from ray-tracing method and acoustic field theory.

Image-source method allows to term sound directivity incoming to receiver. However, when assessing reverberation, results show that using of this method makes sense for highly absorbing space. This makes this method useful only for special acoustic fields or as a complement to other methods of calculation.

Spis treści

1	Wstęp.....	- 9 -
1.1	Wprowadzenie.....	- 9 -
1.2	Cel i zakres pracy	- 10 -
2	Opis metody źródeł pozornych.....	- 12 -
2.1	Wprowadzenie.....	- 12 -
2.2	Główne założenia metody	- 13 -
2.3	Wyznaczanie siatki źródeł pozornych.....	- 14 -
2.4	Zastosowanie metody.....	- 17 -
3	Charakterystyka środowiska Google SketchUp	- 20 -
3.1	Wprowadzenie.....	- 20 -
3.2	Przegląd funkcjonalności i podstawowych narzędzi.....	- 20 -
3.3	Interpreter skryptów	- 23 -
3.4	Język Ruby	- 25 -
4	Realizacja założeń projektowych	- 27 -
4.1	Wprowadzenie.....	- 27 -
4.2	Realizacja algorytmu.....	- 27 -
4.3	Obsługa aplikacji.....	- 29 -
5	Obliczenia testowe.....	- 32 -
5.1	Wprowadzenie.....	- 32 -
5.2	Obliczenia przy użyciu metody źródeł pozornych.....	- 35 -
5.3	Obliczenia przy użyciu metody promieniowej	- 40 -
5.4	Obliczenia w oparciu o statystyczną teorię pola akustycznego	- 42 -
5.5	Wydańność obliczeniowa	- 42 -
6	Podsumowanie.....	- 44 -
7	Bibliografia.....	- 45 -
A.	Załącznik: Obliczenia testowe.....	- 47 -

1 Wstęp

1.1 Wprowadzenie

W akustyce architektonicznej wyznaczenie analitycznego rozwiązania równania falowego – nawet przy prostych warunkach brzegowych – jest czasochłonne, lub w wielu przypadkach niemożliwe. Natomiast metoda statystyczna, lub wykorzystanie wzorów empirycznych pozwalają na wyznaczenie jedynie wybranych parametrów pola akustycznego i mają liczne ograniczenia dotyczące zakresu ich stosowania. Jedną z pierwszych publikacji przedstawiającej inne metody obliczeniowe w akustyce jest książka L. Cremera pt. „Geometrische Raumakustik” [1]. Praca porusza zagadnienie geometrycznej interpretacji fali akustycznej jednak ogranicza się jedynie do przedstawienia mechanizmu powstawania odbić fali od pojedynczych powierzchni, nie rozwija natomiast geometrycznej metody analizy obszarów zamkniętych.

Lata 60-te i 70-te XX wieku były okresem największego rozwoju metod numerycznych. Modelowanie matematyczne znalazło zastosowanie w różnych dziedzinach nauki, w szczególności w analizie pól wektorowych. Postęp w trójwymiarowej grafice komputerowej przyczynił się do poszerzenia metod numerycznych o metody geometryczne. Wyświetlenie geometrii w perspektywie, bez uwzględnienia różnic natężenia światła dawało nierealistyczny obraz w porównaniu z fotografią, lub malarstwem gdzie już od dawna stosowano technikę światłocienia. Zwiększenie realizmu grafiki cyfrowej wymagało uwzględnienia zjawisk związanych z propagacją fali świetlnej. Interpretacja fali kulistej źródła światła jako nieskończony zbiór fal płaskich i zamodelowanie ich jako półproste, odbijające się od powierzchni zgodnie z prawem Snella, pozwoliły na wystarczające odwzorowanie zjawiska rozchodzenia się fali świetlnej. Zapoczątkowana w 1968 roku przez Arhtura Appela [2], opierająca się na powyższych założeniach metoda promieniowa (ang. Ray Tracing) stała się powszechnie używaną w środowisku komputerowym. W tym samym roku, w czasopiśmie „Journal of Sound and Vibration” [3] autorzy wykorzystali analogię fali elektromagnetycznej do fali akustycznej i zastosowali metodę promieniową do analizy pola akustycznego. Rozpoczęło to rozwój metod geometrycznych w akustyce i dalsze poszukiwanie analogii pomiędzy optyką i akustyką. W. Straszewicz w pracy doktorskiej [4] przedstawia wykorzystanie metody źródeł pozornych (ang. Image-Source) w dziedzinie akustyki architektonicznej, a 4 lata później J. Allen i D. Berkley [5]

demonstrują implementację tej metody w środowisku komputerowym. Popyt na animacje trójwymiarowe i gry komputerowe osadzone w trójwymiarowym świecie wymusił rozwój metod geometrycznych i rozbudowanie ich o dodatkowe algorytmy optymalizacyjne, co stało się źródłem inspiracji do powstawania nowych i ulepszanie starych metod geometrycznych w akustyce. Zaczęto uwzględniać nie tylko podstawowe prawo odbicia i propagację fali, ale również zjawisko rozproszenia fali przy odbiciu oraz zjawisko pochłaniania przez powierzchnie. Żadna z metod geometrycznych nie uwzględnia jednak innych zjawisk falowych, takich jak ugięcie się fali na krawędzi powierzchni odbijających, czy zjawiska rezonansu i należy pamiętać o tym przy projektowaniu i analizie pomieszczeń. W celu zniwelowania błędów obliczeń warto połączyć te metody z innymi modelami obliczeniowymi (MES,MEB).

1.2 Cel i zakres pracy

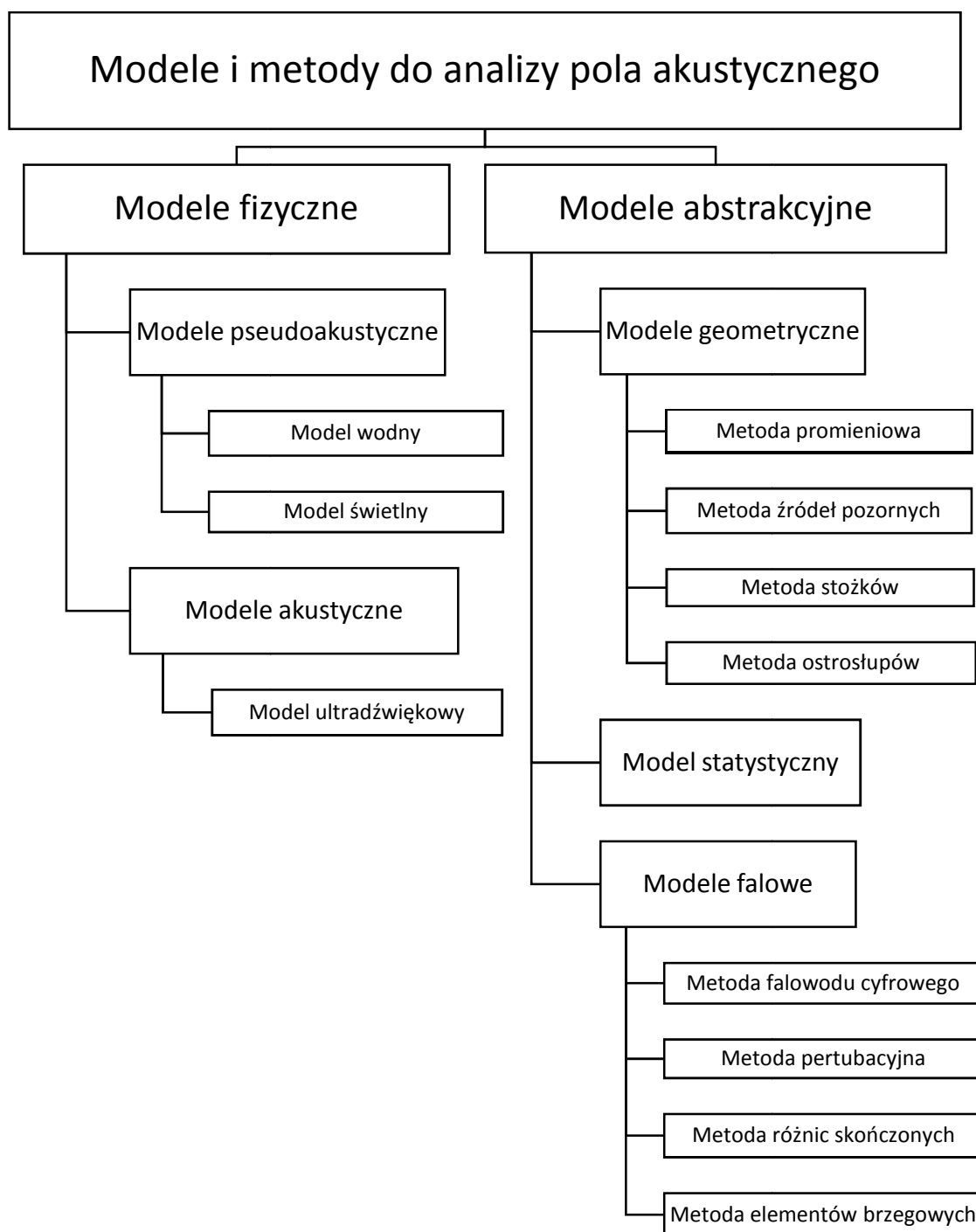
Celem pracy jest implementacja metody źródeł pozornym w środowisku cyfrowym dla przestrzennego układu powierzchni i przy określonych założeniach projektowych. Projekt może być niezależną platformą obliczeniową do podstawowej analizy pola akustycznego, lub bazą do stworzenia bardziej rozwiniętej aplikacji. Początkowo metody geometryczne wykorzystywane były do wstępnej analizy pierwszych odbić i służyły jako uzupełnienie podstawowych metod obliczeniowych. Czasochłonne obliczenia były wykonywane ręcznie i były nieefektywne w odniesieniu do innych metod. Implementacja metod geometrycznych w środowisku cyfrowym pozwoliła na praktyczne ich używanie w analizie pola akustycznego i w czasie ich rozwoju powstało wiele środowisk obliczeniowych bazujących na tych metodach [6] [7]. Dostępne narzędzia, które mają za zadanie przyspieszyć i ułatwić pracę, w rzeczywistości zajmują dużo czasu na poziomie tworzenia geometrii. Mimo znacznego skrócenia obliczeń, wydłużył się czas przygotowania modelu do obliczeń, dlatego głównym założeniem jest zbudowanie aplikacji z interfejsem użytkownika umożliwiającym zarówno przeprowadzenie obliczeń, jak i proste stworzenie geometrii. Wygodnym okazuje się wykorzystanie znanego wcześniej autorowi środowiska graficznego Google SketchUp, które może stanowić interpreter dla pisanej aplikacji, dlatego postanowiono, że kod źródłowy programu zostanie całkowicie zaimplementowany w tym środowisku. Wykorzystanie środowiska graficznego pozwoli również na stworzenie bazy do optymalizacji obliczeń przy użyciu kart graficznych. Kolejnym założeniem projektowym jest odwzorowanie metody źródeł pozornych na

podstawie własnego algorytmu z uzupełnieniem jej o algorytmy optymalizujące obliczenia, zjawiska związane ze stratami energii przez absorpcję powierzchni odbijających, oraz o możliwość stosowania metody na figurach wklęsłych. Model ma przeprowadzać obliczenia dla pojedynczego źródła wszechkierunkowego i dla pojedynczego odbiornika przy zadanych parametrach geometrii i współczynników pochłaniania, pozycji źródła i odbiornika, oraz maksymalnego rzędu odbić. Wynikiem symulacji przeprowadzanych na stworzonym modelu mają być zarówno siatka źródeł pozornych z obliczonymi współczynnikami strat energii dla poszczególnych źródeł, jak i wykresy echogramów i krzywych Schroedera, ich postacie tabelaryczne oraz podstawowe parametry pola akustycznego, takie jak czas pogłosu.

2 Opis metody źródeł pozornych

2.1 Wprowadzenie

Spośród wielu dostępnych metod analizy pola akustycznego (Rysunek 2.1) nie można jednoznacznie wyłonić najlepszej. Każda z nich ma ograniczony zakres stosowania, a wyniki obarczone są pewnym błędem. Zatem dobór metody w dużej mierze zależy od charakterystyki analizowanego pola, oraz od postaci wyniku jaką chcemy uzyskać. W przypadku metody źródeł pozornych geometria musi składać się wyłącznie z powierzchni płaskich, a w przypadku figur wklęsłych powierzchnie muszą być dodatkowo zorientowane. Ilość powierzchni znacznie wpływa na czas obliczeń (Wzór 2.1), dlatego dla opłacalnych obliczeń geometria nie powinna zawierać dużej ilości powierzchni odbijających. Taka charakterystyka pola akustycznego odpowiada wszelkiego rodzaju pomieszczeniom, co czyni metodę użyteczną w zakresie akustyki architektonicznej.



Rysunek 2.1. Modele i metody analizy pola akustycznego [8].

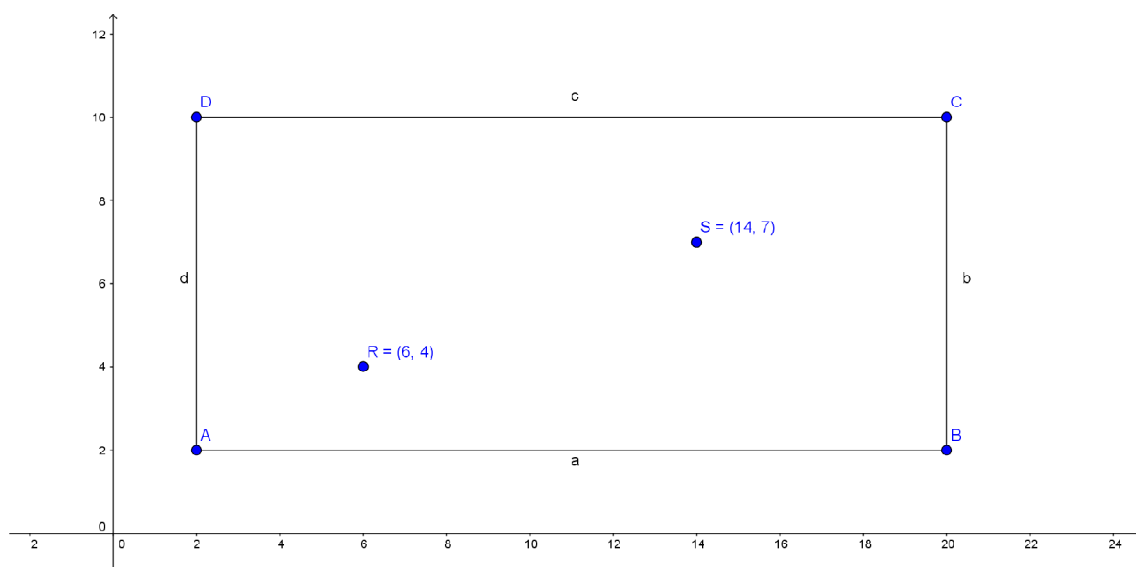
2.2 Główne założenia metody

Metoda źródeł pozornych jest metodą do analizy pola akustycznego, wywodzącą się z metod geometrycznych (Rysunek 2.1). Głównym jej założeniem jest to, że każdą falę odbitą padającą na odbiornik, zastępuje się pozornym źródłem dźwięku. Dla fali jednokrotnie odbitej pozorne źródło dźwięku jest to punkt leżący symetrycznie do źródła rzeczywistego względem płaszczyzny odbijającej tę falę, co pokazano na

rysunku 2.3, i nazywane jest źródłem pozornym pierwszego rzędu. Fale wielokrotnie odbite zastępuje się źródłami pozornymi wyższych rzędów i ich położenie wyznaczone jest poprzez kolejne odbicia symetryczne względem każdej z płaszczyzn odbijających falę co pokazano na rysunku 2.5. Korzystając z tej metody uzyskujemy siatkę źródeł pozornych. Jest to zbiór punktów położenia wszystkich znalezionych źródeł pozornych wraz z przypisanymi do nich parametrami. Siatka źródeł pozornych pozwala na wyznaczenie kierunków i czasów dochodzenia poszczególnych fal dźwiękowych do odbiornika. Pozwala to między innymi na ocenę dyfuzyjności pola akustycznego w punkcie odbiornika. Uwzględnienie strat energii związanych z propagacją fali i absorpcją powierzchni odbijających daje możliwość wyznaczenia echogramów (Rysunek 2.6), które w przybliżeniu odpowiadają odpowiedziom impulsowym pomieszczenia.

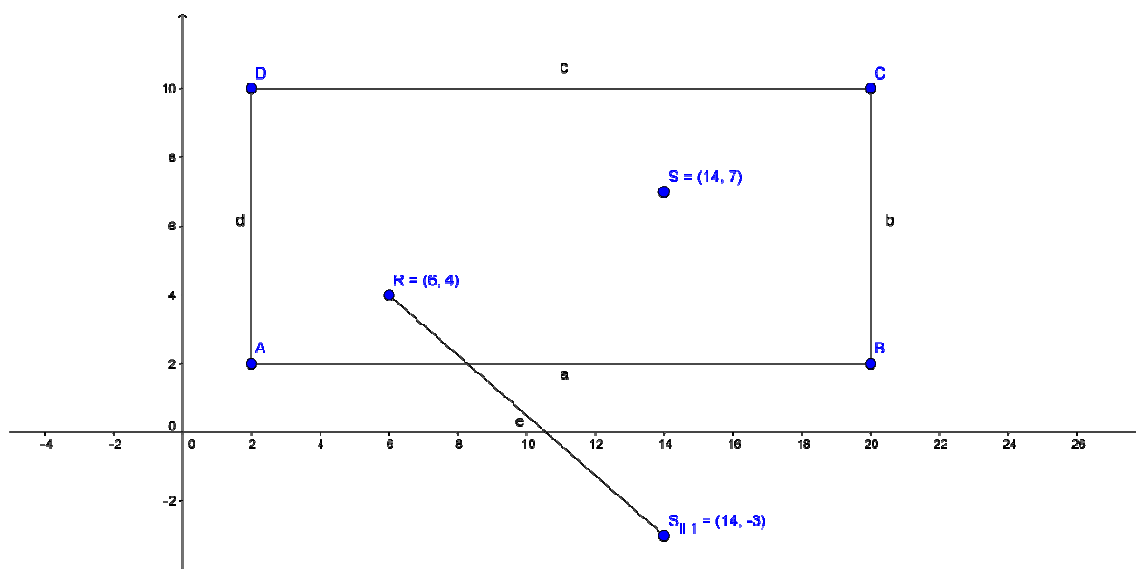
2.3 Wyznaczanie siatki źródeł pozornych

W celu wyznaczenia siatki źródeł pozornych należy stworzyć układ współrzędnych, a następnie umieścić w nim punkt źródła dźwięku, punkt odbiornika oraz opisać algebraicznie powierzchnie odbijające. Przy dokładniejszej analizie należy przypisać tym powierzchniom współczynniki pochłaniania dźwięku oraz współczynnik tłumienia fali w ośrodku, w którym rozchodzą się fale. Wyznaczanie siatki pozornych źródeł dźwięku autor zademonstruje na przykładzie prostej geometrii przekroju pomieszczenia w układzie dwóch współrzędnych (Rysunek 2.2)



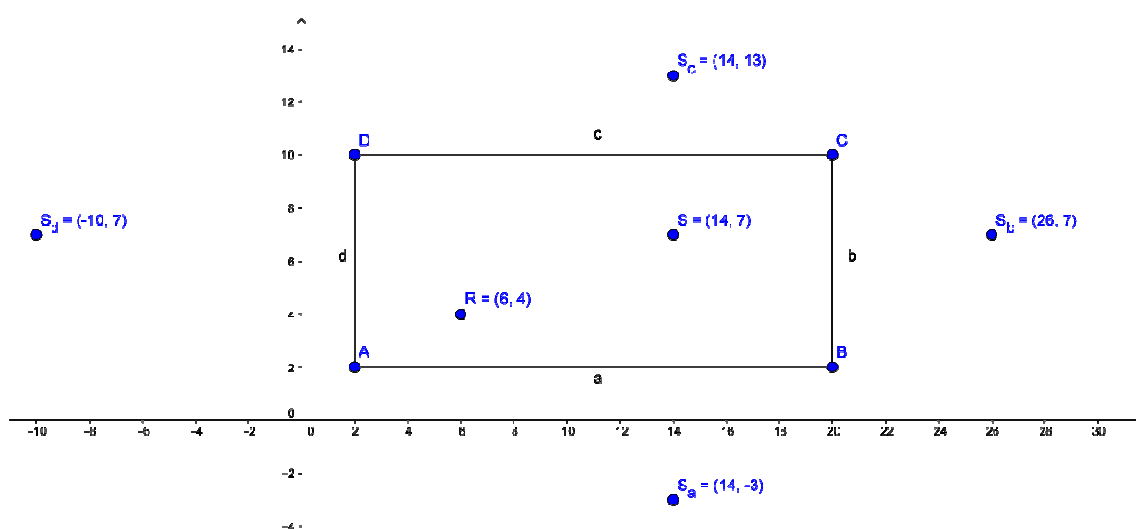
Rysunek 2.2. Przykładowa geometria dla wyznaczenia siatki źródeł pozornych. a, b, c, d – powierzchnie odbijające, S – źródło dźwięku, R – odbiornik.

W celu wyznaczenia źródła pozornego dla fali odbitej od powierzchni a należy punkt źródła S odbić symetrycznie względem tej powierzchni. Aby sprawdzić czy wyznaczone źródło pozorne istnieje należy zbadać czy odcinek łączący punkt źródła pozornego z odbiornikiem przecina powierzchnię odbijającą (Rysunek 2.3). Jeśli nie, to nie należy uwzględniać tego źródła w siatce źródeł pozornych.



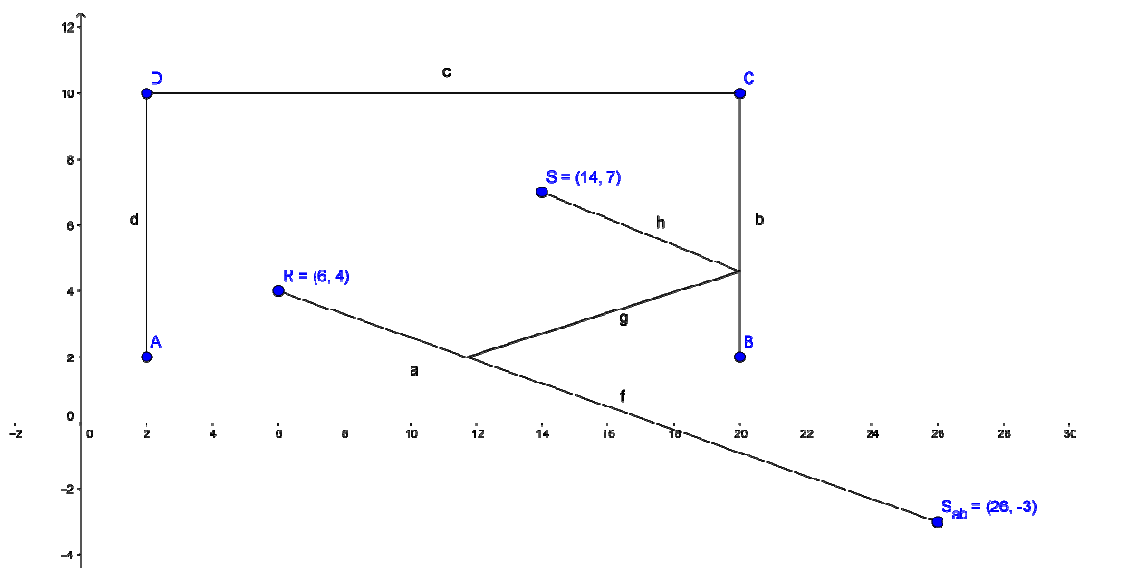
Rysunek 2.3. Źródło pozorne pierwszego rzędu.

Operację należy powtórzyć dla każdej powierzchni odbijającej, otrzymując przy tym siatkę źródeł pozornych pierwszego rzędu przedstawioną na rysunku 2.4.



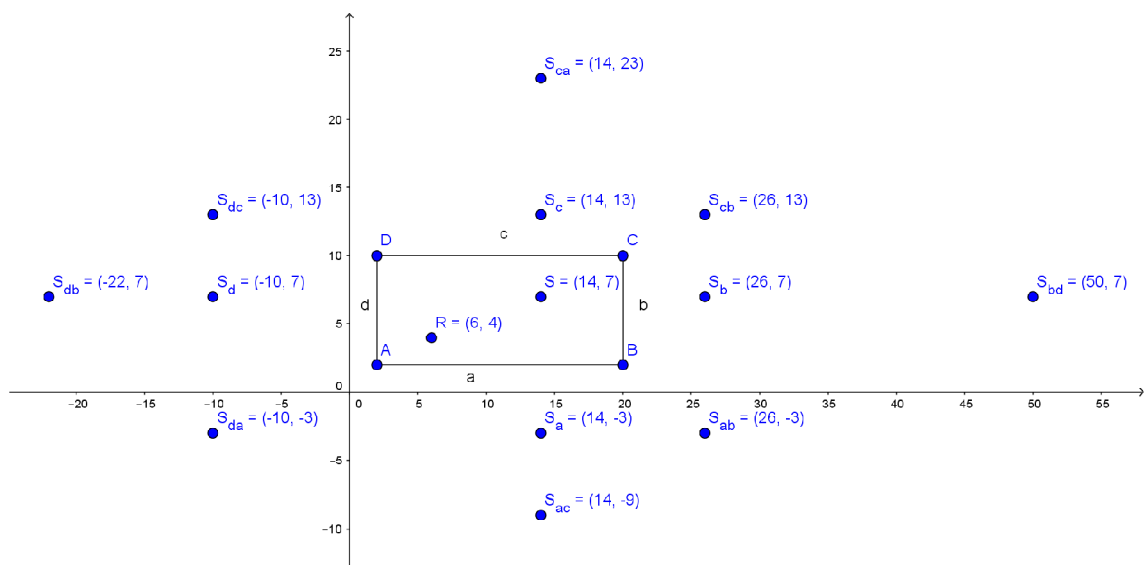
Rysunek 2.4. Siatka źródeł pozornych pierwszego rzędu.

Aby wyznaczyć źródło pozorne drugiego rzędu dla fali odbitej od powierzchni a i b należy odbić punkt źródła symetrycznie względem tych powierzchni. Następnie należy sprawdzić czy takie źródło pozorne istnieje, wyznaczając odcinek łączący to źródło z odbiornikiem (odcinek f na rysunku 2.5). Następnie z prawa Snella wyznaczyć pozostałe odcinki toru fali (odcinki h i g na rysunku 2.5). Jeżeli tor fali nie napotyka na przeszkody to dane źródło pozorne zostaje włączone do siatki źródeł pozornych (Rysunek 2.6).



Rysunek 2.5. Wyznaczanie źródła pozornego drugiego rzędu dla fali odbitej od powierzchni kolejno a i b.

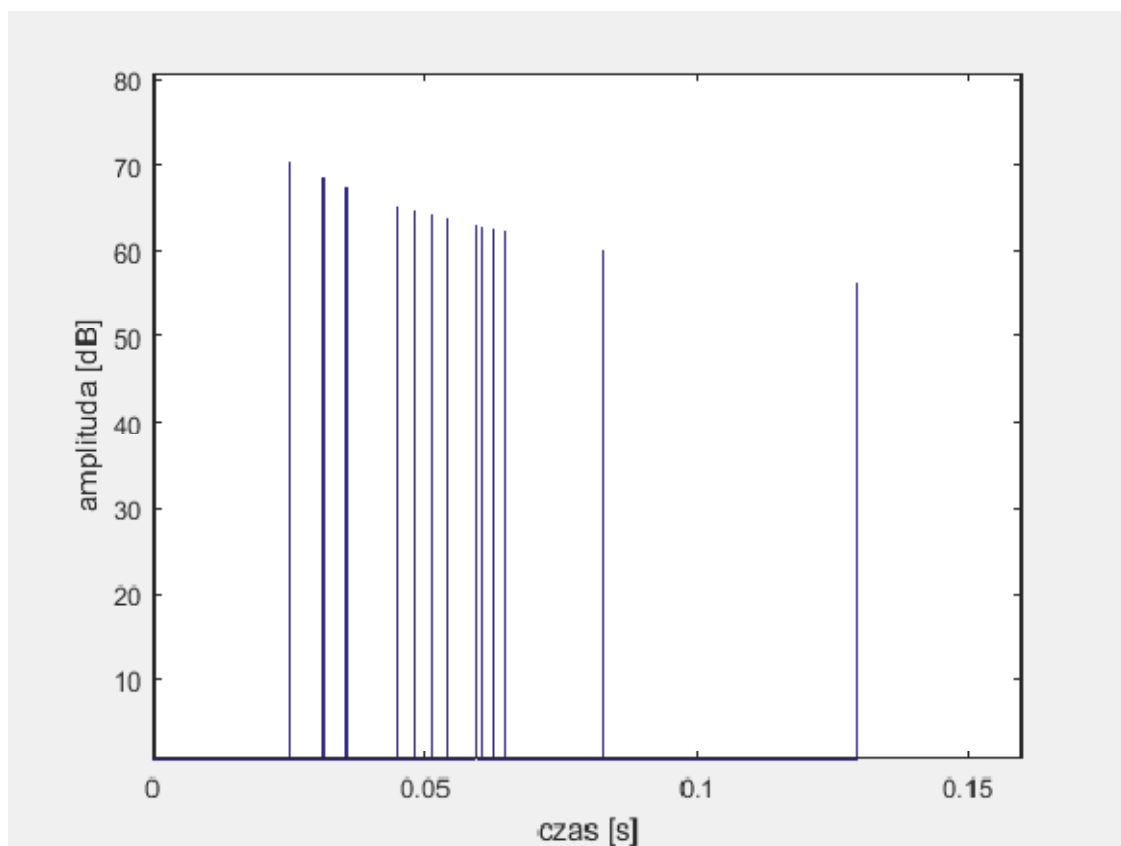
Źródła wyższych rzędów wyznaczone są analogicznie do źródeł pozornych drugiego rzędu. Wyznaczona siatka źródeł pozornych może stanowić bazę do kolejnych obliczeń. Graficzne przedstawienie siatki źródeł pozornych (Rysunek 2.6) może również posłużyć do analizy danego pola akustycznego.



Rysunek 2.6. Siatka źródeł pozornych do rzędu drugiego.

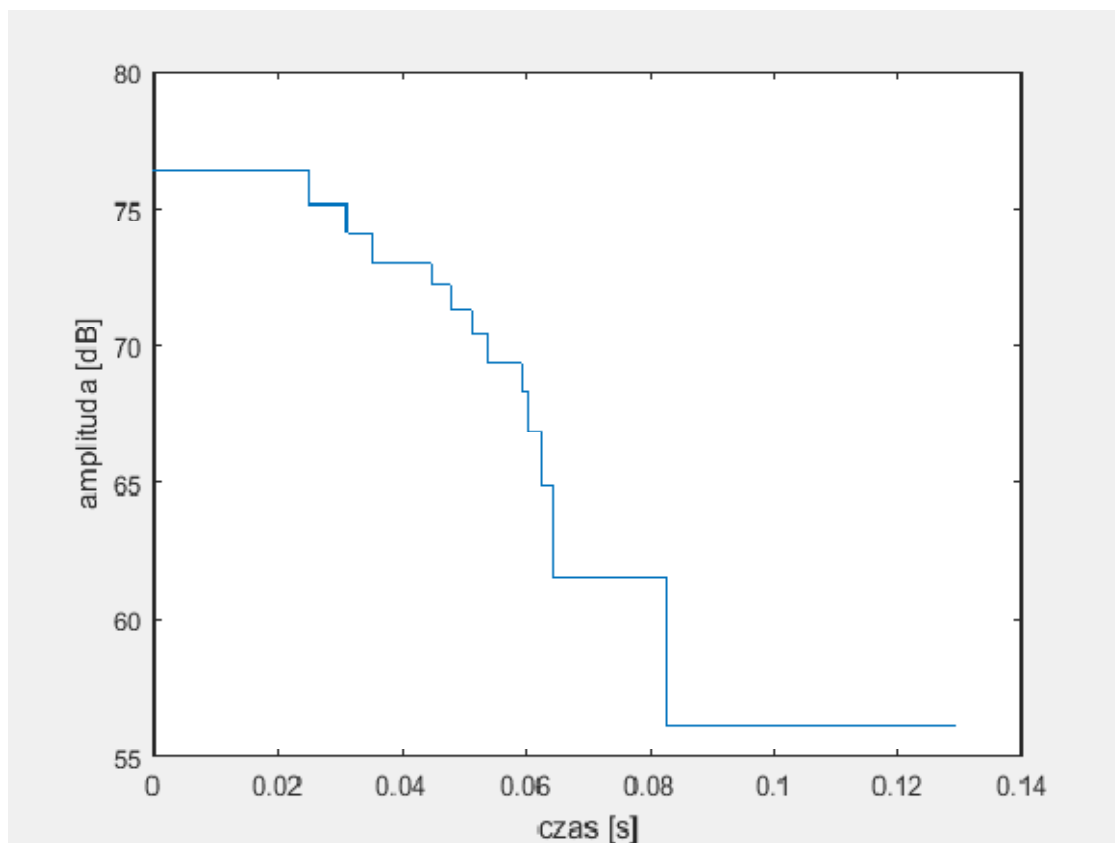
2.4 Zastosowanie metody

Na podstawie siatki źródeł pozornych można wyznaczyć echogram (Rysunek 2.7), który odpowiada odpowiedzi impulsowej pomieszczenia.



Rysunek 2.7. Echogram dla siatki źródeł pozornych (Rysunek 2.6).

Echogram przedstawia rozkład dochodzenia poszczególnych odbić fal do odbiornika. Na jego podstawie możemy wyznaczyć krzywą zaniku dźwięku (krzywą Schroedera) (Rysunek 2.8), która umożliwia wyznaczenie wielu parametrów oceny pola akustycznego.



Rysunek 2.8. Krzywa zaniku dźwięku dla siatki źródeł pozornych (Rysunek 2.6).

Jest to jedyna metoda geometryczna, która wyznacza wszystkie odbicia poniżej ustalonego rzędu. Ponadto pozwala na odtworzenie dokładnego toru fali odbitej w przeciwieństwie do pozostałych metod geometrycznych, w których wyznaczane są przybliżone ścieżki fal, trafiające w okolicę odbiornika. Przewagą klasycznej metody promieniowej nad metodą źródeł pozornych jest za to możliwość uwzględnienia zjawiska rozproszenia fali przy odbiciu od powierzchni. Kolejną wadą metody źródeł pozornych jest duża złożoność obliczeniowa, która wynosi:

$$F(K, N) = K \frac{1 - (K-1)^N}{2 - K}, \quad (2.1)$$

gdzie:

K – liczba powierzchni odbijających

N - maksymalny rząd odbić

Przy tak szybko rosnącej złożoności niepraktycznym jest wykonywanie obliczeń dla wysokiej liczby odbić, co prowadzi do uzyskiwania stosunkowo krótkich echogramów, w porównaniu z metodami promieniowymi. Czyni to metodę źródeł pozornych niewystarczającą do pełnej analizy pola akustycznego. W celu wykorzystania zalet tej metody z możliwością uzyskania pełnej odpowiedzi impulsowej pomieszczenia stosuje się hybrydowe metody łączące wyżej wymieniane metody [9], [10], [11], [12].

3 Charakterystyka środowiska Google SketchUp

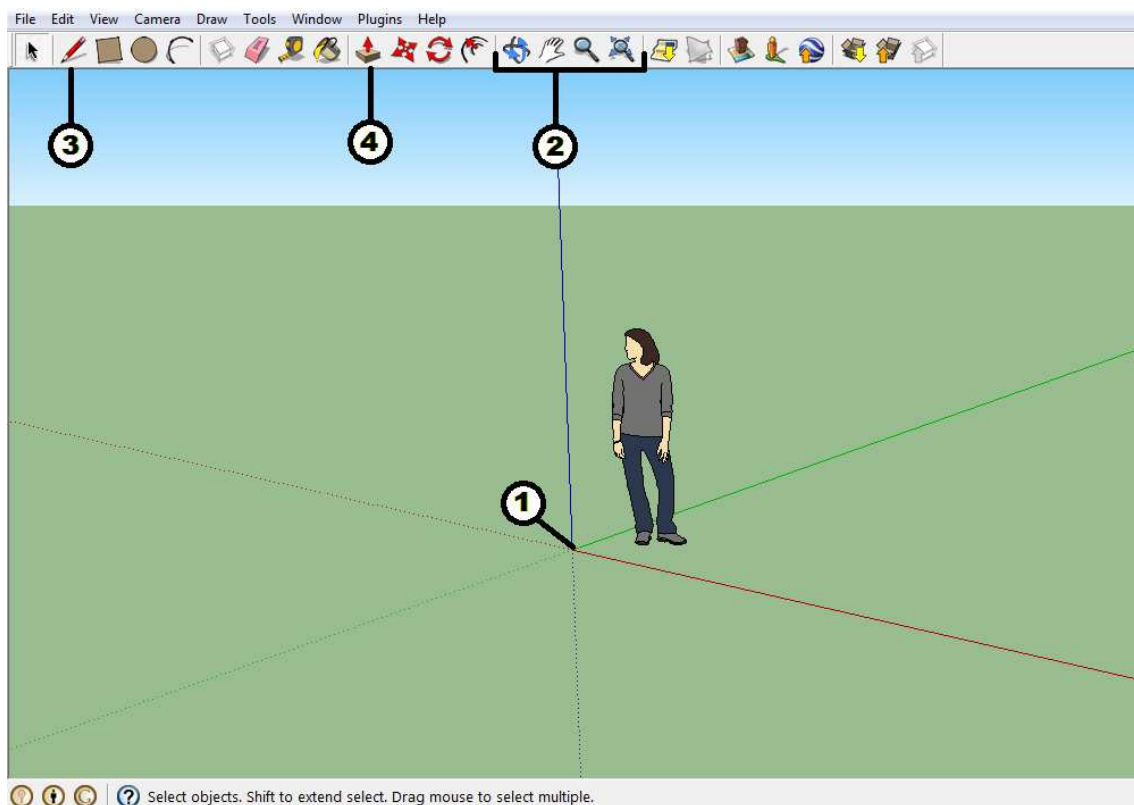
3.1 Wprowadzenie

Programy obliczeniowe opierające się na metodach numerycznych w większości korzystają z zewnętrznych narzędzi do modelowania geometrii, a model obliczeniowy jest niezależną aplikacją. W przypadku poniższej pracy środowisko graficzne nie jest jedynie narzędziem do przygotowania modelu obliczeniowego. Środowisko Google SketchUp stanowi interpreter kodu źródłowego implementowanej metody. Pozwala to na przeprowadzanie obliczeń symulacyjnych wewnątrz programu, korzystając z jego obszernej specyfikacji – gotowych skryptów, funkcji i klas. W celu szczegółowego przedstawienia realizacji poniższej pracy konieczne jest scharakteryzowanie tego środowiska. Do zrealizowania pracy wykorzystano program w wersji Google SketchUp 8 i dalszy opis programu będzie dotyczyć tej wersji.

3.2 Przegląd funkcjonalności i podstawowych narzędzi

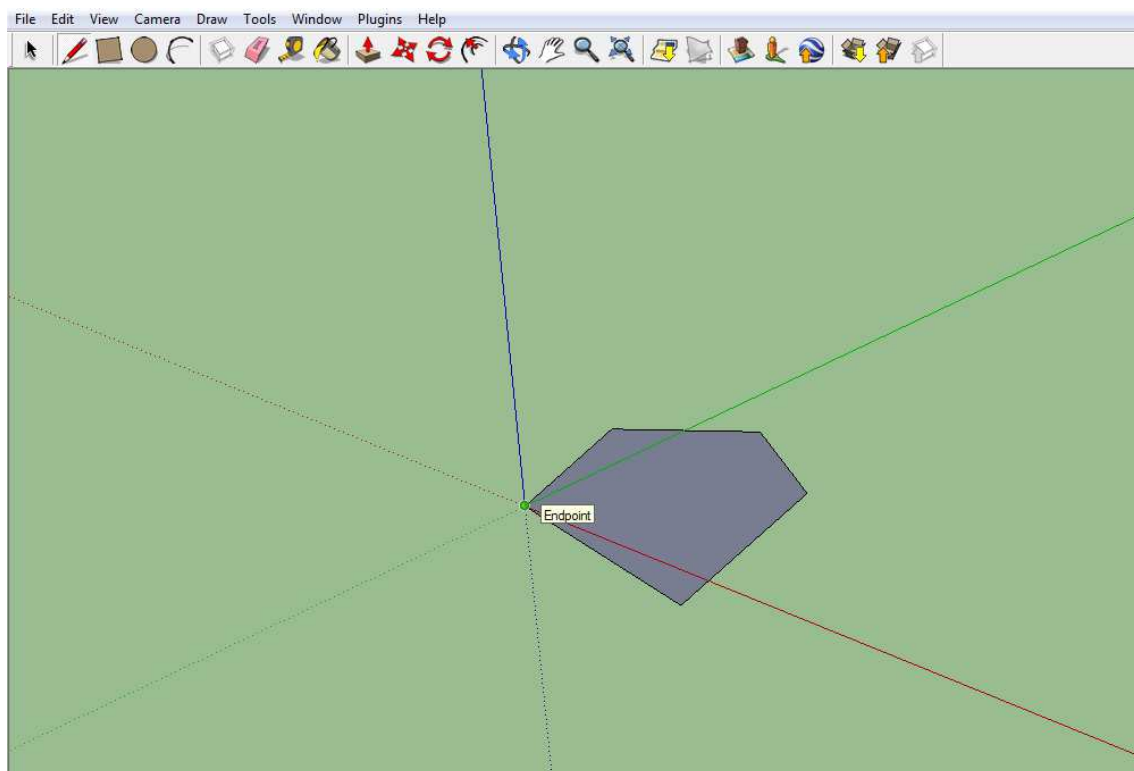
Google SketchUp jest darmowym programem komputerowym opartym o metodologię CAD, służącym do modelowania trójwymiarowego i renderowania grafiki 3D. Intuicyjna obsługa pozwala na stworzenie prostych modeli bez uprzedniej nauki obsługi tego programu. Google SketchUp charakteryzuje uproszczona geometria. Każdy model składa się głównie z odcinków i rozpiętych powierzchni pomiędzy nimi. W odróżnieniu od większości programów tego typu, SketchUp definiuje tylko powierzchnie płaskie. To rozwiązanie nie przynosi dobrych efektów wizualnych, ale może znaleźć zastosowanie wszędzie tam gdzie jest potrzebny uproszczony model geometrii.

Po uruchomieniu programu ukazuje się poniższe okno:



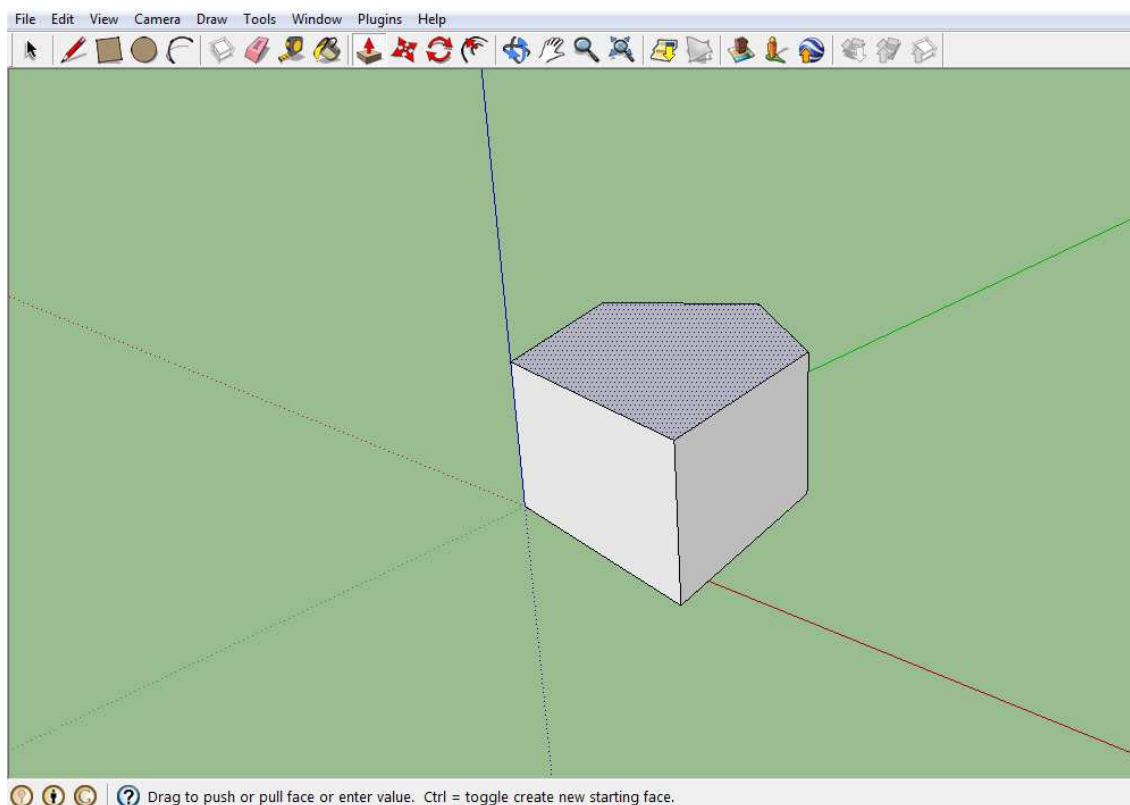
Rysunek 3.1. Główne okno programu Google SketchUp. 1 – osie układu współrzędnych, 2 – narzędzia obsługi kamery, 3 – narzędzie rysowania linii prostej, 4 – narzędzie wyłaczania.

Na rysunku (Rysunek 3.1) zaznaczone są podstawowe narzędzia do modelowania obiektów. Na wstępie mamy do dyspozycji scenę, na której umieszczone są osie układu trzech współrzędnych. Przy pomocy narzędzi obsługi kamery, dostępnych na głównym pasku narzędzi, możemy nawigować widokiem sceny. Te narzędzia dostępne są też z poziomu skrótów klawiszowych i tworzą wygodne narzędzie do nawigowania i przeglądania zawartości sceny. Narzędzie rysowania linii prostej pozwala nam na stworzenie odcinka po zaznaczeniu punktu początkowego i końcowego. Umożliwia to stworzenie dowolnej krzywej, składającej się z prostych odcinków. Jeżeli krzywa będzie zamknięta i jednocześnie wszystkie jej odcinki będą znajdować się na jednej płaszczyźnie, zostanie stworzona powierzchnia (Rysunek 3.2).



Rysunek 3.2. Tworzenie powierzchni przy pomocy narzędzia rysowania linii prostej.

Do podstawowych narzędzi modyfikacji należy narzędzie wyłaczania. Przy użyciu tego narzędzia możemy przeciągnąć daną powierzchnię wzdłuż jej normalnej, tworząc przy tym graniastosłup o danej powierzchni w podstawie (Rysunek 3.3).

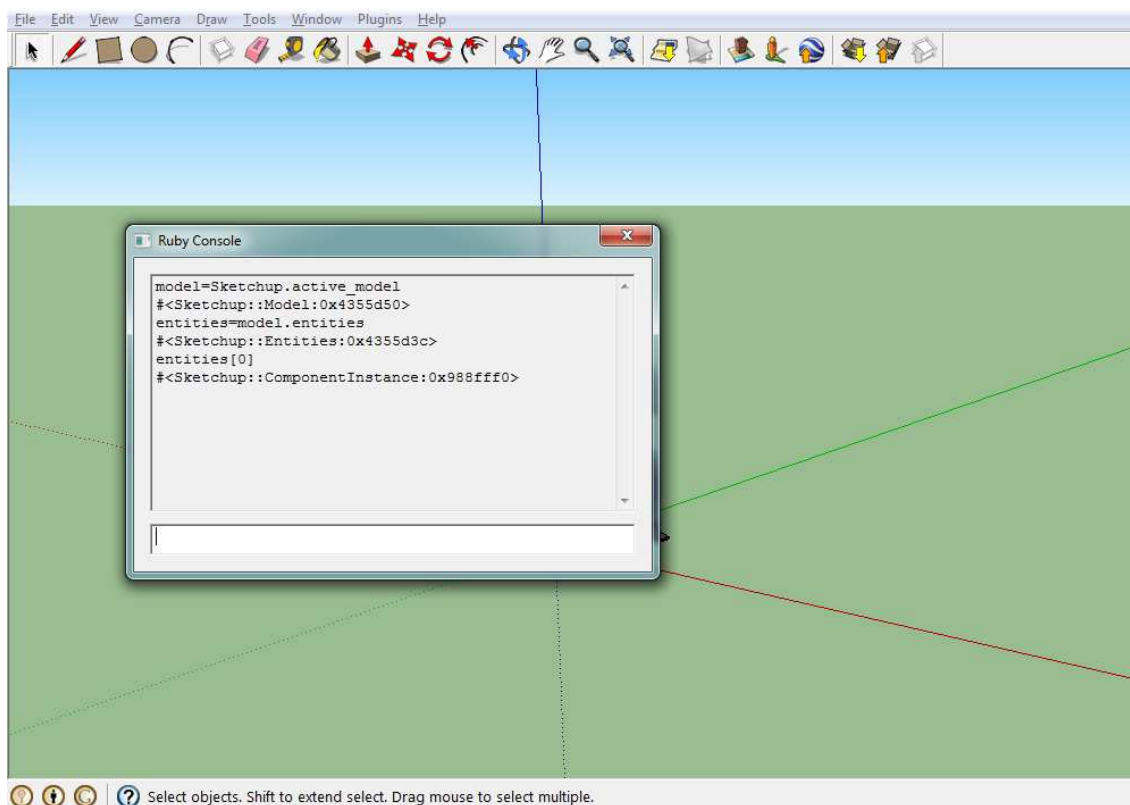


Rysunek 3.3. Figura powstała przy użyciu narzędzia wytłaczania.

Powyższe narzędzia pozwalają na stworzenie podstawowej geometrii pomieszczenia, która może stanowić bazę do przeprowadzenia obliczeń symulacyjnych. Należy nadmienić, że nie są to jedyne narzędzia umożliwiające pracę w tym programie i oprócz wyżej wymienionych, dostępny jest szereg innych dostępnych narzędzi, umożliwiających stworzenie dowolnej geometrii złożonej z odcinków i płaszczyzn [13].

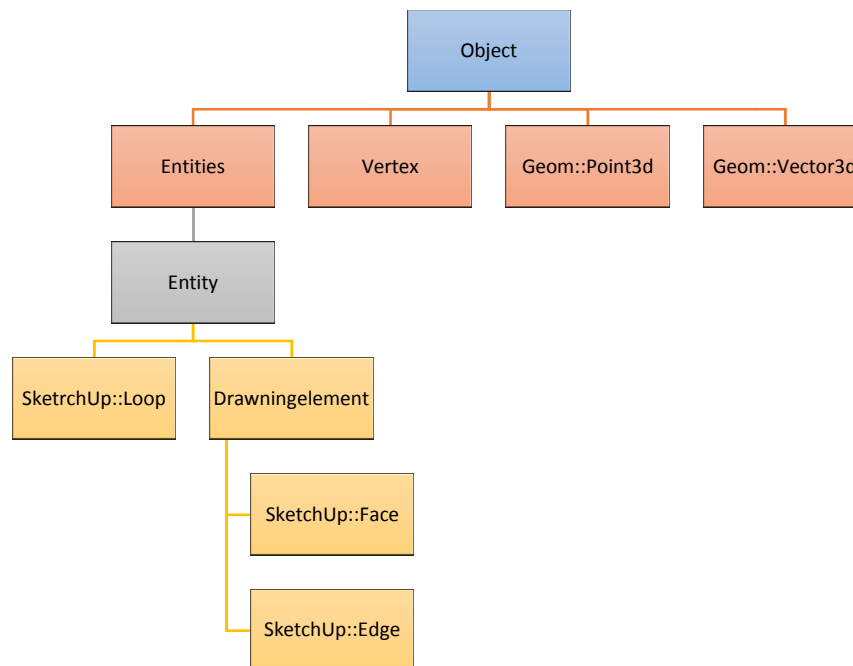
3.3 Interpreter skryptów

Poza wbudowanymi narzędziami do rysowania, edycji i nawigacji, Google SketchUp udostępnia API (ang. Application Programming Interface) do rozszerzania funkcjonalności programu o własne skrypty napisane w języku Ruby. Do oprogramowania dołączony jest interpreter (Rysunek 3.4), który umożliwia uruchomienie wcześniej napisanych skryptów, lub pisanie kodu w czasie rzeczywistym i wykonywanie go linijka po linijce.



Rysunek 3.4. Konsola interpretera kodu Ruby.

Twórcy programu udostępniają pełną dokumentację [14], która umożliwia dostęp do przechowywanych przez program obiektów. Z poziomu skryptów mamy dostęp do obiektów i klas rysunku (*Entity*) znajdujących się na scenie i mamy możliwość ich modyfikacji (Rysunek 3.5). Dostępne są również referencje do narzędzi, widoków scen, kamer, ustawień programu, okien dialogowych. Dokumentacja udostępnia metody klas abstrakcyjnych, związane z przeliczeniami geometrycznymi, oraz metody klas obiektów rysunku, które umożliwiają modyfikowanie tych obiektów i tworzenie nowych. Cała dokumentacja pozwala nam na dowolne zmodyfikowanie funkcjonalności i wyglądu programu, oraz na stworzenie dodatkowych narzędzi i przeprowadzenie obliczeń w tle działającego programu. Podczas pisania pracy autor korzystał w większości z obiektów i podklas klasy *Entity*, których hierarchia została załączona na poniższym rysunku (Rysunek 3.5). W hierarchii zostały przedstawione tylko klasy użyte do napisania pracy, cały przekrój klas dostępny jest w dokumentacji.



Rysunek 3.5. Hierarchia wybranych klas Ruby API.

3.4 Język Ruby

Google SketchUp umożliwia użytkownikom ingerencje w oprogramowanie za pośrednictwem dwóch języków: C++ i Ruby. O ile pierwszy z nich charakteryzuje się wysoką wydajnością, o tyle skrypty w nim napisane wymagają kompilacji przed uruchomieniem głównego programu i ich funkcjonalność wykonywana jest poza nim. Wymusza to użycie protokołów komunikacyjnych pomiędzy głównym programem i rozszerzeniem. Ponadto API języka C++ nie jest już uaktualniane. API języka Ruby jest ciągle rozwijane i umożliwia szerszy dostęp do modyfikacji funkcjonalności głównego programu, dlatego autor zdecydował się na korzystanie z tego języka.

Ruby jest to obiektowy język programowania powstały w 1995. Składnia wzorowana jest na językach CLU oraz w mniejszym stopniu Perl (Rysunek 3.6). Głównie wykorzystywany jest do tworzenia aplikacji internetowych za pośrednictwem Framework Ruby on Rails. Ruby przeprowadza automatyczne odświeżanie pamięci (ang. garbage collection), umożliwia przeciążanie operatorów i rozpoznaje typy obiektów na podstawie ich zachowania. Czyni to ten język wygodnym w obsłudze i umożliwia zmianę i modyfikację praktycznie wszystkich wbudowanych instancji.

```
    toolbar=UI::Toolbar.new "my toolbar"
cmd = UI::Command.new("my toolbar") {
  source = [1 ,1 , 1]
  Walls = Array.new
  e=Sketchup.active_model.entities
  e.each do |entity|
    if entity.is_a? Sketchup::Face
      Walls << Wall.new(entity)
    end
  end
end
```

Rysunek 3.6. Przykładowy kod w języku Ruby.

4 Realizacja założeń projektowych

4.1 Wprowadzenie

Projekt został zrealizowany w oparciu o paradygmat programowania obiektowego przy użyciu ogólnie dostępnych algorytmów i rozwiązań programistycznych [15] oraz autorskich algorytmów. W podrozdziale 4.2 został przedstawiony kod programu wraz z opisem poszczególnych jego części. Tak złożony kod, opierający się w większości na zewnętrznej bibliotece, jest nieczytelny bez zaawansowanej znajomości dokumentacji programowej. Z tego powodu w kolejnych rozdziałach realizacja kodu będzie przedstawiona w formie pseudokodu i diagramów UML [16].

Program stanowiący nie tylko model obliczeniowy, ale także użyteczną aplikację, wymaga stworzenia czytelnego graficznego interfejsu użytkownika. Interfejs programistyczny Ruby API [14] umożliwia modyfikację części graficznej głównego programu. Pozwoliło to autorowi na stworzenie GUI (ang. Graphical User Interface) w postaci dodatkowego paska narzędzi do głównego programu, który umożliwia przygotowanie geometrii i przeprowadzenie obliczeń. Obsługa programu została przedstawiona w rozdziale 4.3.

4.2 Realizacja algorytmu

Podstawą głównego algorytmu jest klasa *Wall* (Rysunek 4.1), której obiekty przechowują wszystkie informacje o kolejnych powierzchniach odbijających w geometrii.

Wall
- widoczneSciany: Wall[] - powierzchnia: Face - wspPochlaniania: double
+ inicjalizacja(powierzchnia: Face) + dodajWidocznaSciane(powierzchnia: Wall) + liczKolejneZrodla(zrodlo: Point3d,rzad: int, odbiornik: Point3d): Point3d[] <u>- odbicieSymetryczne(zrodlo: Point3d)</u> <u>- czyZrodloIstnieje(zrodlo: Point3d, odbiornik: Point3d)</u>

Rysunek 4.1. Klasa Wall w notacji UML.

Obiekt *Wall* przechowuje informacje o odpowiadającej jej powierzchni w postaci obiektu klasy *Face* oraz zmiennej przechowującej współczynnik pochłaniania. Metoda *inicjalizacja* pozwala na przypisanie danemu obiektowi powyższych parametrów. Wyznaczanie kolejnych rzędów źródeł pozornych odbywa się za pomocą rekurencyjnej metody *liczKolejneZrodla* (Rysunek 4.2). Zadaniem metody jest odbicie symetryczne źródła dźwięku względem płaszczyzny danego obiektu klasy *Wall* przy użyciu metody *odbicieSymetryczne*, a następnie przekazanie argumentu do kolejnych obiektów klasy *Wall* i wywołanie w nich tej samej metody. Rekurencja kończy działanie po ilości zagnieżdżeń odpowiadającej zadanemu rzędowi szukanych źródeł. Podczas działania metoda sprawdza przy użyciu metody *czyZrodloIstnieje* czy dane odbicie jest możliwe w danej geometrii.

```

liczKolejneZrodla(zrodlo: Point3d, rzad: int, odbiornik: Point3d)
    noweZrodlo=odbicieSymetryczne(zrodlo)
    przeliczenie współczynnika pochłoniętej energii
    jeżeli noweZrodlo nie istnieje to:
        zwróć pustą tablicę
    w przeciwnym razie:
        jeżeli rzad>0 to:
            dla każdego elementu Sciana z tablicy widoczneSciany:
                tablicaZrodel=Sciana.liczKolejneZrodla( ...
                ... noweZrodlo, rzad-1, odbiornik)
            dla każdego elementu ZrodloPozorne z tablicy ...
            ... tablicaZrodel:
                jeżeli ZrodloPozorne istnieje to:
                    dodaj ZrodloPozorne do zwracanej tablicy
        zwróć wyliczone źródło pozorne, lub tablicę źródeł pozornych

```

Rysunek 4.2. Pseudokod metody *liczKolejneZrodla*.

W celu pominięcia zbędnych obliczeń dla dwukrotnego odbicia symetrycznego od tej samej powierzchni, które nie ma odwzorowania w rzeczywistym zachowaniu się fali, obiekt *Wall* przekazuje argument pozycji źródła do obiektów klasy *Wall* z pominięciem samego siebie. Ponadto, w celu zredukowania ilości operacji, dany obiekt klasy *Wall* pomija również te obiekty, które nie są przez niego widoczne – nie jest możliwe poprowadzenie dowolnego odcinka z jednego obiektu do drugiego. W celu optymalizacji algorytmu dla każdego obiektu klasy *Wall* tworzona jest, przy użyciu metody *dodajWidocznaSciane*, mapa widocznych powierzchni *widoczneSciany*, po których iteruje metoda *liczKolejneZrodla*.

Aby rozpocząć symulację po stworzeniu geometrii i zadaniu parametrów następuje iteracja po wszystkich obiektach *Entity* w poszukiwaniu obiektów klasy *Face* (Rysunek 3.5), a następnie stworzenie dla każdego obiektu klasy *Face* nowego obiektu

klasy Wall. Następnie w pętli kolejno realizowane jest poszukiwanie siatek źródeł pozornych kolejnych rzędów aż do zadanego. W każdej iteracji pętli na każdym obiekcie klasy Wall wywoływana jest metoda *liczKolejneZrodla* z odpowiednim parametrem rzędu obliczeń. Wszystkie wyznaczone źródła pozorne wraz z odpowiadającymi im współczynnikami pochłoniętej energii zbierane są w jednej tablicy i zwracane do pliku. Powyższy algorytm przedstawia poniższy kod:

```
dla każdego elementu z tablicy elementów Entity w modelu:
    jeżeli element jest powierzchnią to:
        dodaj do tablicy Powierzchnie daną powierzchnie

dla każdego elementu wall z tablicy Powierzchnie:
    sprawdź, które powierzchnie są widoczne i dodaj je do tablicy
    widoczneSciany

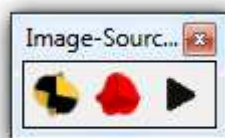
dla każdego rzędu od 1 do zadanego przez użytkownika:
    dla każdego elementu wall z tablicy Powierzchnie:
        dodaj do tablicy zrodlaPozorne wynik działania metody
        liczKolejneZrodla dla obiektu wall

przekaż tablicę zrodlaPozorne do pliku
```

Rysunek 4.3. Pseudokod algorytmu wyznaczania siatki źródeł pozornych.

4.3 Obsługa aplikacji

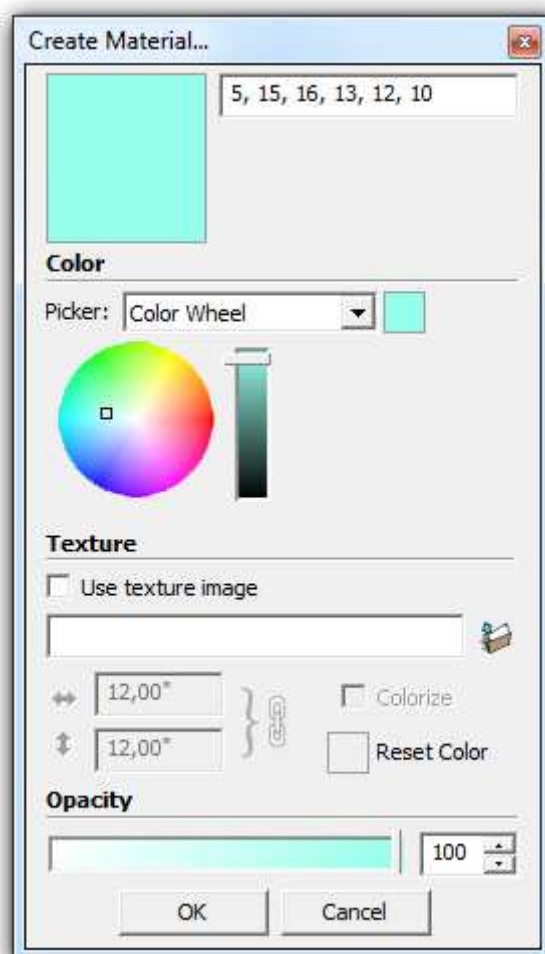
Do funkcjonalnej obsługi modelu obliczeniowego został stworzony dodatkowy pasek narzędzi z narzędziami to tworzenia geometrii i przeprowadzenia obliczeń (Rysunek 4.4).



Rysunek 4.4. Pasek narzędzi do obsługi modelu obliczeniowego. Kolejno narzędzia: umieszczenia odbiornika, umieszczenia źródła dźwięku, uruchomienia obliczeń.

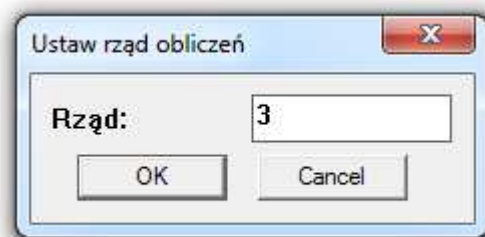
Użytkownik przy pomocy dwóch pierwszych narzędzi może nadać pozycje źródła dźwięku i odbiornika wybierając narzędzie i klikając lewym klawiszem myszy w punkcie geometrii gdzie dany element ma się znaleźć. Korzystając z wbudowanego w program Google SketchUp kreatora materiałów (Rysunek 4.5) użytkownik może zdefiniować materiały powierzchni odbijających przypisując im współczynniki

pochłaniania dla pasm tercjowych: 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz i 4000 Hz.



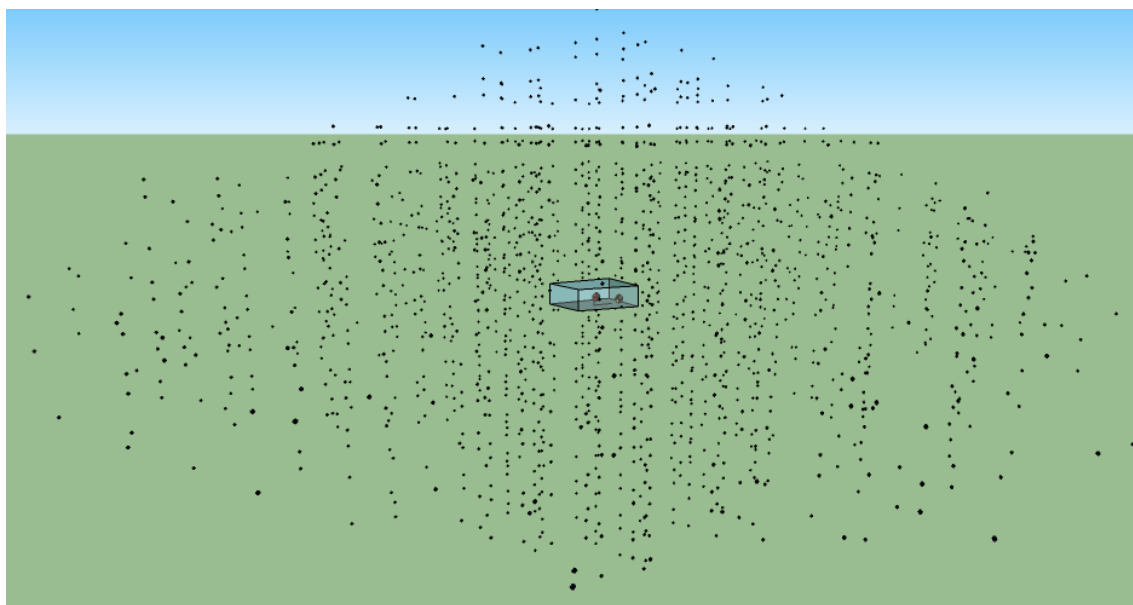
Rysunek 4.5. Kreator materiałów Google SketchUp.

Współczynniki pochłaniania definiowane są w nazwie materiału, wpisywane kolejno po przecinkach. Po ustawieniu parametrów geometrii użytkownik może rozpocząć obliczenia przy użyciu trzeciego przycisku z paska narzędzi (Rysunek 4.4). Program przed rozpoczęciem symulacji wyświetli okno dialogowe (Rysunek 4.6) pytające o maksymalny rząd obliczeń dla siatki źródeł pozornych.



Rysunek 4.6. Okno dialogowe z ustawieniami obliczeń.

Po uruchomieniu obliczeń program wyświetli okno dialogowe do wyboru lokalizacji pliku z obliczoną siatką źródeł pozornych wraz z przypisanymi do nich współczynnikami pochłoniętej energii w postaci tabelarycznej. Dane punkty zostaną również umieszczone w widocznej geometrii w głównym programie (Rysunek 4.7).



Rysunek 4.7. Model geometrii pomieszczenia z umieszczonymi punktami siatki źródeł pozornych.

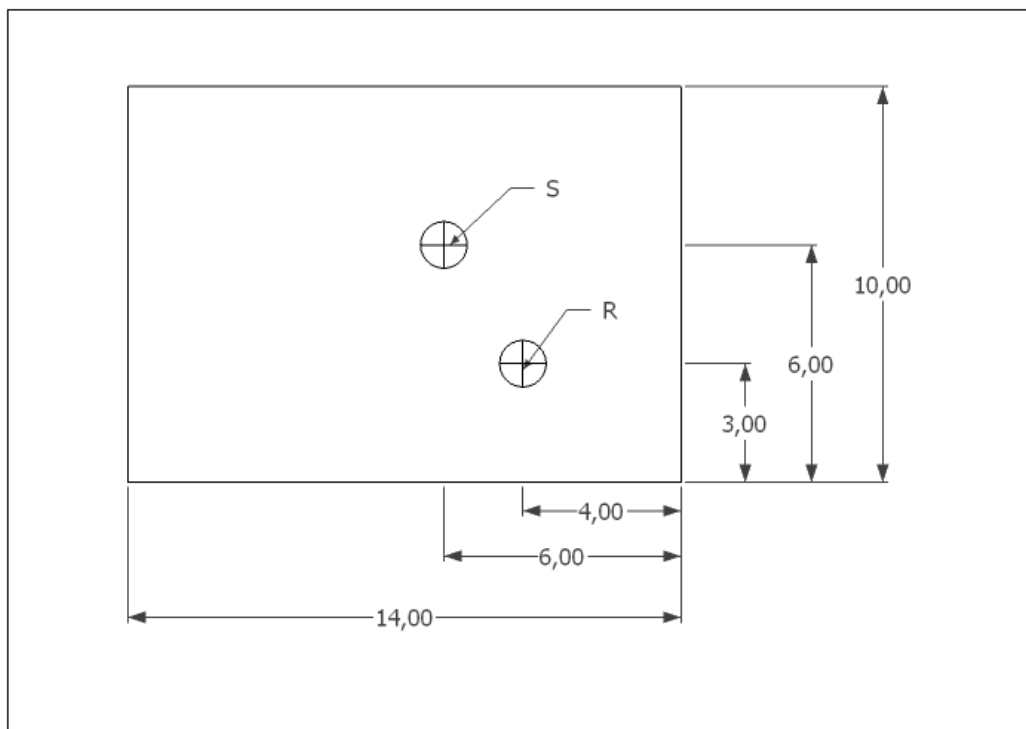
5 Obliczenia testowe

5.1 Wprowadzenie

W celu sprawdzenia poprawności implementacji metody zostały przygotowane odpowiednie testy oprogramowania. Z przyczyn technicznych testy były przeprowadzone na podstawie wyznaczonych algebraicznie siatek źródeł pozornych jedynie kilku początkowych rzędów oraz dla prostych geometrii. Aby sprawdzić poprawność algorytmu dla skomplikowanych geometrii i dla wyższych rzędów odbić do testów zostały wyznaczone pojedyncze punkty, które autor uznał za najbardziej newralgiczne. Oprogramowanie spełniło wszystkie testy i jego implementacja uznana jest za poprawną.

Poza poprawnością algorytmu zdecydowano się na sprawdzenie użyteczności programu i przedstawienie wyników jego działania dla różnych modeli pola akustycznego. Wyniki przedstawione zostały w postaci echogramów, krzywych zaniku dźwięku oraz czasu pogłosu. Ze względu na charakterystykę metody źródeł pozornych, która generuje stosunkowo krótkie odpowiedzi impulsowe, zdecydowano się na obliczenie wczesnego czasu pogłosu (EDT). Działanie metody zostało porównane z wynikami metody promieniowej uzyskanymi za pomocą programu CATT-Acoustic oraz ze statystyczną teorią pola akustycznego Sabine'a [17]. Dodatkowo zostały przeprowadzone obliczenia sprawdzające wydajność obliczeniową algorytmu.

Obliczeniom zostały poddane 5 modeli pomieszczeń ze zróżnicowaną geometrią, parametrami pochłaniania oraz umiejscowieniem źródła dźwięku i odbiornika. Ich najistotniejsze parametry zostały przedstawione na poniższych rysunkach i w tabelach (Rysunek 5.1 – 5.4) (Tabela 5.1 – 5.3).



Rysunek 5.1. Geometria i wymiary [m] dla modeli 1-3. S – źródło dźwięku, R – odbiornik.

Tabela 5.1. Charakterystyka modelu 1.

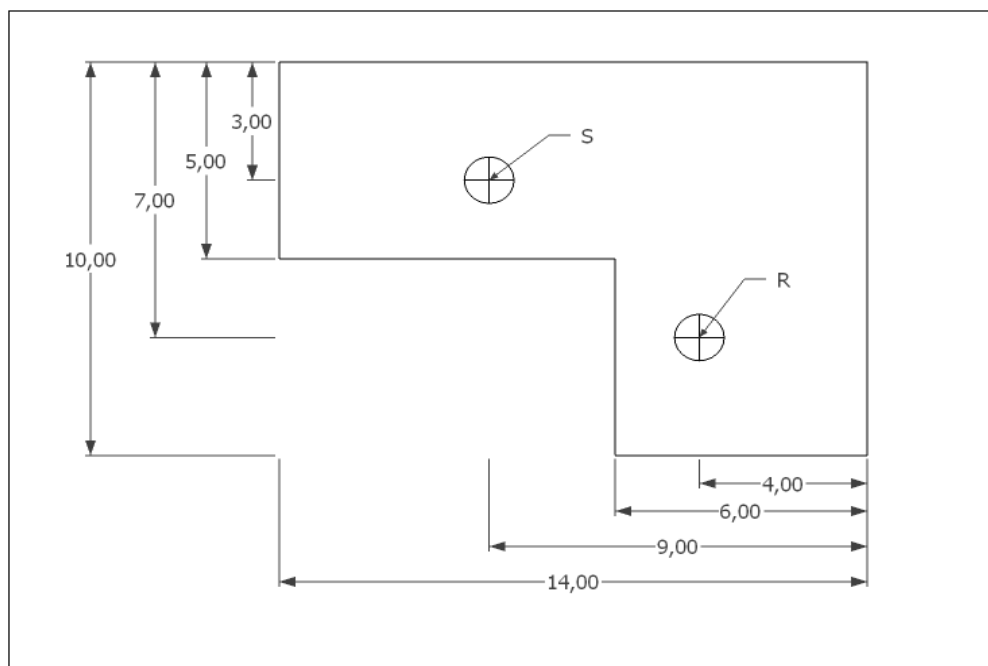
Powierzchnia	Współczynnik pochłaniania
Sufit	0.15
Podłoga	0.15
Górna	0.15
Dolna	0.15
Lewa	0.15
Prawa	0.15

Tabela 5.2. Charakterystyka modelu 2.

Powierzchnia	Współczynnik pochłaniania
Sufit	0.45
Podłoga	0.45
Górna	0.45
Dolna	0.45
Lewa	0.45
Prawa	0.45

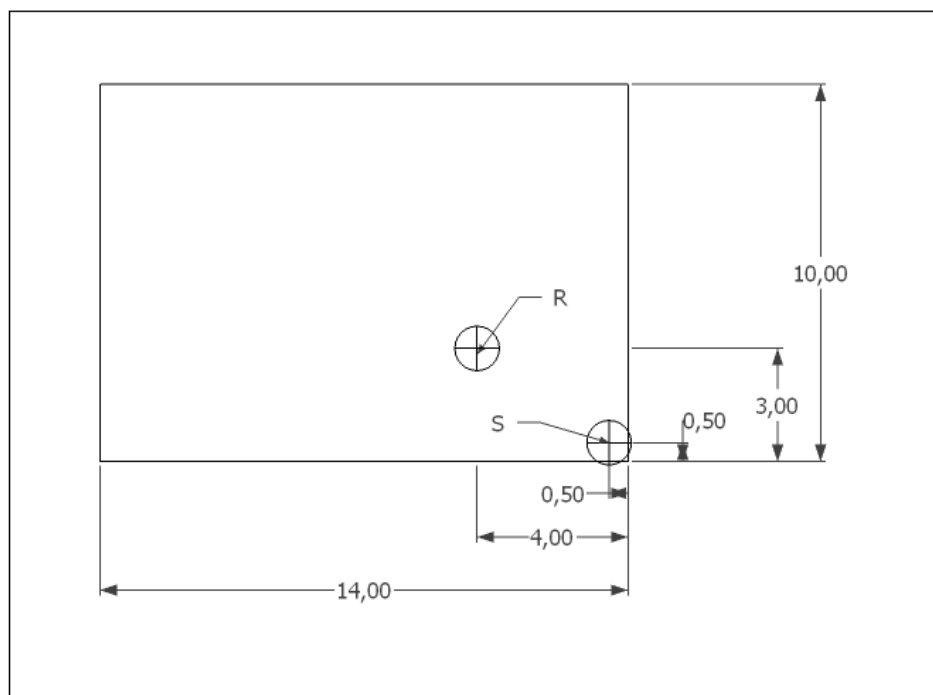
Tabela 5.3. Charakterystyka modelu 3.

Powierzchnia	Współczynnik pochłaniania
Sufit	0.25
Podłoga	0.25
Górna	0.55
Dolna	0.25
Lewa	0.25
Prawa	0.55



Rysunek 5.2. Geometria i wymiary [m] dla modelu 4. S – źródło dźwięku, R – odbiornik.

Wszystkie powierzchnie w modelu 4 (Rysunek 5.2) mają współczynnik pochłaniania $\alpha = 0.45$.

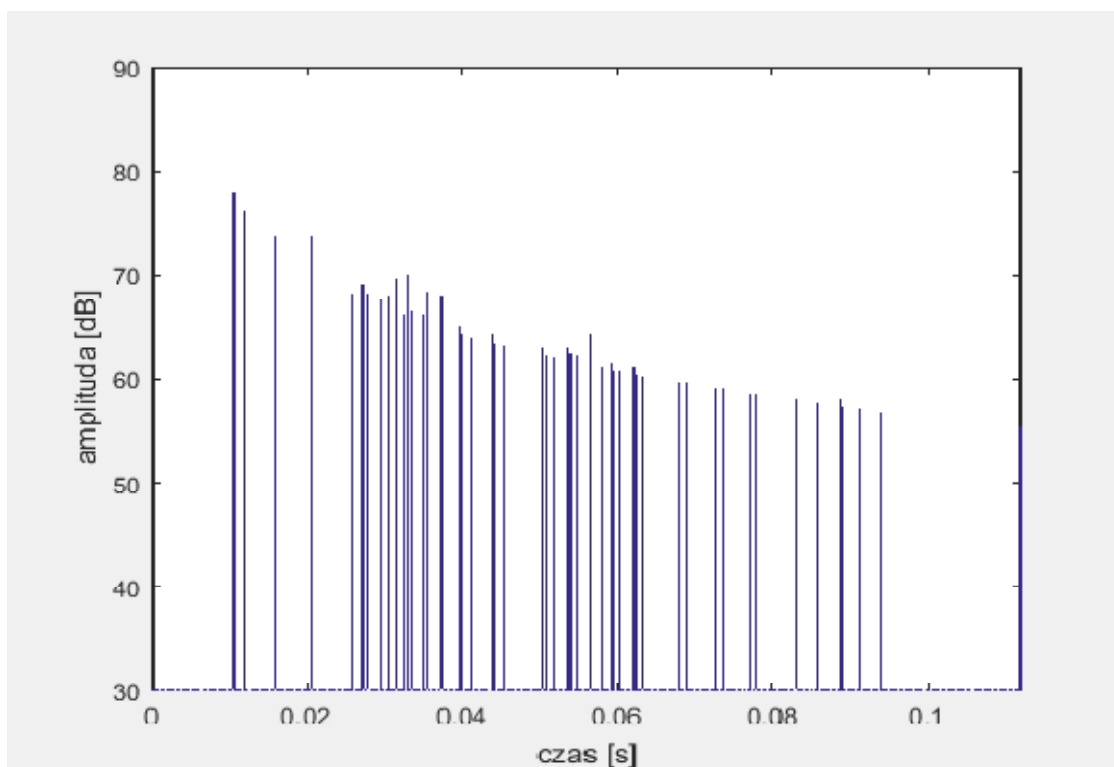


Rysunek 5.3. Geometria i wymiary [m] dla modelu 5. S – źródło dźwięku, R – odbiornik.

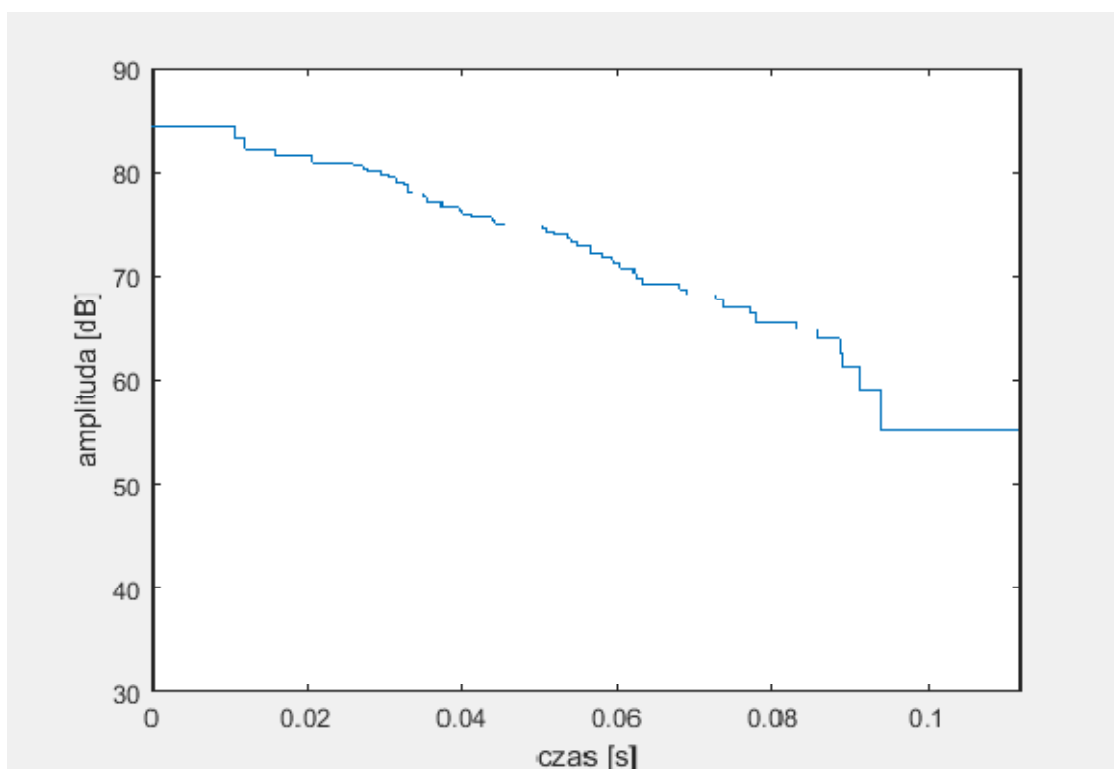
Wszystkie powierzchnie w modelu 5 (Rysunek 5.3) mają współczynnik pochłaniania $\alpha = 0.45$.

5.2 Obliczenia przy użyciu metody źródeł pozornych

Obliczenia przy użyciu napisanego algorytmu zostały przeprowadzone dla siatki źródeł pozornych do rzędu trzeciego i rzędu ósmego. Wyniki w postaci echogramów, krzywych zaniku i wczesnego czasu pogłosu zostały przedstawione poniżej dla wybranych modeli. Pozostałe wyniki zostały przedstawione w załączniku A.

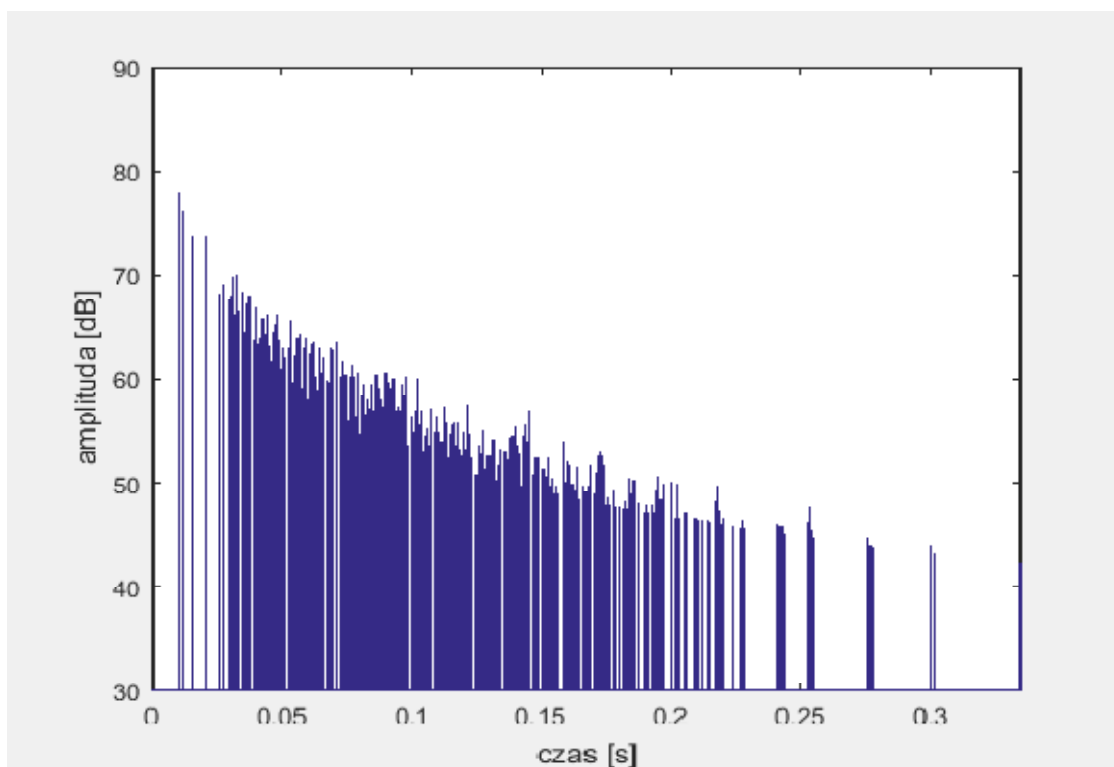


Rysunek 5.4. Echogram wyznaczony na podstawie siatki źródeł pozornych do rzędu 3 dla modelu 1.

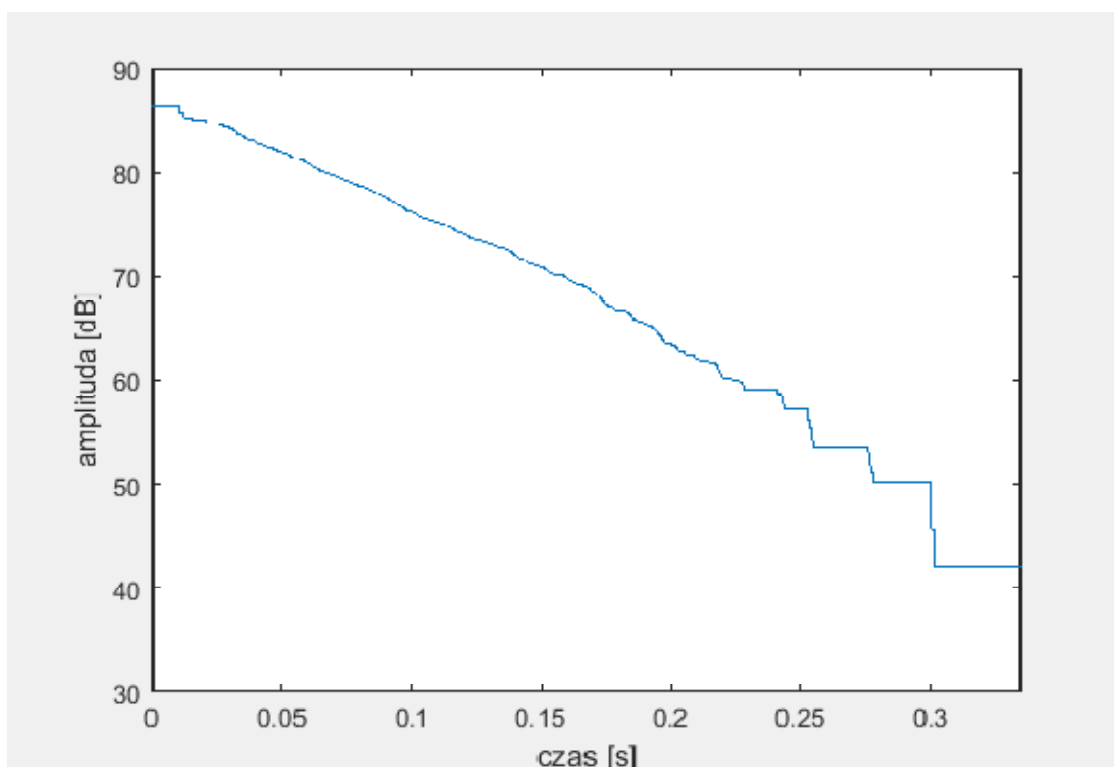


Rysunek 5.5. Krzywa zaniku dźwięku wyznaczona na podstawie siatki źródeł pozornych do rzędu 3 dla modelu 1.

$$EDT_3 = 0.25 \text{ s}$$

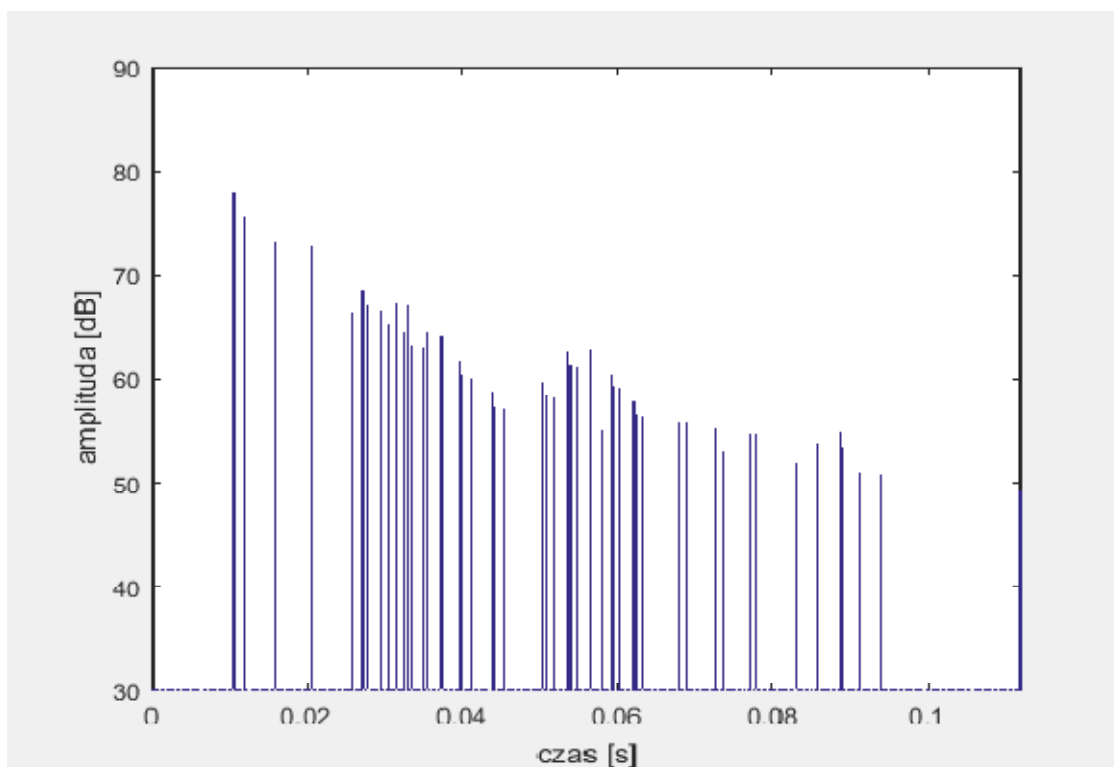


Rysunek 5.6. Echogram wyznaczony na podstawie siatki źródeł pozornych do rzędu 8 dla modelu 1.

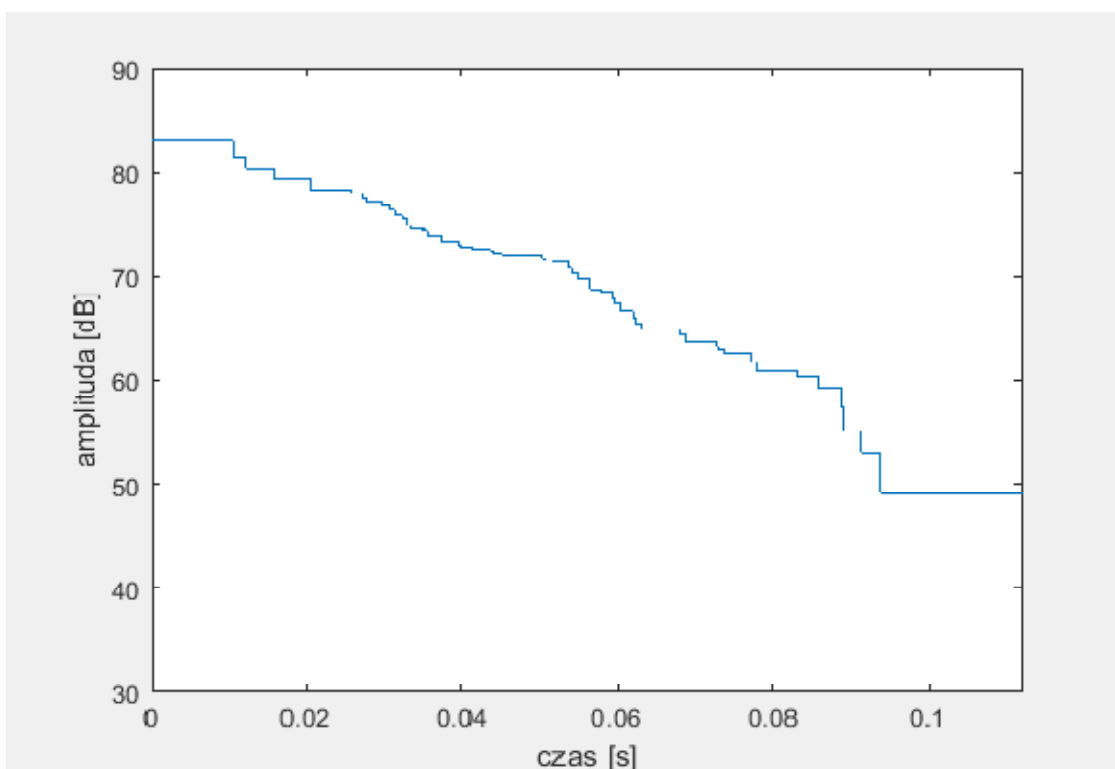


Rysunek 5.7. Krzywa zaniku dźwięku wyznaczona na podstawie siatki źródeł pozornych do rzędu 8 dla modelu 1.

$$EDT_8 = 0.51 \text{ s}$$

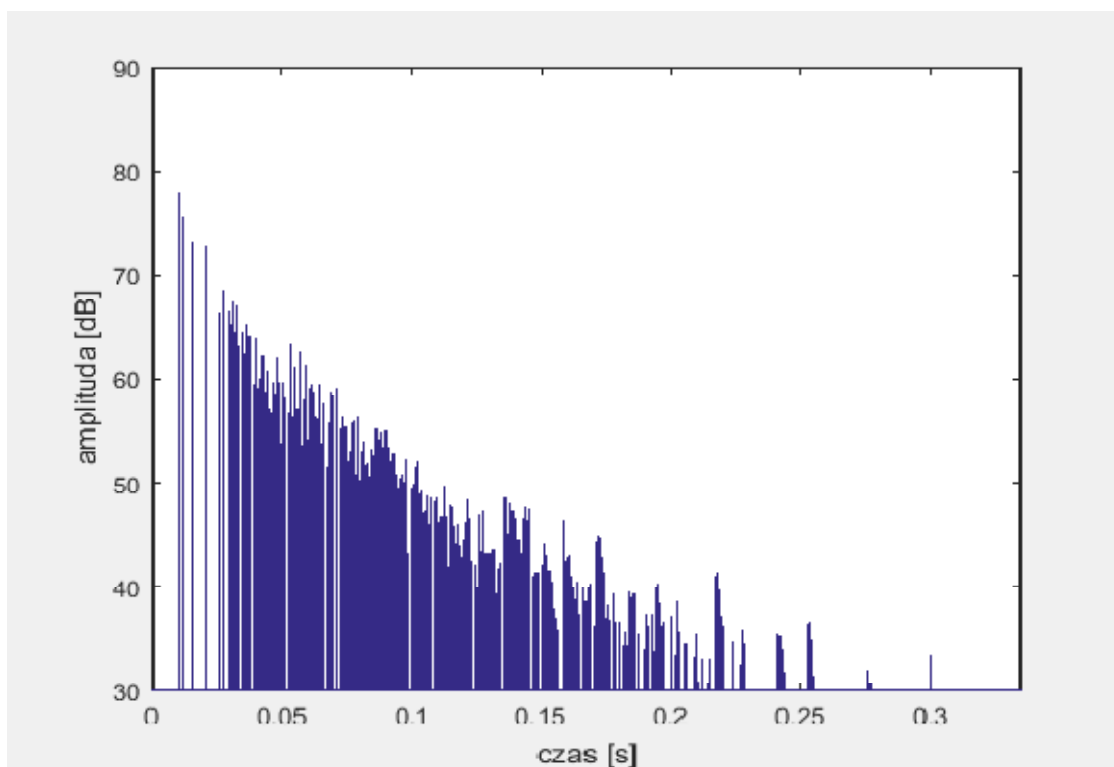


Rysunek 5.8. Echogram wyznaczony na podstawie siatki źródeł pozornych do rzędu 3 dla modelu 3.

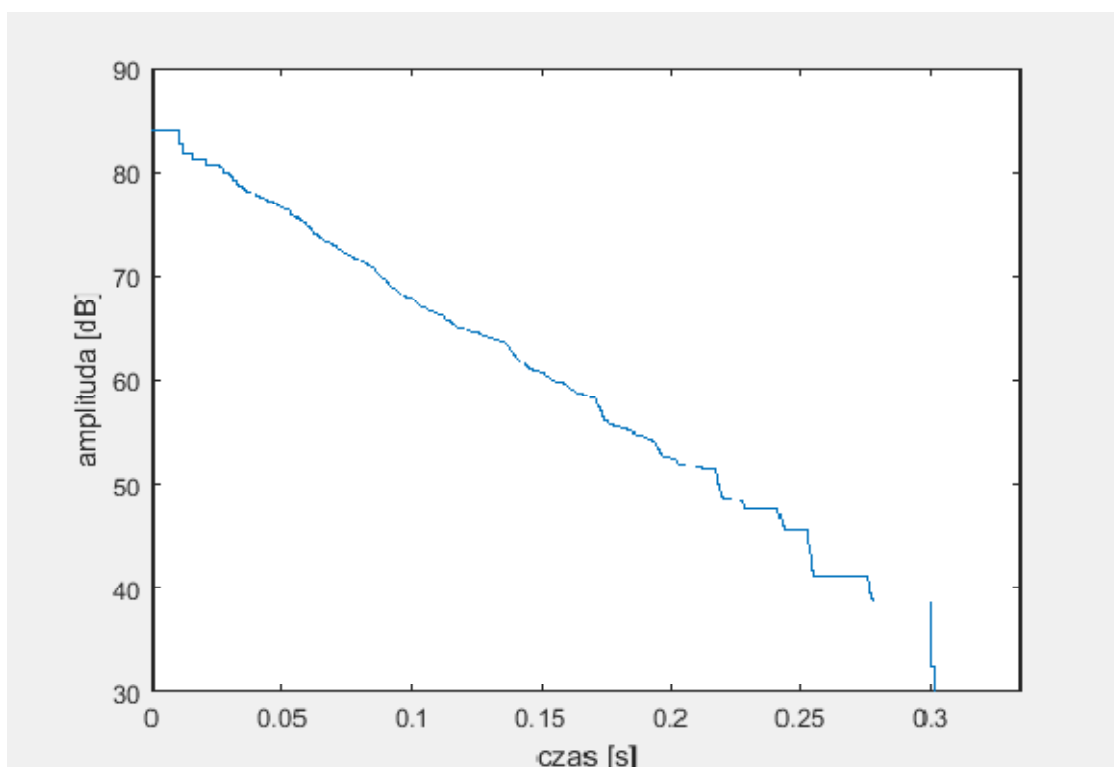


Rysunek 5.9. Krzywa zaniku dźwięku wyznaczona na podstawie siatki źródeł pozornych do rzędu 3 dla modelu 3.

$$\text{EDT}_3 = 0.22 \text{ s}$$



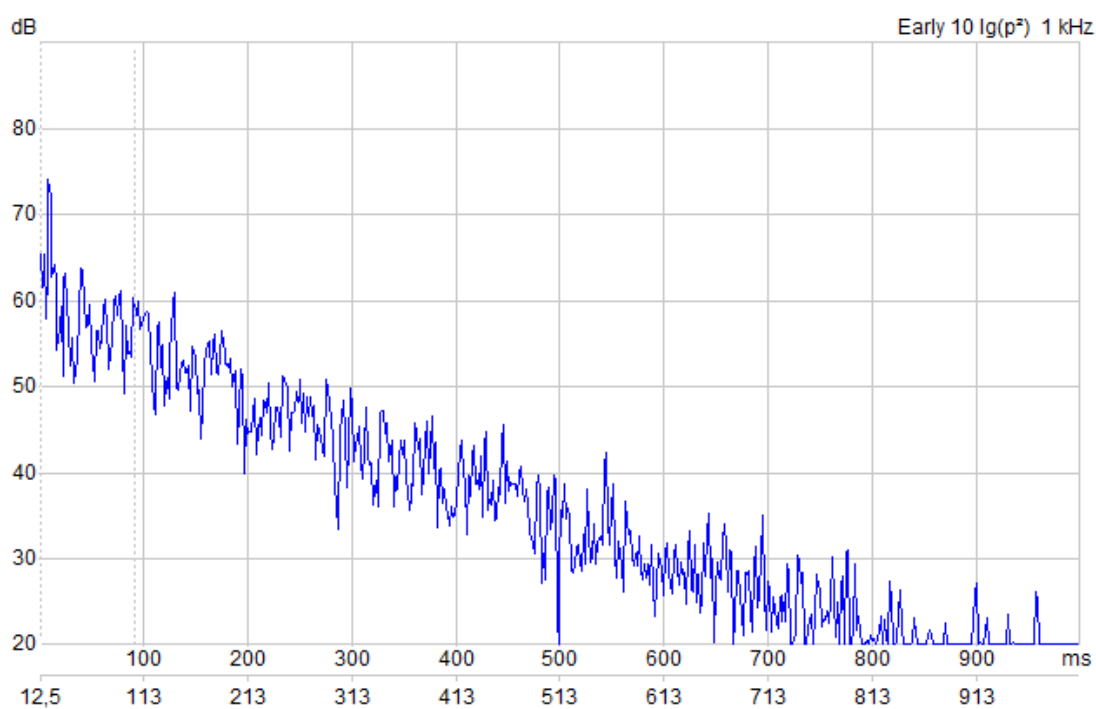
Rysunek 5.10. Echogram wyznaczony na podstawie siatki źródeł pozornych do rzędu 8 dla modelu 3.



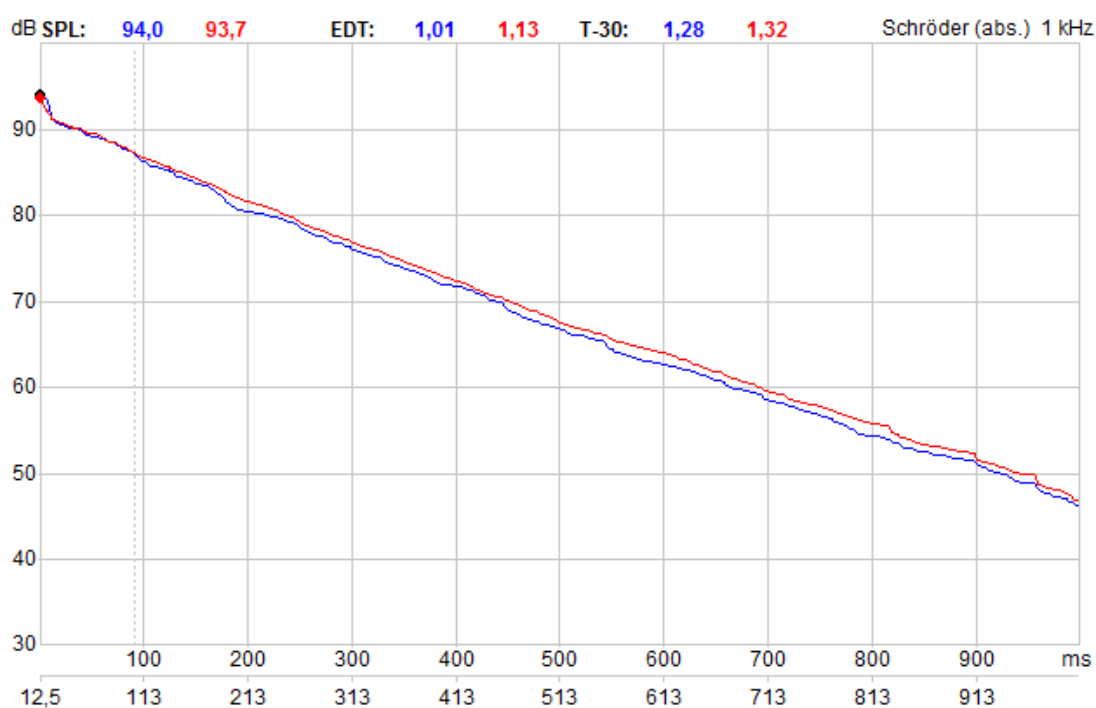
Rysunek 5.11. Krzywa zaniku dźwięku wyznaczona na podstawie siatki źródeł pozornych do rzędu 3 dla modelu 3.

$$\text{EDT}_8 = 0.4 \text{ s}$$

5.3 Obliczenia przy użyciu metody promieniowej

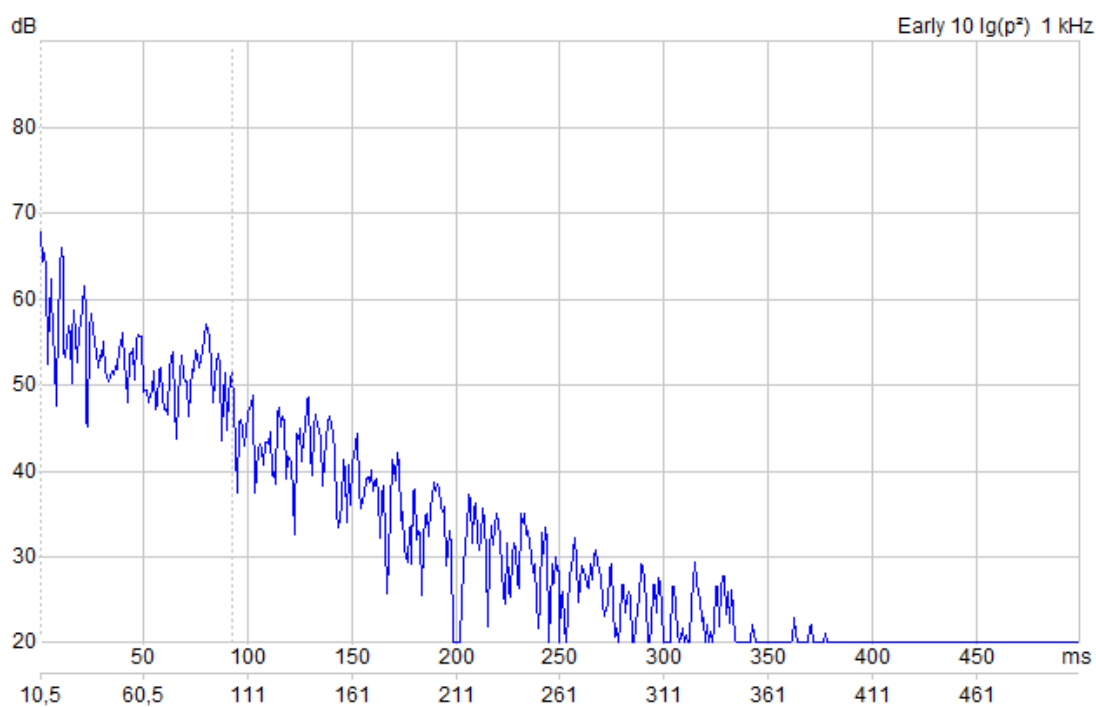


Rysunek 5.12. Echogram wyznaczony metodą promieniową dla modelu 1.

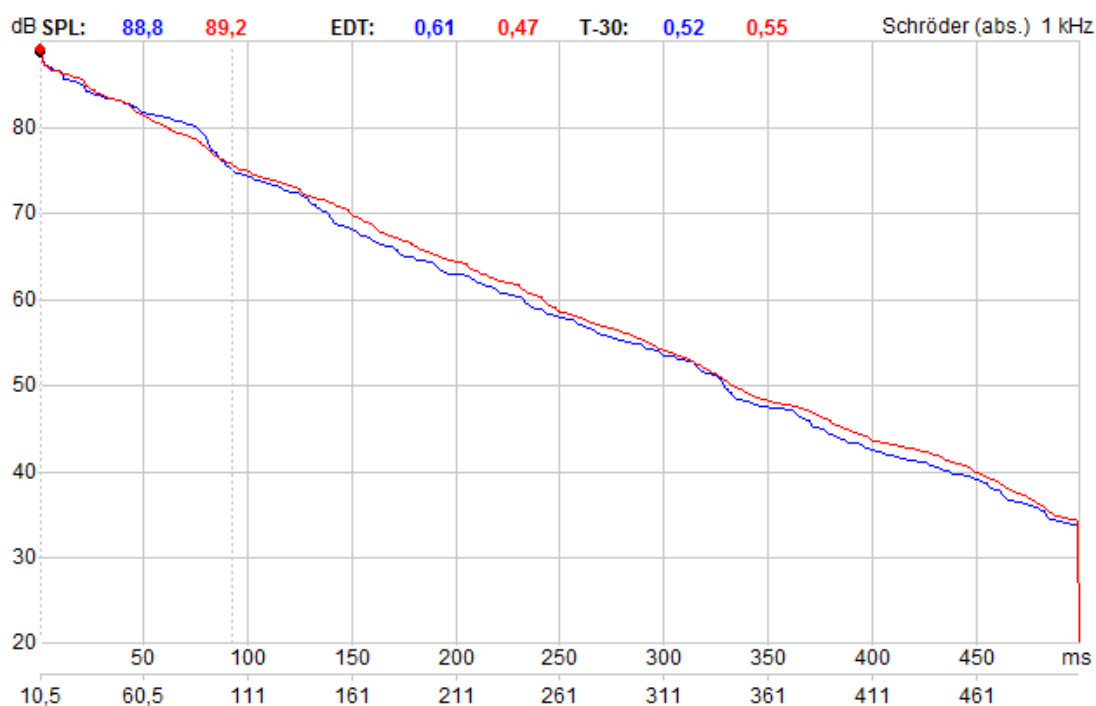


Rysunek 5.13. Krzywa zaniku dźwięku wyznaczona metodą promieniową dla modelu 1.

$$\text{EDT} = 1.01 \text{ s}$$



Rysunek 5.14. Echogram wyznaczony metodą promieniową dla modelu 3.



Rysunek 5.15. Krzywa zaniku dźwięku wyznaczona metodą promieniową dla modelu 3.

$$\text{EDT} = 0.61 \text{ s}$$

5.4 Obliczenia w oparciu o statystyczną teorię pola akustycznego

W oparciu o wzór Sabine'a (Wzór 5.1) dla każdego modelu zostały obliczone czasy pogłosu.

$$T = \frac{0.161 \cdot V}{A} \quad (5.1)$$

Tabela 5.4. Czasy pogłosu dla poszczególnych modeli geometrycznych.

Model	Czas pogłosu
1	1.06 s
2	0.35 s
3	0.55 s
4	0.31 s
5	0.35 s

5.5 Wydajność obliczeniowa

Opisana złożoność obliczeniowa (Wzór 2.1) jest prawdziwa dla algorytmu przeznaczonego do obliczeń dla geometrii złożonej z figury wypukłej. Algorytm użyty w pracy pozwala na obliczenia na bardziej złożonym modelu, co wymagało rozbudowanie algorytmu podstawowego o dodatkowe funkcje i zwiększenie jego złożoności obliczeniowej (Wzór 5.2).

$$F(K, N) = K^2 \frac{1 - (K-1)^N}{2 - K}, \quad (5.2)$$

gdzie:

K – liczba powierzchni odbijających

N - maksymalny rząd odbić

...

Tabela 5.9. Wydajność obliczeniowa algorytmu.

	Liczba powierzchni			
L. odbić	6	7	8	9
1	0,001 s	0 s	0 s	0,001 s
2	0,003 s	0,002 s	0,002 s	0,005 s
3	0,017 s	0,01 s	0,014 s	0,021 s
4	0,045 s	0,041 s	0,084 s	0,118 s
5	0,147 s	0,173 s	0,348 s	0,579 s
6	0,429 s	0,695 s	1,486 s	2,757 s
7	1,221 s	2,494 s	6,267 s	13,305 s
8	3,77 s	8,899 s	26,65 s	62,126 s
9	11,696 s	31,516 s	112,302 s	
10	36,679 s	112,159 s		
11	111,627 s			
12	342,894 s			

6 Podsumowanie

W ramach pracy zbudowano aplikację, która umożliwia przeprowadzenie obliczeń metodą źródeł pozornych na dowolnym modelu geometrycznym stworzonym w środowisku SketchUp. Aplikacja jest wbudowana w środowisko SketchUp wraz z funkcjonalnym interfejsem graficznym, co pozwala na prostą obsługę programu. Optymalizacja algorytmu pozwoliła na uzyskanie siatek źródeł pozornych wysokich rzędów w stosunkowo krótkim czasie, a jego implementacja pozwala na rozbudowanie go o dodatkową funkcjonalność.

Metoda źródeł pozornych nawet dla niskich rzędów odbić daje nam informacje o kierunkowości dźwięku dochodzącego do źródła oraz o czasie dochodzenia do źródła pierwszych odbić. Jednak przy ocenie pogłosowości pomieszczenia okazuje się, że metoda ma ograniczony zakres stosowania, co przedstawia poniższa tabela 6.1.

Tabela 6.1. Zestawienie wyznaczonych wczesnych czasów pogłosu dla modeli 1-5.

Numer modelu pomieszczenia	Wczesny czas pogłosu [s]			
	Metoda źródeł pozornych z odbiciami do rzędu 3	Metoda źródeł pozornych z odbiciami do rzędu 8	Metoda promieniowa	Statystyczna teoria pola akustycznego
1	0.25	0.51	1.01	1.06
2	0.21	0.36	0.36	0.35
3	0.22	0.4	0.61	0.55
4	0.18	0.3	0.35	0.31
5	0.23	0.38	0.38	0.35

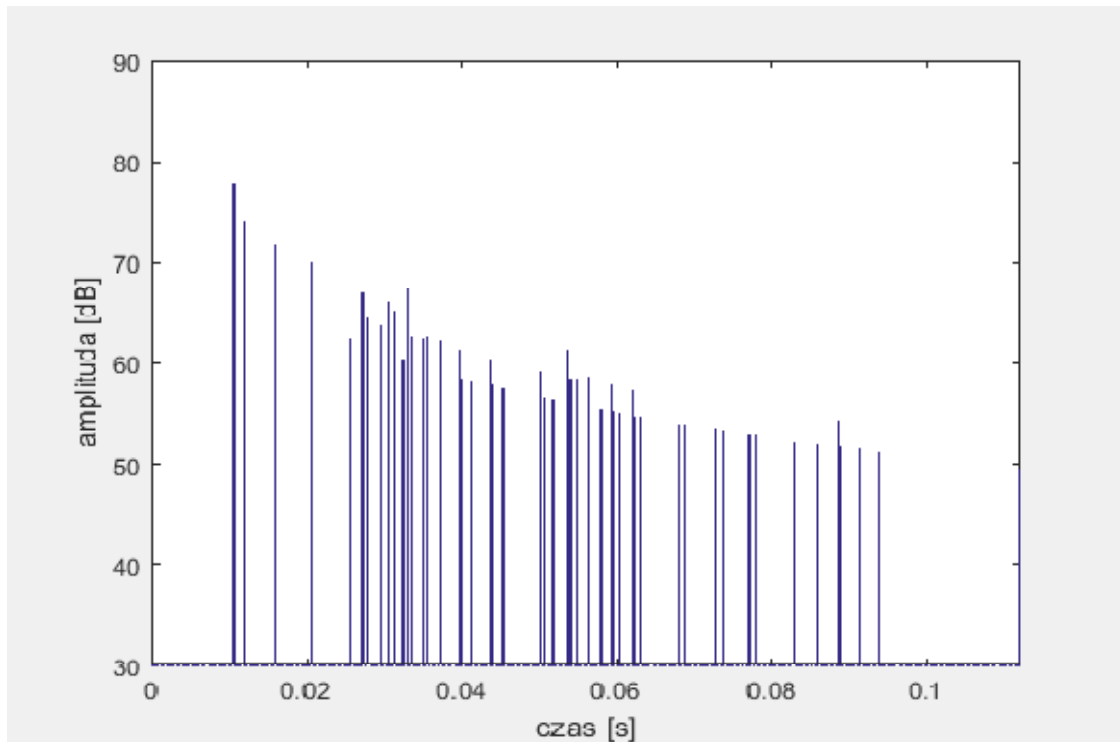
Symulowane przykłady dla 3 rzędu odbić nie były wystarczające, aby wyznaczyć poprawnie czas pogłosu. Dla odbić 8 rzędu wartości wczesnego czasu pogłosu są porównywalne dla tych wyznaczonych innymi metodami, jednak tylko w tych przypadkach gdy czas pogłosu nie przekraczał długości odpowiedzi impulsowej uzyskanej metodą źródeł pozornych. W kontekście pogłosowości pomieszczenia ogranicza to tę metodę do stosowania jedynie dla mocno pochłaniających pomieszczeń. Należy też pamiętać, że wyniki metody mogą być wykorzystane do obliczeń innych parametrów oceny pola akustycznego, które nie zostały rozpatrzone w pracy.

7 Bibliografia

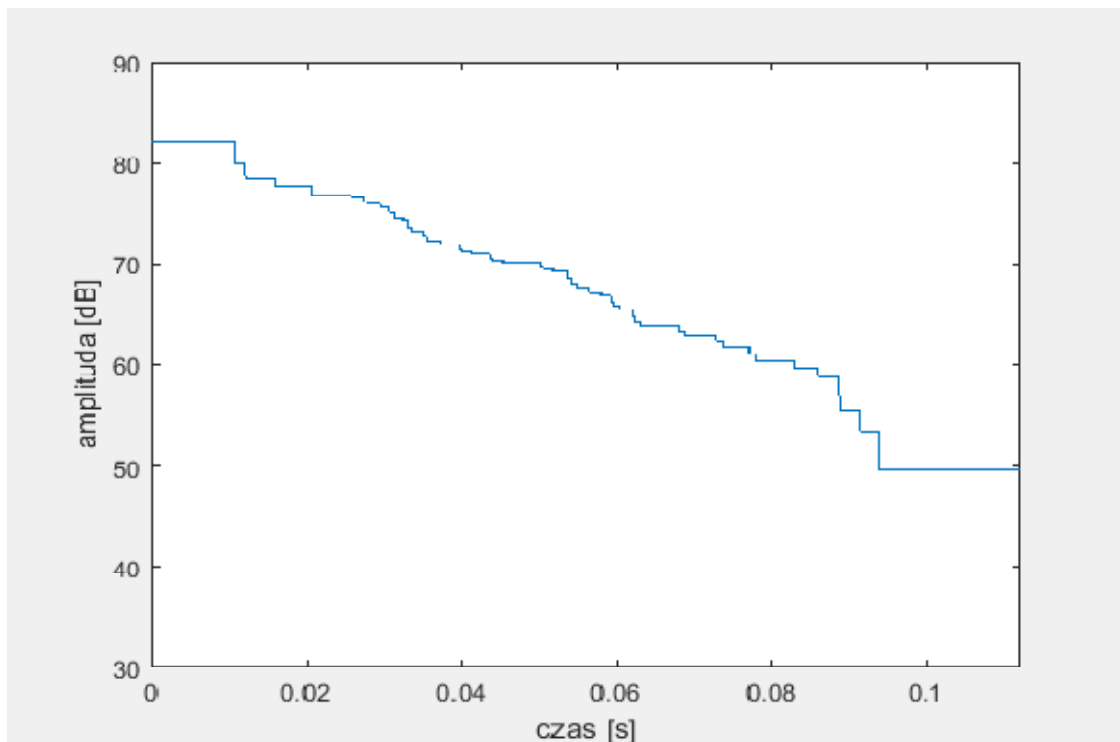
- [1] L. Cremer, *Die Wissenschaftliche Grundlage der Raumakustik*, t. 1-3, S.Hirzel Verlag, 1948
- [2] A. Appel, *Some techniques for shading machine renderings of solids*, AFIPS 1968 Spring Joint Computer Conference, 1968,
- [3] A. Krokstad, S. Strom i S. Sørsdal, *Calculating the acoustical room response by the use of a ray tracing technique*, Journal of Sound and Vibration, Volume 8, Issue 1, 1968, str.118-125,
- [4] W. Straszewicz, *Analiza geometryczna właściwości pola akustycznego w obszarach ograniczonych*, Warszawa, WPW, 1974,
- [5] J. Allen i D. Berkley, *Image method for efficiently simulating small-room acoustics*, Journal Acoustic Society of America Vol.65, 1979, str.943-950,
- [6] CATT-Acoustic, *Introduction*, <http://www.catt.se>, 2017, [dostęp: 10 stycznia 2017],
- [7] Odeon, *Manual*, http://odeon.dk/download/Version14/ODEON_Manual.pdf, 2016, [dostęp: 10 stycznia 2017],
- [8] R. Olszewski, *Zastosowanie metody elementów skończonych i brzegowych do analizy pola akustycznego*, Rozprawa doktorska, Kraków: Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, 2005,
- [9] B.-I. Dalenbäck, P. Svensson i M. Kleiner, *Prediction and Auralization Based on a Combined Image Source/Ray- Model*, Proc. 14th ICA, 1992
- [10] G.M. Naylor, *ODEON - Another Hybrid Room Acoustical Model*, Applied Acoustics Vol. 38, 1993, str.131-143,
- [11] D. van Maercke, *Simulation of sound fields in time and frequency domain using a geometrical model*, Proc. 12th Int. Congr. Acoust. (ICA'86), volume 2, Toronto, Ont.,Canada, 1986,
- [12] M. Vorlander, *Simulation of the transient and steady-state sound propagation in rooms using a new combined ray-tracing/image-source algorithm*, J. Acoust. Soc. Am., 1989,

- [13] Google SketchUp, *SketchUp Knowledge Base*, <http://help.sketchup.com/en/article/3000081>, [dostęp: 10 stycznia 2017],
- [14] Google SketchUp, *SketchUp Ruby API Documentation*, <http://ruby.sketchup.com>, [dostęp: 10 stycznia 2017],
- [16] Ruby, *Help and documentation for the Ruby programming language*, <http://ruby-doc.org/>, [dostęp: 10 stycznia 2017],
- [17] S. Wrycza, B. Marcinkowski i K. Wyrzykowski, *Język UML 2.0 w modelowaniu systemów informatycznych*, Helion, 2016
- [18] W.C. Sabine, *Collected Papers on Acoustics*, New York, Dover Publications, 1964.

A. Załącznik: Obliczenia testowe.

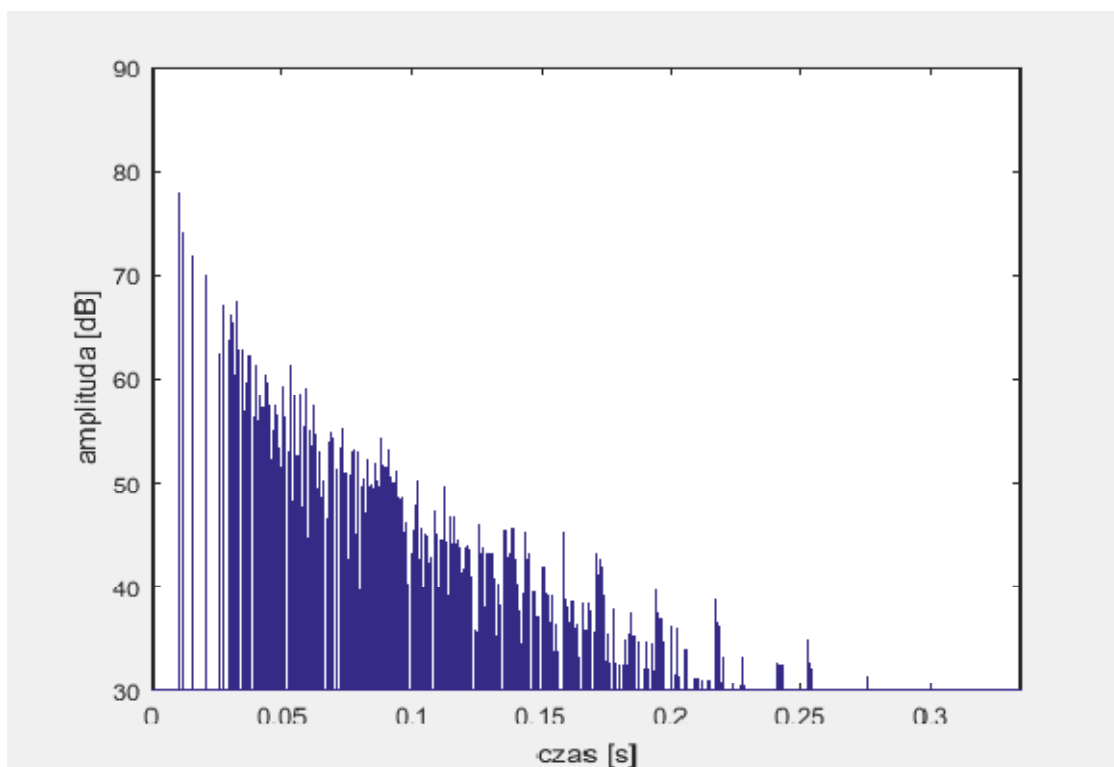


Rysunek A.1. Echogram wyznaczony na podstawie siatki źródeł pozornych do rzędu 3 dla modelu 2.

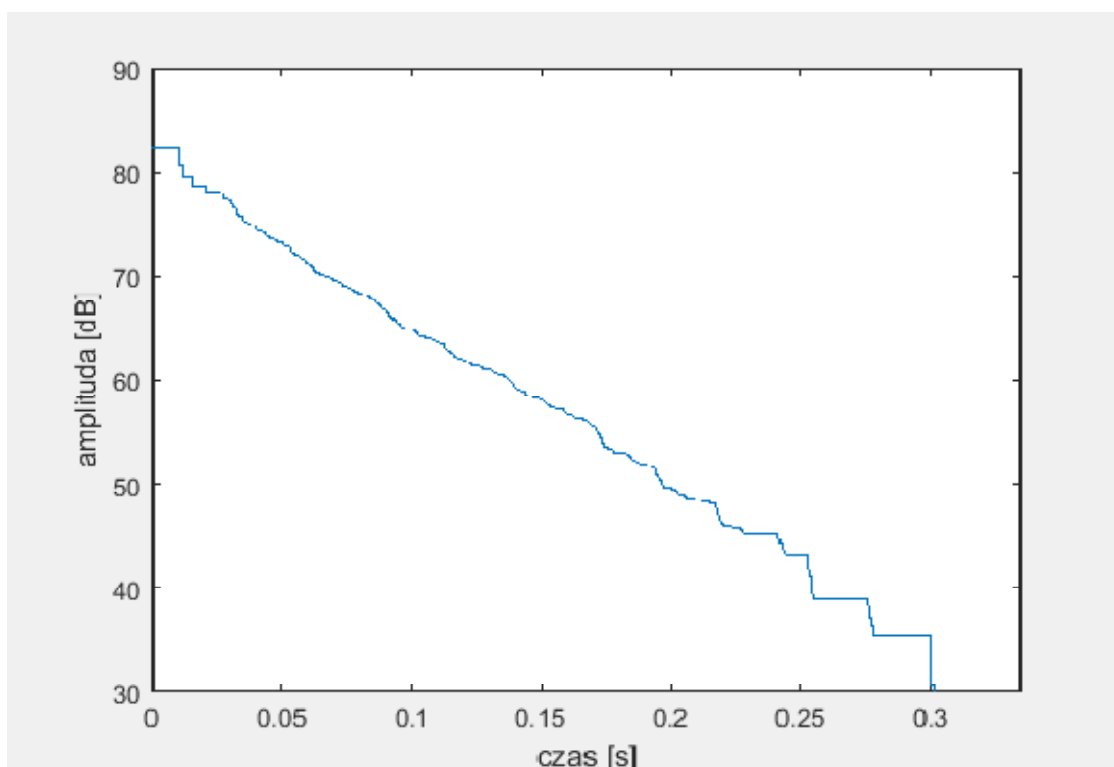


Rysunek A.2. Krzywa zaniku dźwięku wyznaczona na podstawie siatki źródeł pozornych do rzędu 3 dla modelu 2.

$$\text{EDT}_3 = 0.21 \text{ s}$$

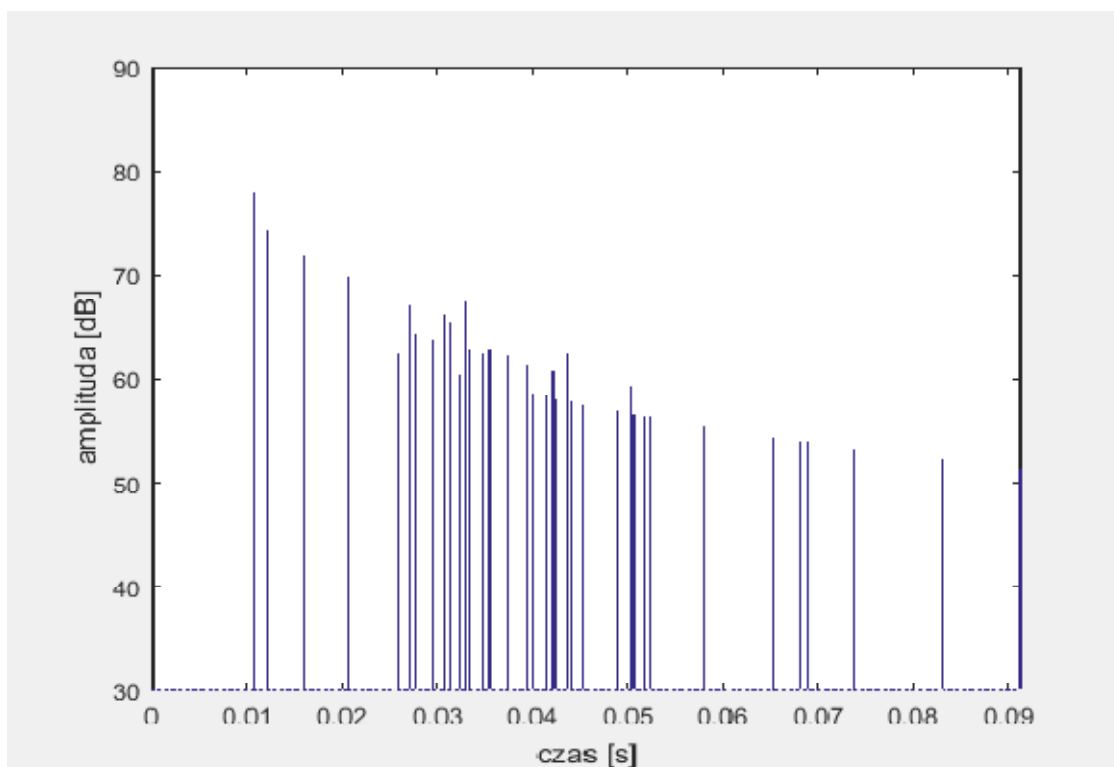


Rysunek A.3. Echogram wyznaczony na podstawie siatki źródeł pozornych do rzędu 8 dla modelu 2.

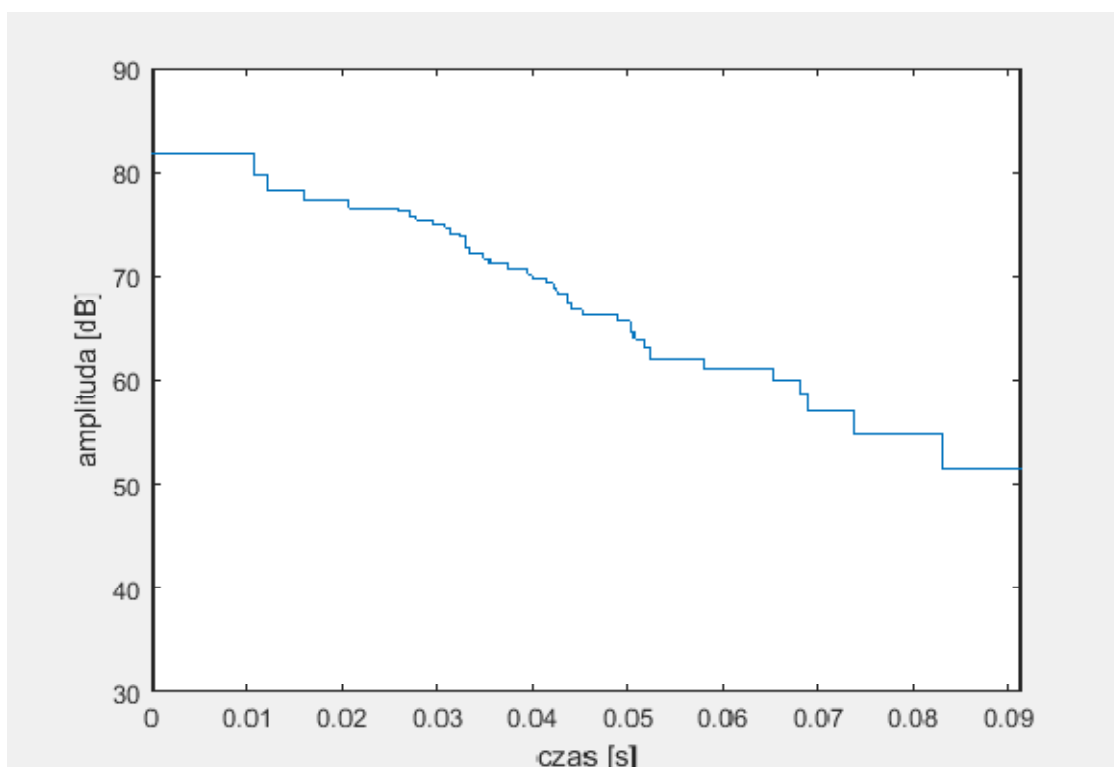


Rysunek A.4. Krzywa zaniku dźwięku wyznaczona na podstawie siatki źródeł pozornych do rzędu 3 dla modelu 2.

$$\text{EDT}_8 = 0.36 \text{ s}$$

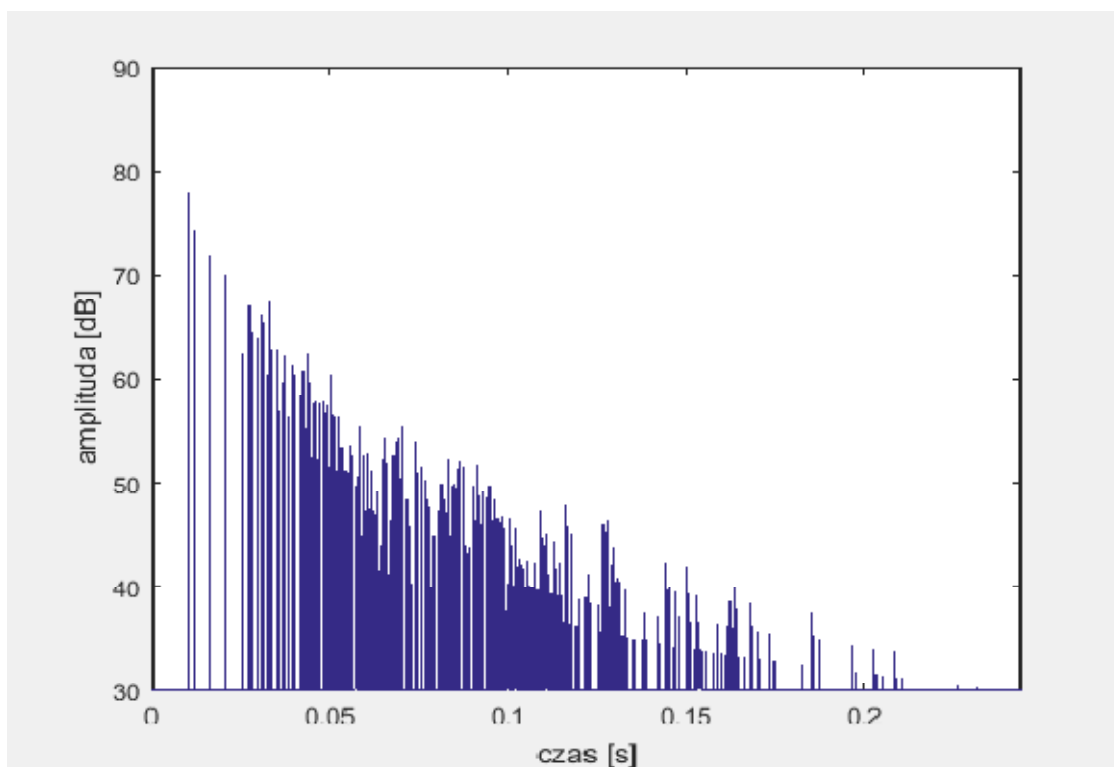


Rysunek A.5. Echogram wyznaczony na podstawie siatki źródeł pozornych do rzędu 3 dla modelu 4.

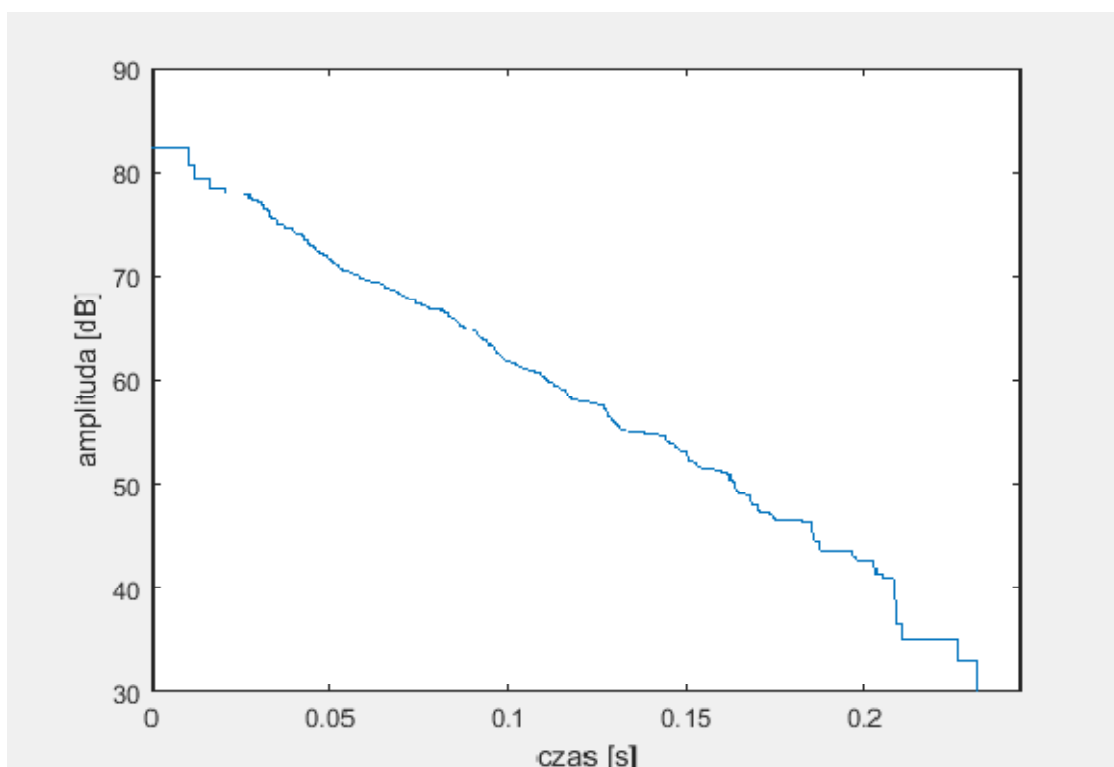


Rysunek A.6. Krzywa zaniku dźwięku wyznaczona na podstawie siatki źródeł pozornych do rzędu 3 dla modelu 4.

$$\text{EDT}_3 = 0.18 \text{ s}$$

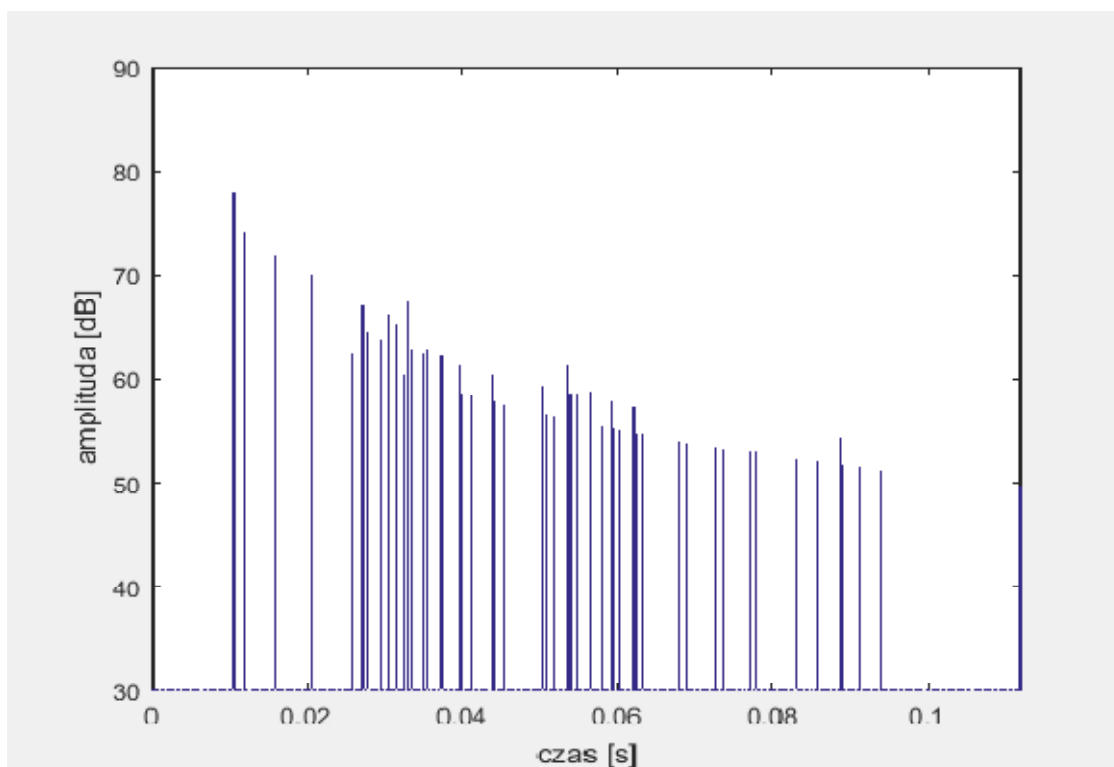


Rysunek A.7. Echogram wyznaczony na podstawie siatki źródeł pozornych do rzędu 8 dla modelu 4.

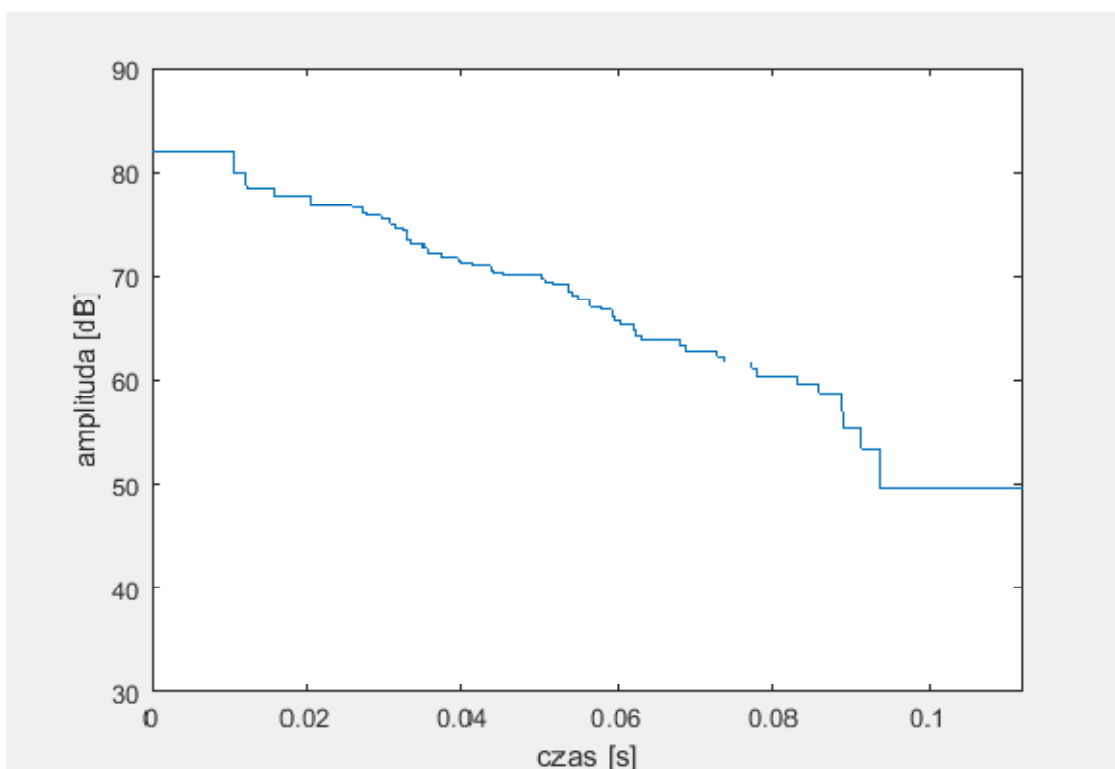


Rysunek A.8. Krzywa zaniku dźwięku wyznaczona na podstawie siatki źródeł pozornych do rzędu 8 dla modelu 4.

$$\text{EDT}_8 = 0.3 \text{ s}$$

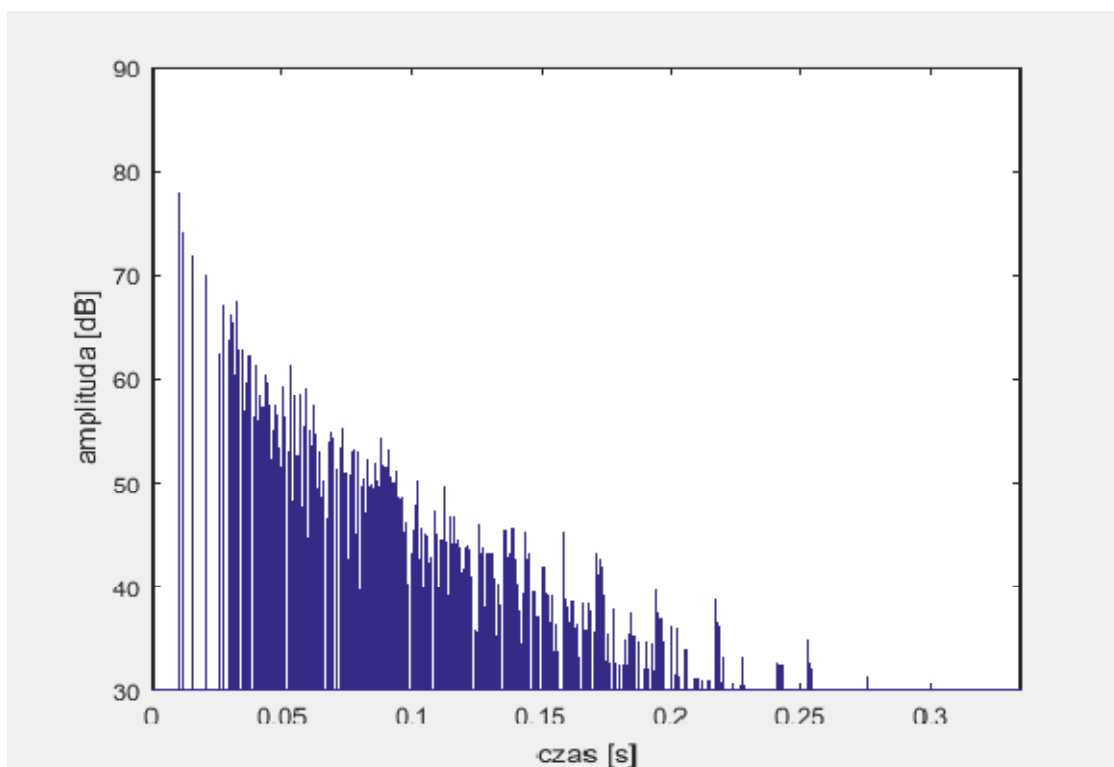


Rysunek A.9. Echogram wyznaczony na podstawie siatki źródeł pozornych do rzędu 3 dla modelu 5.

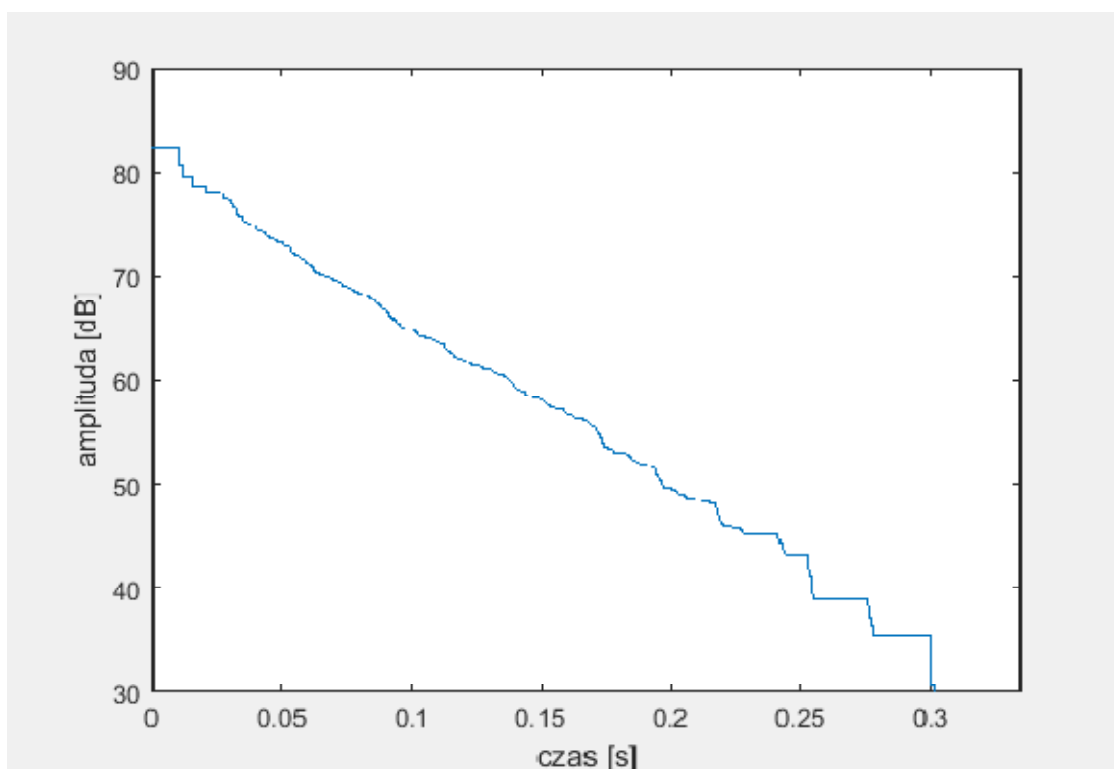


Rysunek A.10. Krzywa zaniku dźwięku wyznaczona na podstawie siatki źródeł pozornych do rzędu 3 dla modelu 5.

$$\text{EDT}_3 = 0.23 \text{ s}$$

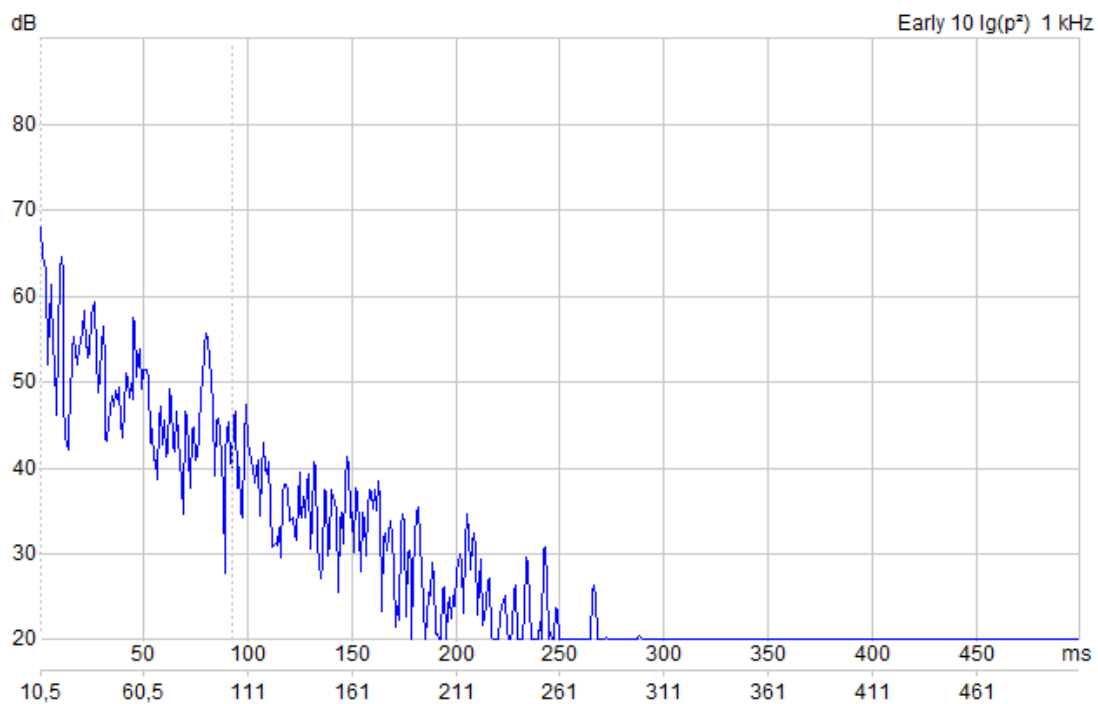


Rysunek A.11. Echogram wyznaczony na podstawie siatki źródeł pozornych do rzędu 8 dla modelu 5.

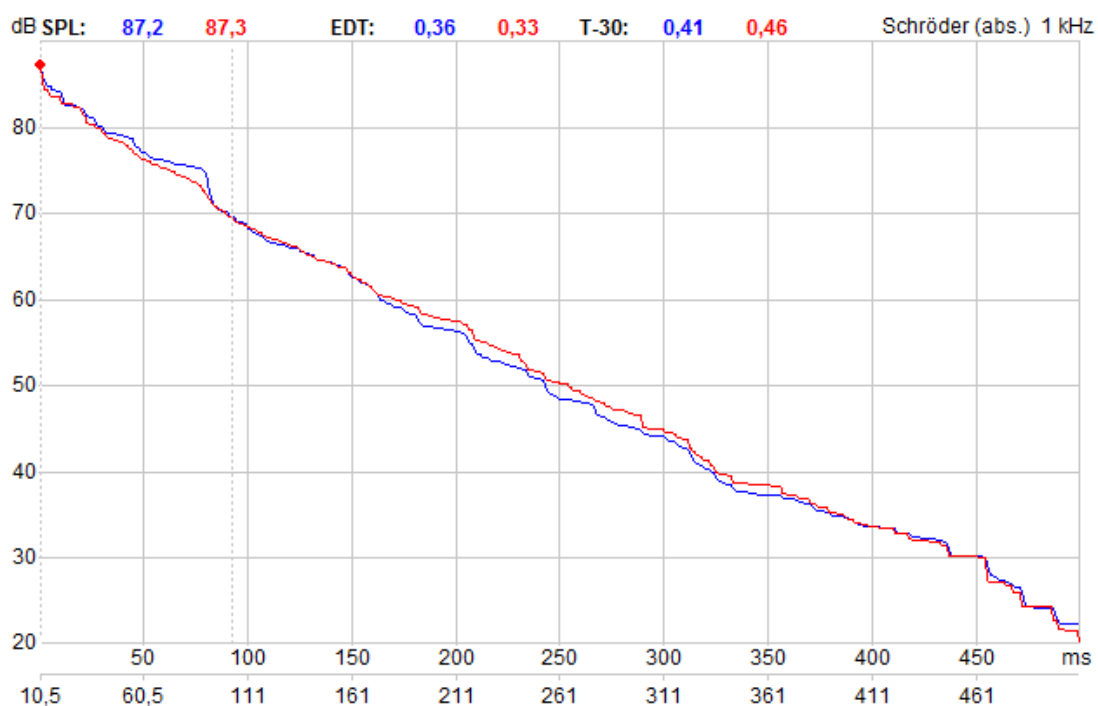


Rysunek A.12. Krzywa zaniku dźwięku wyznaczona na podstawie siatki źródeł pozornych do rzędu 8 dla modelu 5.

$$\text{EDT}_8 = 0.38 \text{ s}$$

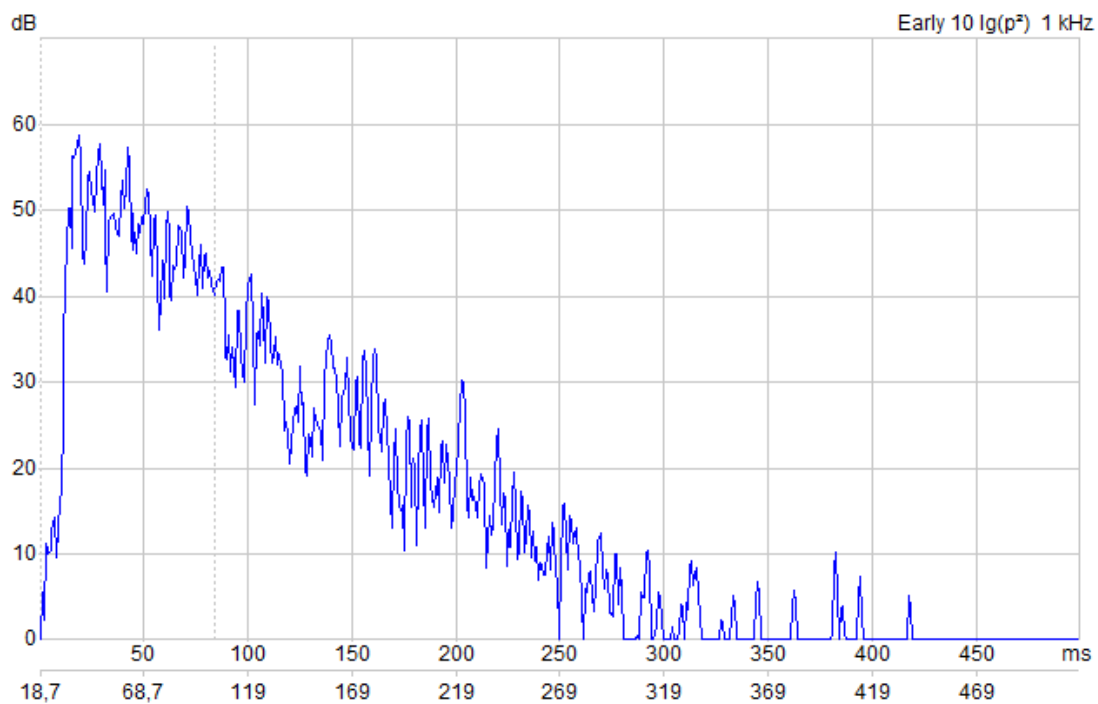


Rysunek A.13. Echogram wyznaczony metodą promieniową dla modelu 2.

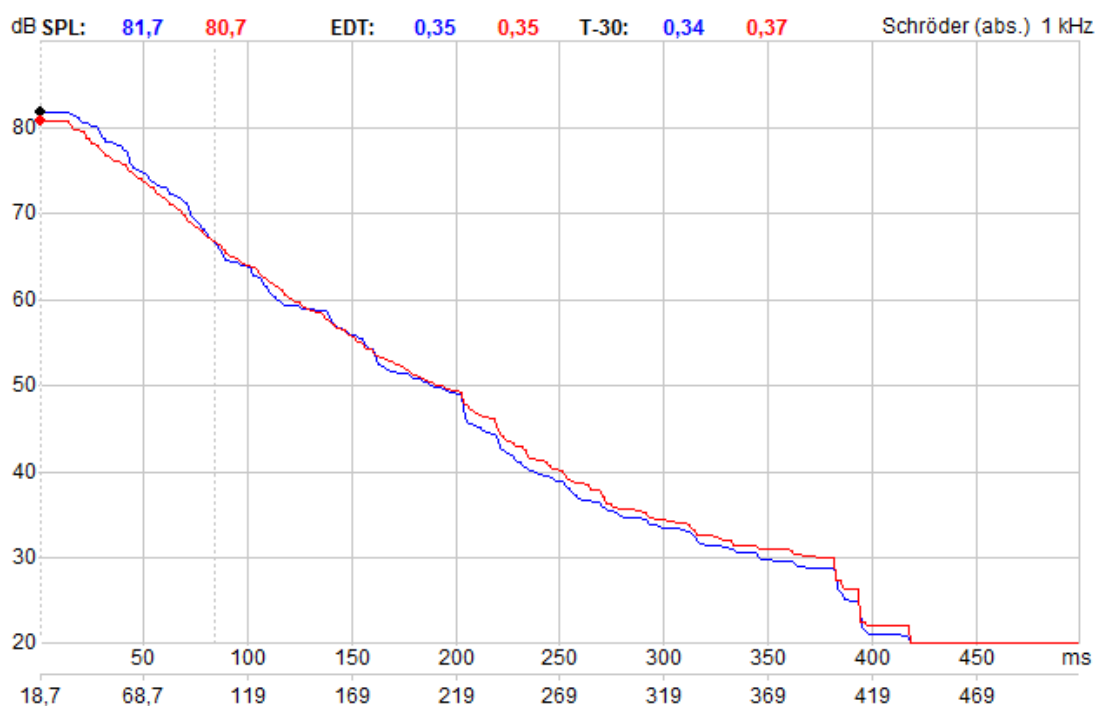


Rysunek A.14. Krzywa zaniku dźwięku wyznaczona metodą promieniową dla modelu 2.

EDT = 0.36 s

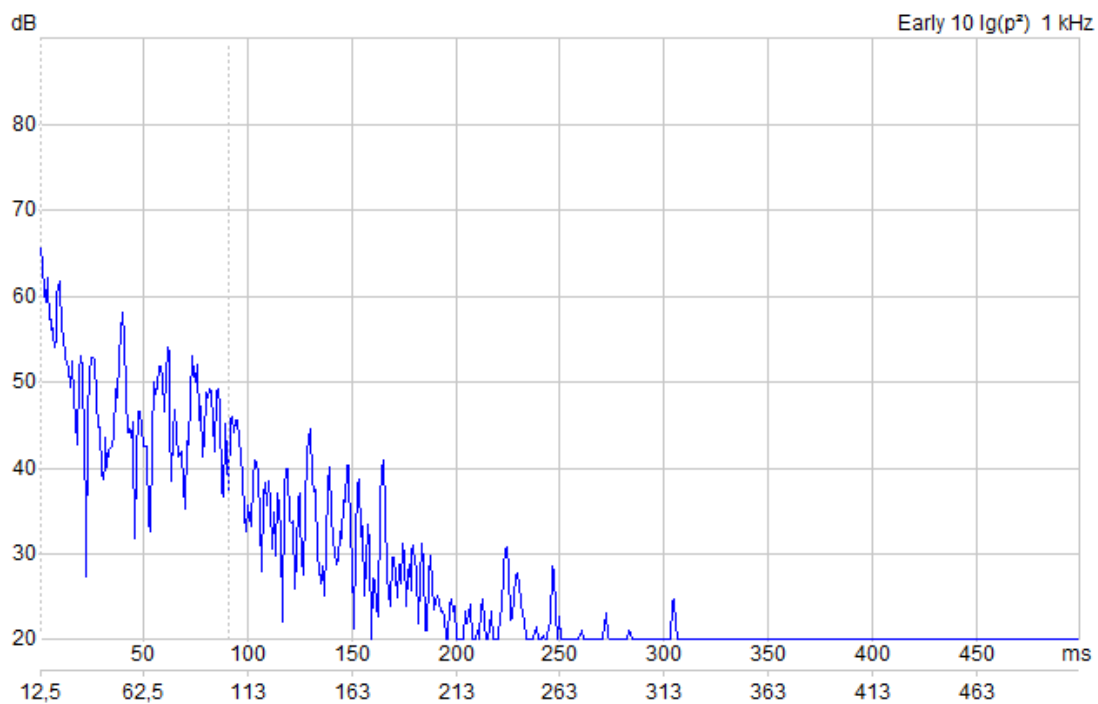


Rysunek A.15. Echogram wyznaczony metodą promieniową dla modelu 4.

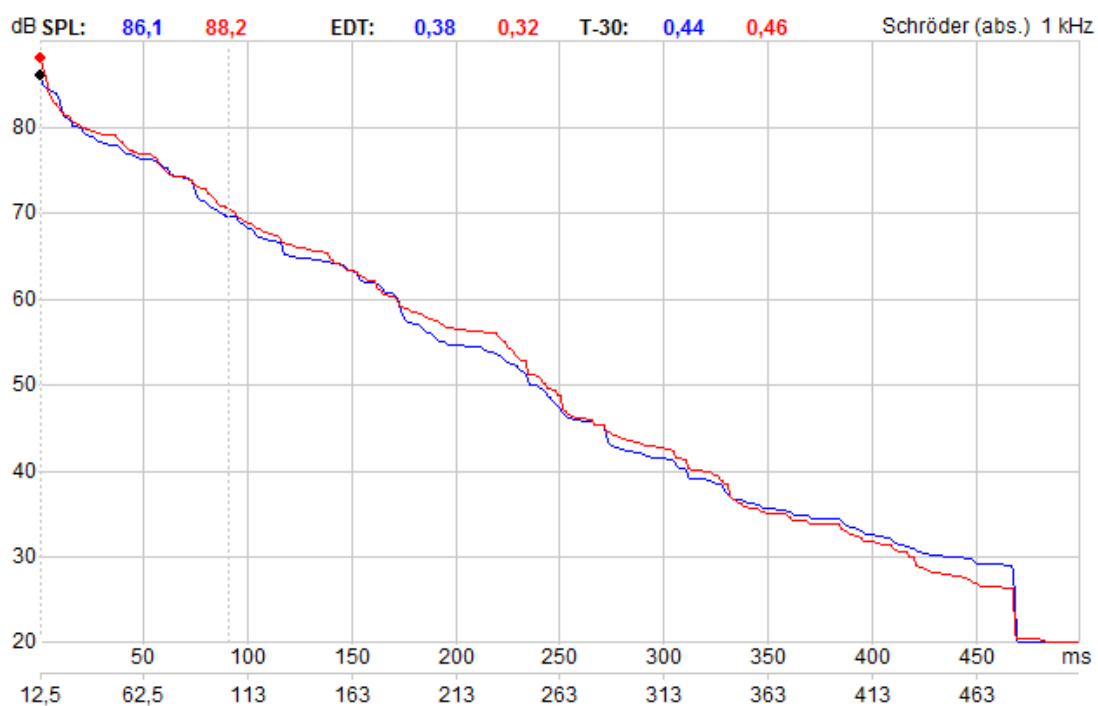


Rysunek A.16. Krzywa zaniku dźwięku wyznaczona metodą promieniową dla modelu 4.

$$\text{EDT} = 0.35 \text{ s}$$



Rysunek A.17. Echogram wyznaczony metodą promieniową dla modelu 5.



Rysunek A.18. Krzywa zaniku dźwięku wyznaczona metodą promieniową dla modelu 5.

EDT = 0.38 s