

Politechnika Opolska  
Wydział Elektrotechniki Automatyki i Informatyki

Rozprawa doktorska

**Modelowanie sygnałów emisji  
akustycznej generowanej przez  
wybrane klasy wyładowań  
niezupełnych**

**mgr inż. Daria Wotzka**

Promotor: dr hab. inż. Tomasz Boczar, prof. PO

Opole 2010

*Moim bliskim.*

*Składam serdeczne podziękowanie mojemu promotorowi  
dr hab. inż. Tomaszowi Boczarowi, prof PO,  
za cenne rady, życzliwość, cierpliwość,  
pomoc, wsparcie i czas, który mi poświęcił.*

---

# Spis treści

---

<b>Wykaz ważniejszych oznaczeń i skrótów</b>	<b>vii</b>
<b>1. Wprowadzenie</b>	<b>1</b>
<b>2. Cele, zakres i teza rozprawy</b>	<b>3</b>
<b>3. Przegląd doniesień literaturowych dotyczących poruszanej tematyki</b>	<b>8</b>
<b>4. Emisja akustyczna od wyładowań niezupełnych</b>	<b>12</b>
4.1 Pojęcie emisji akustycznej .....	12
4.2 Charakterystyka sygnałów emisji akustycznej generowanej przez wyładowania niezupełne .....	14
4.3 Efekt piezoelektryczny .....	17
<b>5. Matematyczny opis fal emisji akustycznej od wyładowań niezupełnych</b>	<b>19</b>
5.1 Równania hydrodynamiki .....	19
5.2 Model matematyczny obwiedni sygnału emisji akustycznej generowanej przez wyładowania niezupełne .....	24
5.3 Model matematyczny źródła sygnału emisji akustycznej generowanej przez wyładowania niezupełne .....	35
<b>6. Symulacje numeryczne fali emisji akustycznej generowanej przez wyładowanie niezupełne</b>	<b>49</b>

---

6.1 Model fali emisji akustycznej przyjęty w symulacjach numerycznych .....	50
6.2 Wpływ wielkości elementu siatki na wyniki obliczeń .....	54
6.3 Model numeryczny kadzi .....	59
6.4 Symulacja fal emisji akustycznej generowanej przez kilka źródeł jednocześnie .....	62
<b>7. Charakterystyka układu pomiarowego wykorzystanego w badaniach eksperymentalnych</b>	<b>65</b>
<b>8. Wyniki badań eksperymentalnych</b>	<b>71</b>
8.1 Analiza sygnałów EA generowanej przez wymuszenie impulsowe	71
8.1.1 Przebiegi czasowe sygnałów EA generowanej przez wymuszenie impulsowe .....	72
8.1.2 Spektrogramy sygnałów EA generowanej przez wymuszenie impulsowe .....	78
8.1.3 Określenie modelu matematycznego dla zarejestrowanych fal EA propagujących bezpośrednio od źródła do odbiornika .....	85
8.2 Określenie wpływu położenia przetwornika rejestrującego fale EA na uzyskiwane wyniki pomiarów .....	88
8.3 Określenie wpływu odległości między źródłem, a odbiornikiem na wartości wybranych parametrów sygnałów EA .....	100
<b>9. Weryfikacja symulacji numerycznych z wynikami pomiarów laboratoryjnych</b>	<b>104</b>
<b>10. Wnioski</b>	<b>108</b>
<b>11. Podsumowanie</b>	<b>112</b>
<b>Spis literatury</b>	<b>115</b>
<b>A. Przebiegi czasowe sygnałów EA generowanej przez różne klasy WNZ z zaznaczoną obwiednią</b>	<b>128</b>

B. Przebiegi czasowe obwiedni sygnałów EA generowanej przez różne klasy WNZ	132
C. Przebiegi czasowe obwiedni sygnałów EA generowanej przez wybrane klasy WNZ dla rozpatrywanych modeli	136
D. Przebiegi czasowe sygnałów EA rejestrowanej przy wymuszeniu skokiem jednostkowym	141
E. Przebiegi czasowe sygnałów EA rejestrowanej przy wymuszeniu jednym okresem sinusoidy	148
F. Spektrogramy sygnałów EA rejestrowanej przy wymuszeniu skokiem jednostkowym	155
G. Spektrogramy sygnałów EA rejestrowanej przy wymuszeniu jednym okresem sinusoidy	161
H. Przebiegi czasowe funkcji regresji i sygnałów EA rejestrowanej przy wymuszeniu skokiem jednostkowym	167
I. Przebiegi widm amplitudowych w funkcji częstotliwości sygnałów generowanych. Położenie O.	170
J. Przebiegi widm amplitudowych w funkcji częstotliwości sygnałów generowanych. Położenie B.	177
K. Przebiegi funkcji koherencji	183
L. Zestawienie porównawcze międzyszczytowych wartości sygnałów EA rejestrowanej w różnych miejscach kadzi	190

---

# Wykaz ważniejszych oznaczeń i skrótów

---

Oznaczenie	Opis	Definicja
EA	Emisja akustyczna	strona 1
WNZ	Wyładowanie niezupełne	strona 1
MEB	Metoda Elementów Brzegowych	strona 8
MES	Metoda Elementów Skończonych	strona 8
MRS	Metoda Różnic Skończonych	strona 10
DoF	Degrees of Freedom	strona 54
$A_{\text{gen}}^{\text{P-P}}$	Międzyszczytowa wartość generowanego sygnału EA	strona 70
$A_{\text{pom}}^{\text{P-P}}$	Międzyszczytowa wartość rejestrowanego sygnału EA	strona 70
$A_{\text{gen}}$	Amplituda generowanego sygnału EA	strona 71
$f_{\text{gen}}$	Częstotliwość generowanego sygnału EA	strona 71
MNK	Metoda Najmniejszych Kwadratów	strona 85

---

# Rozdział 1

---

## Wprowadzenie

---

Tematyka podjęta w niniejszej rozprawie dotyczy zagadnień związanych z modelowaniem, symulacją oraz analizą sygnałów emisji akustycznej (EA) generowanej przez różne formy wyładowań niezupełnych (WNZ) jakie mogą występować w układach izolacyjnych transformatorów elektroenergetycznych. Badania związane ze zjawiskiem EA rozpoczęto już w latach czterdziestych dwudziestego wieku [1, 2]. Natomiast szczególnie intensywny rozwój metody EA w zastosowaniu do badań nad WNZ przypada na lata sześćdziesiąte ubiegłego wieku [3–7].

Metoda EA obok metody elektrycznej oraz chromatografii gazowej jest aktualnie wykorzystywana w diagnostyce układów izolacyjnych urządzeń elektroenergetycznych. Jej podstawową zaletą jest to, że umożliwia ona nieinwazyjną detekcję, pomiar i lokalizację WNZ podczas normalnej pracy urządzenia, czyli jest to tzw. metoda online. Kolejną jej zaletą jest stosunkowo mała wrażliwość na sygnały zakłócające w porównaniu np. z metodą elektryczną. Diagnostyka z wykorzystaniem metody akustycznej opiera się na pomiarze i analizie fal EA generowanej przez WNZ w postaci impulsowych fal ciśnienia [8].

Badania dotyczące zjawisk związanych z generacją WNZ i diagnostyką wysokonapięciowych układów izolacyjnych, prowadzone są od lat 80-tych ubiegłego wieku w szerokim zakresie w instytucie Elektroenergetyki Politechniki Opolskiej [5, 8–28]. Również w innych ośrodkach naukowych prowadzone są prace badawcze związane z doskonaleniem metody EA w zastosowaniu do diagnostyki układów



izolacyjnych transformatorów elektroenergetycznych [29–38].

Wykonywane do tej pory prace badawcze, które dotyczyły rozpoznawania defektów wywoływanych przez różne formy WNZ prowadzone były przy wykorzystaniu iskierników umożliwiających ich modelowanie. Wymagało to zasilania zastosowanych układów wysokim napięciem przy wykorzystaniu transformatorów probierczych [13, 14, 39–44]. Z punktu widzenia użyteczności praktycznej są to eksperymenty stosunkowo niebezpieczne dla osób wykonujących pomiary, czasochłonne, kosztowne, a uzyskiwane wyniki są podatne na szereg czynników zewnętrznych, które mogą wpływać na ich powtarzalność i odtwarzalność. Dlatego istniała konieczność zaprojektowania, a następnie praktycznego wykonania układu umożliwiającego modelowanie zjawisk towarzyszących generacji fal EA od podstawowych form WNZ, bez konieczności prowadzenia prac badawczych z wykorzystaniem wysokiego napięcia. W ten sposób będzie możliwe wykonanie szczegółowej oceny wpływu poszczególnych parametrów drogi propagacji sygnałów EA na uzyskiwane wyniki pomiarów.

W rezultacie może to przyczynić się do doskonalenia metody akustycznej i tym samym do zwiększenia dokładności oceny diagnostycznej badanej izolacji. Motywację do realizacji badań stanowiła potrzeba opracowania układu do prowadzenia badań nad propagacją sygnałów EA generowanej przez WNZ, bez konieczności wykorzystywania podczas pomiarów wysokiego napięcia.

Niniejsza dysertacja ma charakter interdyscyplinarny, dotyczy zarówno modelowania matematycznego, symulacji jak i prowadzenia badań eksperymentalnych w warunkach laboratoryjnych. Praca stanowi kontynuację prac naukowo-badawczych prowadzonych w Instytucie Elektroenergetyki Politechniki Opolskiej. Dotąd nie były podejmowane próby opracowania cyfrowego modelu źródła fal EA, który skutecznie zastąpiłby podczas badań iskierniki modelujące różne formy WNZ i tym samym wyeliminowałyby konieczność stosowania układów wysokiego napięcia. Proponowane rozwiązanie ma charakter poznawczy.

## Rozdział 2

---

# Cele, zakres i teza rozprawy

---

Podstawowym celem niniejszej rozprawy doktorskiej było określenie możliwości i wskazania zakresu wykonywania badań dotyczących propagacji sygnałów EA generowanej przez wybrane formy WNZ, jakie mogą występować w papierowo-olejowej izolacji urządzeń elektroenergetycznych, bez konieczności przeprowadzania kosztownych i trudnych eksperymentów przy wykorzystaniu wysokiego napięcia.

Do celów szczegółowych można zaliczyć następujące zagadnienia:

- opracowanie modelu matematycznego dla obwiedni sygnałów EA generowanej przez podstawowe formy WNZ,
- opracowanie modelu matematycznego dla źródła fal EA generowanej przez wybrane formy WNZ,
- określenie wpływu wielkości siatki dyskretyzującej na uzyskiwane wyniki obliczeń numerycznych,
- określenie parametrów i opracowanie modelu numerycznego umożliwiającego symulacje rozkładów czasoprzestrzennych ciśnienia akustycznego w modelu kadzi wypełnionej olejem elektroizolacyjnym, wewnątrz której umieszczono jedno lub kilka zamodelowanych źródeł fal EA,
- określenie możliwości zastosowania przetwornika piezoelektrycznego PIC155 do generacji fal EA w modelu kadzi wypełnionej olejem elektroizolacyjnym,

- wyznaczenie wartości wybranych parametrów sygnałów EA generowanej przy wymuszeniu impulsowym i sinusoidalnym,
- zdefiniowanie modelu matematycznego opisującego sygnały EA zarejestrowanej podczas generacji wymuszenia impulsowego,
- określenie wpływu odległości między generatorem, a odbiornikiem na wartości wybranych parametrów rejestrowanych sygnałów EA,
- określenie wpływu umiejscowienia przetwornika pomiarowego na wartości wybranych parametrów rejestrowanych fal EA i wskazanie współzależności między sygnałami rejestrowanymi w różnych miejscach kadzi,
- przeprowadzenie analizy porównawczej wyników symulacji numerycznej z rezultatami uzyskanymi podczas badań eksperymentalnych wykonanych w warunkach laboratoryjnych.

Na podstawie założonych celów w pracy przyjęto następującą tezę:

**Zaproponowany model matematyczny i koncepcja wykorzystania układu z przetwornikiem piezoelektrycznym umożliwiają symulację sygnałów EA generowanej przez wybrane klasy WNZ, jakie mogą występować w izolacji olejowej urządzeń elektroenergetycznych oraz badanie mechanizmów propagacji emitowanych fal EA.**

W celu potwierdzenia przyjętej w rozprawie tezy podjęto następujące zagadnienia, które przedstawiono w kolejnych rozdziałach rozprawy.

W rozdz. 3 przedstawiono przegląd doniesień literaturowych związanych z tematyką omawianą w niniejszej rozprawie.

W rozdz. 4:

- przedstawiono podstawowe pojęcia związane z EA od WNZ,
- scharakteryzowano podstawowe parametry sygnałów EA od WNZ,
- omówiono podstawowe zagadnienia związane z efektem piezoelektrycznym, którego właściwości wykorzystano podczas badań eksperymentalnych.

W rozdz. 5:

- przedstawiono podstawowe równania matematyczne związane z propagacją fal EA w cieczech,
- określono pięć modeli matematycznych w postaci funkcji regresji do opisu obwiedni sygnałów EA od WNZ,
- zastosowano algorytmy numeryczne, zaimplementowane w środowisku MATLAB, do oszacowania i optymalizacji wartości parametrów estymowanych funkcji regresji dla rozpatrywanych modeli matematycznych obwiedni sygnałów EA od WNZ,
- omówiono podstawowe modele matematyczne stosowane do opisu źródeł i sygnałów EA od WNZ,
- zaproponowano autorskie równanie matematyczne opisujące źródło fal EA generowanej przez wybrane formy WNZ,
- wyznaczono i przedstawiono wartości parametrów opracowanego modelu źródła fal EA, która odpowiada sygnałom EA od WNZ klasy 7 zarejestrowanym w pomiarach laboratoryjnych.

W rozdz. 6:

- omówiono numeryczny model fali EA wykorzystywany przez środowisko COMSOL Multiphysics,
- zbadano wpływ rozmiaru przyjętej siatki na uzyskiwane wyniki obliczeń numerycznych i określono wielkość pojedynczego elementu, którą zastosowano w dalszych badaniach,
- zdefiniowano model numeryczny kadzi wypełnionej olejem elektroizolacyjnym,
- przeprowadzono symulacje numeryczne dla zdefiniowanego modelu i określono rozkład czasoprzestrzenny ciśnienia akustycznego wewnątrz rozpatrywanego obiektu,

- przeprowadzono symulacje numeryczne z wykorzystaniem zamodelowanej funkcji źródła fal EA.

W rozdz. 7:

- przedstawiono zaprojektowany i wykonany układ do generacji fal EA o dowolnym kształcie, amplitudzie w zakresie ( $\pm 12$ ) V i częstotliwości w paśmie (1-1000) kHz,
- opisano zaprojektowany i wykonany układ do rejestracji fal EA generowanej przez przetwornik piezoelektryczny w modelu kadzi wypełnionej olejem elektroizolacyjnym.

W rozdz. 8:

- wyznaczono wartości wybranych parametrów sygnałów EA generowanej podczas wymuszenia o charakterze impulsowym, tj. dla wymuszenia jednym okresem przebiegu sinusoidalnego o zadanej wartości amplitudy i częstotliwości oraz skokiem jednostkowym o zadanej wartości amplitudy,
- wykonano analizy zarejestrowanych sygnałów EA w dziedzinie czasu i częstotliwości oraz wyznaczono ich struktury czasowo-częstotliwościowe,
- określono model funkcji regresji i oszacowano parametry strukturalne funkcji estymowanej opisującej kształt wybranego fragmentu przebiegu czasowego fal EA wygenerowanej podczas rozpatrywanych wymuszeń impulsowych,
- przeprowadzono analizy korelacyjne, przy wykorzystaniu funkcji koherencji, sygnałów generowanych i rejestrowanych dla wybranych wyników badań,
- zbadano wpływ miejsca umieszczenia przetwornika pomiarowego na wartości wybranych parametrów rejestrowanych fal EA i obliczono współzależność sygnałów rejestrowanych w różnych miejscach kadzi.
- określono zmiany wartości wybranych parametrów fal EA rejestrowanej dla różnych odległości między źródłem, a odbiornikiem,

W rozdz. 9:

- zweryfikowano wyniki obliczeń numerycznych z pomiarami eksperymentalnymi przy zastosowaniu analizy korelacyjnej,
- opracowano model matematyczny w postaci funkcji regresji opisującej zależność amplitudy ciśnienia akustycznego w funkcji odległości między źródłem, a odbiornikiem i oszacowano parametry estymowanej funkcji regresji.

W rozdz. 10 przedstawiono wnioski, jakie sformułowano na podstawie wykonanych badań.

Natomiast w ostatnim 11 rozdz. podsumowano niniejszą rozprawę i wskazano propozycje możliwych kierunków dalszych badań.

## Rozdział 3

---

# Przegląd doniesień literaturowych dotyczących poruszanej tematyki

---

Tematyka dotycząca modelowania i symulacji numerycznych wykonywanych dla zjawisk związanych z EA była podejmowana przez wielu autorów. W pracach [45–47] przedstawiono zagadnienia związane z czasoprzestrzennymi rozkładami fal EA, które uzyskano podczas symulacji numerycznych. Badania dotyczyły modelowania przetworników piezoelektrycznych, propagacji fal EA w ciałach stałych oraz optymalizacji metod numerycznych, które zastosowano do obliczeń. Wykorzystanie metod numerycznych do badań związanych ze zjawiskiem propagacji fal EA lub generacji fal EA przez przetworniki piezoelektryczne omówione zostało m.in w pracach [48–53].

Podczas badań, których celem jest określenie hałasu wytwarzanego przez urządzenia elektroenergetyczne stosuje się mikrofony, za pomocą których mierzy się poziom ciśnienia akustycznego. W pracach [54, 55] przedstawiono wyniki badań i analiz dotyczących hałasu wytwarzanego przez transformator elektroenergetyczny w aspekcie jego szkodliwego oddziaływania na otoczenie (ludzi i zwierzęta). Zaproponowany w pracach trójwymiarowy model transformatora elektroenergetycznego łączy zagadnienia akustyczne, elektromagnetyczne i uwzględnia oddziaływania mechaniczne. Do obliczeń numerycznych zastosowano metodę Metoda Elementów Skończonych (MES), a także Metodę Elementów Brzegowych (MEB). Wyniki symulacji numerycznych

poddano weryfikacji za pomocą danych eksperymentalnych.

W wielu publikacjach m. in. [56–61] omawiane są metody aktywnej redukcji hałasu, które polegają na emisji fal akustycznych o takich parametrach aby następowało zredukowanie natężenia lub całkowite wyeliminowanie hałasu. W pracy [56] przeanalizowano różne metody aktywnej redukcji hałasu, który wytwarzany był w transformatorze energetycznym. Jego model wykonano za pomocą macierzy głośników (w postaci generatorów sygnałów EA). Symulacje numeryczne przeprowadzono w środowisku MATLAB SIMULINK. Wyniki pomiarów hałasu wytwarzanego przez transformator omówiono również w pracy [60]. Natomiast w pracy [59] przedstawiono model transformatora akustycznego, który zdefiniowano w postaci rogu akustycznego. Analizowane były zagadnienia teoretyczne związane z propagacją fal EA w rogu i wykonano w celach porównawczych badania eksperymentalne. Ponadto wykonano model akustycznego transformatora oraz przeprowadzono symulacje numeryczne. Wyniki obliczeń numerycznych poddano weryfikacji eksperymentalnej, w której do generacji sygnałów w zakresie częstotliwości od 0 do 500 Hz wykorzystano przetworniki piezoelektryczne.

W wielu publikacjach m. in. [62–68] przedstawiono sposoby doskonalenia technik związanych z metodami numerycznymi w zastosowaniu do zagadnień związanych z szeroko pojętą akustyką. W pracy [62] przedstawiono rozwiązania równania fal EA propagującej w ośrodku z występującym przepływem, czyli wyniki obliczeń równania Helmholtza w aeroakustyce. Analizowane były zagadnienia związane z rozmiarem siatki dwuwymiarowego obiektu i jego wpływem na uzyskiwane wyniki obliczeń numerycznych z zastosowaniem metody MES. Zastosowanie metod MES i MEB do obliczeń rozkładów czasoprzestrzennych ciśnienia akustycznego zaprezentowano również w rozprawie [63].

Należy podkreślić, że tylko nieliczni autorzy podejmowali problematykę modelowania numerycznych źródeł fal EA od WNZ, które występują w urządzeniach elektroenergetycznych. Wybrane pozycje literaturowe omówiono poniżej.

Praca [69] dotyczy oceny zjawiska propagacji fal EA od WNZ w transformatorze wypełnionym olejem elektroizolacyjnym oraz badania wpływu temperatury na



parametry drogi propagacji fal EA od WNZ. Do obliczeń numerycznych wykorzystano metodę MES. Jako źródło fali, zastosowano deltę Diraca powiązaną z przestrzenną pozycją źródła WNZ oraz wykładniczo tłumioną sinusoidę. Na podstawie uzyskanych wyników badań stwierdzono, że sygnały EA ulegają większemu tłumieniu w oleju o wyższej temperaturze. Ci sami autorzy opublikowali kilka prac, w których przedstawili wyniki badań dotyczących zjawiska propagacji fal EA od WNZ w transformatorze elektroenergetycznym [70–73].

W pracach [74–76] omówione zostały wyniki badań symulacyjnych dla trójwymiarowego obiektu, którym jest model transformatora elektroenergetycznego. Obliczenia numeryczne przy wykorzystaniu Metody Różnic Skończonych (MRS) dotyczą rozkładów czasoprzestrzennych ciśnienia akustycznego generowanego przez modele WNZ, które umiejscowiono wewnątrz obiektu. Wyniki obliczeń zostały zweryfikowane eksperymentalnie dla układu wykorzystującego iskiernik modelujący WNZ typu ostrze-płyta.

W pracy [77] omówiono wyniki badań symulacyjnych dla dwuwymiarowego modelu transformatora elektroenergetycznego, wypełnionego olejem elektroizolacyjnym. Wyniki obliczeń numerycznych zostały poddane weryfikacji z danymi empirycznymi uzyskanymi podczas badań eksperymentalnych, w których generowano WNZ z wykorzystaniem iskierników modelujących wyładowania typu ostrze-płyta. Nadzrędnym celem wykonywanych badań, których wyniki przedstawiono w pracy było określenie możliwości lokalizacji źródeł WNZ za pomocą fal ultradźwiękowych.

Stosunkowo niewiele publikacji związanych z zastosowaniem metody EA do oceny WNZ dotyczy wyników badań, podczas których do generacji fal EA wykorzystano przetworniki piezoelektryczne. W pracy [53] przedstawiono wyniki badań dotyczących zjawiska propagacji fal EA od WNZ w rzeczywistym transformatorze elektroenergetycznym wypełnionym olejem elektroizolacyjnym. Badany obiekt zawierał wszystkie jego podzespoły i elementy, a także wolną przestrzeń, w której umieszczano dodatkowe przegrody. Sygnały EA rejestrowano przy zmianach odległości w zakresie od 0 do 3 m. Sygnały EA do WNZ generowano w dwojaki sposób. Po pierwsze, stosowano iskierniki wysokiego napięcia. Po drugie, za pomocą hydrofonu umieszczonego wewnątrz transformatora

generowano sygnał prostokątny. W pracy nie podano jednak informacji dotyczących wielkości amplitudy ani innych parametrów generowanego sygnału.

Autorzy wielu publikacji m. in. [78–82] przedstawili wyniki badań związanych z diagnostyką transformatorów elektroenergetycznych. W wielu opublikowanych pracach omówione są parametry sygnałów EA generowanej przez WNZ w urządzeniach elektroenergetycznych [14, 22, 23, 41, 83–89]. Natomiast w pracach [26, 90] omówiono problematykę zakłóceń, jakie mogą występować podczas pomiarów wykonywanych metodą EA.

Parametry sygnałów EA generowanej przez WNZ modelowane z wykorzystaniem iskierników wysokiego napięcia przeanalizowano i przedstawiono m.in. w pracy [91]. W modelu kadzi wypełnionej olejem transformatorowym były generowane WNZ wywołane napięciem stałym i zmiennym. Następnie wykonano analizę porównawczą wyników uzyskanych w dziedzinie czasu oraz częstotliwości. Tematykę WNZ mierzonych metodą EA podjęto także m.in. w pracach [43, 44, 92–96].

Duża liczba publikacji dotyczy zagadnień związanych z detekcją i lokalizacją źródeł WNZ przy wykorzystaniu metody EA w dielektrykach gazowych. W pracy [65, 66] przedstawiono wyniki analiz dotyczących zjawiska propagacji fal EA generowanej przez elektrycznie wyindukowane WNZ w izolacji gazowej wysokiego napięcia oraz wyniki symulacji numerycznych dla modelu rozpatrywanego układu. Natomiast w pracy [97] mówiono o wynikach badań związanych z zastosowaniem metody EA do pomiaru WNZ typu powierzchniowego generowanych w różnego rodzaju materiałach izolacyjnych, które umieszczono w próżni. WNZ były generowane przy napięciu 70 kV i częstotliwości 50 Hz.

g

## Rozdział 4

---

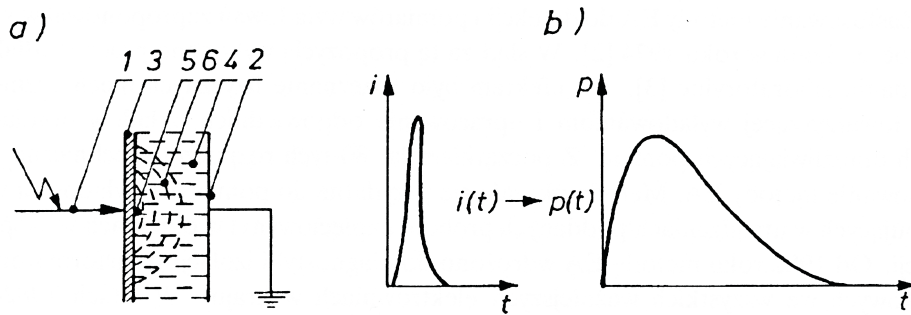
# Emisja akustyczna od wyładowań niezpełnych

---

### 4.1 Pojęcie emisji akustycznej

EA jest zjawiskiem polegającym na powstawaniu fal sprężystych wewnątrz lub na powierzchni ośrodka. Generalnie sygnał EA powstaje zawsze w wyniku wyzwolenia energii, która zmagazynowana jest wewnątrz ośrodka sprężystego [98]. Każdy rzeczywisty ośrodek charakteryzuje się niejednorodnością rozkładu energii wewnętrznej. Pod wpływem bodźców zewnętrznych, np. mechanicznych, następuje zmiana tego rozkładu oraz wyzwolona zostaje energia, która następnie zmienia swoją postać. WNZ, czyli impuls prądowy, który następuje lokalnie w ośrodku, powoduje gwałtowne uwolnienie energii wywołującej szereg efektów, np.: reakcje chemiczne oraz zmiany strukturalne ośrodka, w którym nastąpiło wyładowanie, generowany jest impuls elektromagnetyczny. Część wyzwolonej energii zamieniana jest na ciepło, co powoduje gwałtowny wzrost temperatury w obszarze WNZ, to z kolei prowadzi do parowania i lokalnych zmian ciśnienia [99]. Udarowe odkształcenie sprężyste jest przyczyną wypromieniowania fali EA. Procent energii elektrycznej (prowadzącej do WNZ) zamienianej w energię mechaniczną (wywołującą falę ciśnienia akustycznego) jest trudny do ścisłego określenia i szacuje się go w granicach od 1% do 5% [8].

Na rys. 4.1 przedstawiono poglądowy schemat procesu generacji impulsu EA od WNZ od WNZ.



Rysunek 4.1: Poglądowy schemat procesu generacji impulsu EA od WNZ. a) warstwy izolacyjne: 1, 2 - elektrody, 3 - dielektryk stały, 4 - dielektryk ciekły, 5 - miejsce występowania WNZ, 6 - impulsy EA od WNZ; b) transformacja impulsu prądowego  $i$  na impuls ciśnieniowy  $p$  w punkcie generacji wyładowań,  $t$ -czas [4]

Sygnal akustyczny rozprzestrzenia się w ośrodku płynnym (ciecz lub gaz) jako fala kulista, a następnie po dotarciu do granic ośrodka (do obudowy wykonanej z ośrodka stałego), rozprzestrzenia się jako fala powierzchniowa. W zależności od miejsca wystąpienia WNZ i od geometrii obiektu, może dojść do powstania fal stojących, które powodują generowanie impulsów rezonansowych. Dodatkowo może dojść do lokalnych zniekształceń sygnału w zakresie wyższych częstotliwości, np. na skutek istnienia pęcherzyków powietrza fala dźwiękowa o małej, w porównaniu z rozmiarem pęcherzyka, długości fali ulega załamaniu. Nie można również pominąć efektów tłumienia, odbicia i innych zniekształceń sygnału powstałych na elementach znajdujących się wewnątrz obiektu, w którym nastąpiło WNZ [4].

W pracy [98] autorzy zaklasyfikowali źródła EA na podstawie procesów zachodzących w ośrodku na sześć podstawowych klas. Elektryczne WNZ stanowią w tym podziale odrębną klasę źródeł sygnałów EA. Autor pracy [8] analizuje WNZ występujące w izolacji urządzeń elektroenergetycznych i dzieli je na trzy formy:

1. WNZ we wtrącinach gazowych,
2. wyładowania powierzchniowe,
3. wyładowania typu ulotowego.

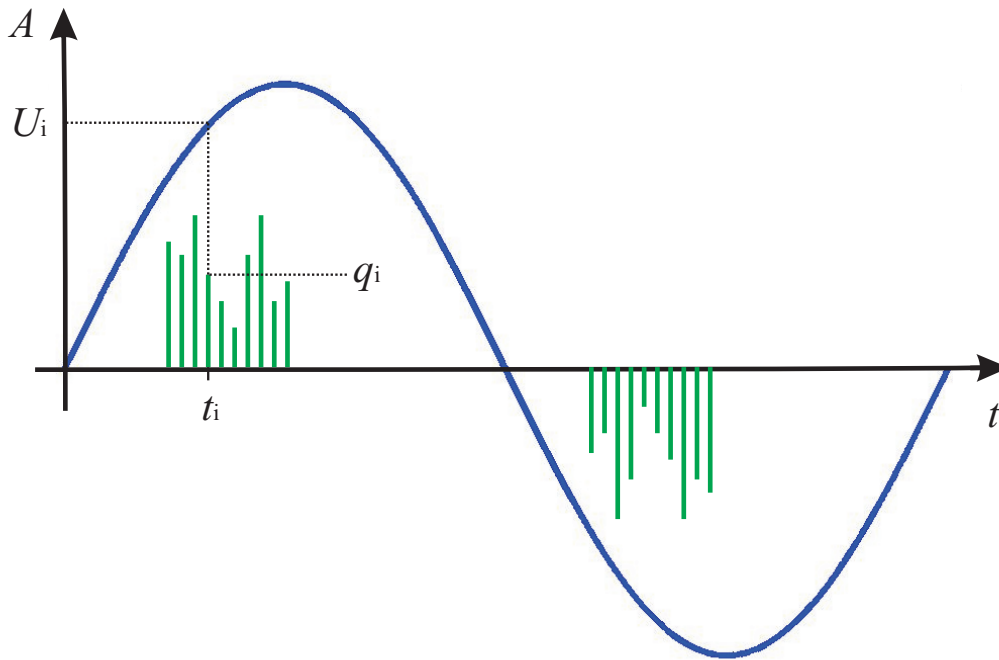
Badając WNZ, które mogą występować w układach z izolacją papierowo-olejową autorzy prac [5, 11, 13, 14, 100] wyodrębnili osiem podstawowych klas, na jakie można podzielić WNZ pod względem układu generującego dane wyładowanie. Klasy oraz rodzaj układu modelującego WNZ przedstawiono w tab. 4.1.

Tablica 4.1: Podstawowe klasy WNZ, jakie mogą występować w izolacji papierowo-olejowej

Nr klasy	Typ iskiernika generującego WNZ
Klasa 1	układ ostrze - ostrze w oleju
Klasa 2	układ ostrze - ostrze w oleju z pęcherzykami gazowymi
Klasa 3	układ ostrze - płyta w oleju
Klasa 4	układ powierzchniowy dwóch elektrod płaskich, między którymi znajduje się izolacja papierowo - olejowa,
Klasa 5	układ powierzchniowy z jedną elektrodą płaską, drugą wieloostrzową, między którymi znajduje się izolacja papierowo - olejowa
Klasa 6	układ wieloostrze - płyta w oleju
Klasa 7	układ wieloostrze - płyta w oleju z pęcherzykami gazowymi
Klasa 8	na cząstkach o nieokreślonym potencjale, które przemieszczają się w oleju

## 4.2 Charakterystyka sygnałów emisji akustycznej generowanej przez wyładowania niezupełne

Parametry sygnałów EA od WNZ zależą od ośrodka, w którym one występują. W urządzeniach elektroenergetycznych wysokiego napięcia decydujący wpływ ma rodzaj zastosowanego w układzie izolacyjnym dielektryka [98]. WNZ wykazują dużą dynamikę zmian w czasie i stochastyczny charakter występowania [3, 101]. Podczas jednego okresu napięcia probierczego, zarówno w dodatnim jak i w ujemnym półokresie występują wielokrotne pojedyncze WNZ (rys. 4.2), które można opisać m. in. za pomocą: wartości ładunku, fazy, energii i mocy. Wymienione parametry i liczbę pojedynczych WNZ można określić zarówno dla dodatniej jak i dla ujemnej połowy okresu napięcia zasilającego. Pojedyncze “eksplozje” wywołują falę EA złożoną z pojedynczych impulsów akustycznych.



Rysunek 4.2: Wybrane parametry charakteryzujące WNZ w jednym okresie napięcia probierczego.  $q_i$  - ładunek pozorny,  $U_i$  - amplituda napięcia probierczego,  $t_i$  - czas występowania. Opracowanie własne na podstawie rys. 41 w [79]

Istnieje kilkadziesiąt deskryptorów, które można stosować do opisu sygnałów EA generowanej przez WNZ [83, 84, 86–88, 102–107]. W dziedzinie czasu sygnały EA od WNZ można scharakteryzować m. in. za pomocą następujących parametrów [8]:

- maksymalnej amplitudy sygnału  $A_{max}$  - największa amplituda pojedynczego ciągu sygnałów EA, którą można traktować jako pewien odpowiednik ładunku pozornego  $q$  WNZ,
- sumy EA -  $\sum EA$  - liczba kolejnych amplitud impulsów, które przekraczają zadany poziom dyskryminacji w przyjętym przedziale czasowym,
- tempa EA -  $\frac{EA}{\Delta t}$  - liczba kolejnych amplitud impulsów przekraczających zadany poziom dyskryminacji w przyjętej jednostce czasu,
- sumy zdarzeń akustycznych -  $\sum N$  - liczba kolejnych amplitud obwiedni sygnałów EA, przekraczających zadany poziom dyskryminacji w przyjętym przedziale czasowym,

- tempa EA -  $\frac{N}{\Delta t}$  - liczba kolejnych amplitud obwiedni sygnałów EA, przekraczających zadany poziom dyskryminacji w przyjętej jednostce czasu,
- wartości skutecznej sygnału EA  $A_{\text{RMS}}$  zdefiniowanej jest zależnością (4.1) [8]. Parametr ten jest rozumiany jako suma energii sygnału i stanowi ilościowy wskaźnik EA.

$$A_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt} \quad (4.1)$$

gdzie:  $u(t)$  - wartość chwilowa sygnału napięciowego, przetworzonego z sygnału akustycznego,  
 $T$  - przedział całkowania.

Amplituda fali akustycznej jest proporcjonalna do kwadratu energii zawartej w wyładowaniu. Natomiast intensywność fali EA jest proporcjonalna do energii uwolnionej podczas wyładowania [4]. Autor pracy [108] podaje, że związek pomiędzy amplitudą fali akustycznej i wielkością wyładowania wyrażoną w Coulombach jest liniowy. Wartość maksymalnej amplitudy WNZ ma duże znaczenie, gdyż koreluje ona z fizycznym zagrożeniem dielektryka lub układu izolacyjnego [8].

Rozróżniane są dwa rodzaje kształtów dla przebiegów czasowych impulsów EA: typu relaksacyjnego oraz typu akceleracyjnego [98]. Ponadto sygnały EA mogą mieć charakter ciągły lub dyskretny. W przypadku emisji ciągłej czas narastania i zanikania impulsu (czas trwania impulsu EA<sup>1</sup>) jest dłuższy niż odstępy między impulsami, podczas gdy w przypadku dyskretnym czas trwania impulsu jest krótszy niż odstępy kolejnych impulsów.

W dziedzinie częstotliwości można wyznaczyć m. in. następujące parametry charakteryzujące sygnały EA generowanej przez WNZ [87, 88]:

- maksymalną intensywność lub wierzchołek o wybranych pasmach częstotliwości,
- częstotliwość maksymalnej intensywności w widmie,

---

<sup>1</sup>Czas trwania pojedynczego impulsu WNZ jest krótki, rzędu jednej dziesiątej, jednej setnej mikrosekundy [8, 98].

- szerokość pasma częstotliwości sygnałów przekraczających zadany poziom dyskryminacji,
- energię w wybranych pasmach częstotliwości.

Widma częstotliwościowe zależą od typu i energii impulsów EA od WNZ. Szczegółowy przegląd doniesień literaturowych na temat widm EA od WNZ został przedstawiony m. in. w pracach [8, 14, 98]. Autorzy podają, że widma częstotliwościowe obejmują zakres od kilku Hz do kilkuset kHz, dla wybranych form przedział ten może być do 1 MHz.

### 4.3 Efekt piezoelektryczny

W niniejszej rozprawie, fala EA była rejestrowana przetwornikiem elektromechanicznym zbudowanym z kryształów o właściwościach piezoelektrycznych, stąd nazywanym przetwornikiem piezoelektrycznym. Efekt piezoelektryczny jest zjawiskiem odwracalnym. Oznacza to, że jeżeli na kryształ działa ciśnienie  $p$  lub gdy istnieje napięcie wewnętrzne  $\sigma$  to na powierzchni kryształu  $S$  powstaje ładunek elektryczny  $Q$ , który można określić równaniem (4.2) [109].

$$Q = \delta F = \delta S \sigma = \delta S p = C u \quad (4.2)$$

gdzie:  $\delta$  - moduł piezo,

$F$  - siła,

$C$  - pojemność elektryczna,

$\sigma$  - napięcie wewnętrzne,

$u$  - napięcie elektryczne.

Często zamiast modułu piezoelektrycznego  $\delta$  stosuje się stałą piezoelektryczną  $e$ , jak w równaniu (4.3) [109].

$$p = \frac{e}{d} * u = \frac{F}{S} \quad (4.3)$$

gdzie:  $d$  - odległość okładek kondensatora.



Na powierzchnię przewodnika (kryształu piezoelektrycznego) znajdującego się w polu elektrycznym działają siły, które pochodzą od tego pola. Jeśli całkowita siła  $F$  i całkowity moment siły, działające na dany przewodnik wynoszą zero, to nie następuje jego przemieszczenie lecz ulega on zjawisku elektrostrykcji. Siły działające na przewodnik są siłami rozciągającymi (lub ściskającymi) i nie zmieniają kształtu ani gęstości ciała, a jedynie jego objętość. Przewodnik ulega rozciąganiu we wszystkich kierunkach pod wpływem ciśnienia  $p$  równomiernie rozłożonego na jego powierzchni. Ciśnienie  $p$  można wyznaczyć na podstawie równań termodynamiki, jako pochodną energii swobodnej ciała stałego względem jego objętości (4.4) [110].

$$p = \frac{\partial E_p}{\partial V} \quad (4.4)$$

gdzie:  $p$  - ciśnienie,

$E_p$  - energia swobodna ciała stałego,

$V$  - objętość.

Jest to ciśnienie działające na powierzchnię od wnętrza ciała. Ciśnienie, które będzie działać w odwrotnym kierunku, czyli na ciało od zewnątrz, wyraża się tym samym wzorem ale ze znakiem przeciwnym. Napięcia wewnętrzne kryształu, powstające w polu elektrycznym, są proporcjonalne do pierwszej potęgi natężenia pola [110].

W badaniach przeprowadzonych w ramach realizacji niniejszej rozprawy do generacji fali EA zastosowano odwrotny efekt piezoelektryczny, czyli pobudzano przetwornik piezoelektryczny napięciem przemiennym. Piezoelektryk był zatem drgającym ciałem w kształcie walca, wytwarzającym wokół siebie okresowe zagęszczenia i rozrzedzenia ośrodka wywołując w ten sposób powstawanie fali EA (rozchodzącej się prostopadle do jego osi). Źródłem energii unoszonej przez te fale była energia kinetyczna drgającego przetwornika.

## Rozdział 5

---

# Matematyczny opis fal emisji akustycznej od wyładowań niezupełnych

---

### 5.1 Równania hydrodynamiki

W celu potwierdzenia założonej w pracy tezy analizowano fale EA propagujące wewnątrz modelu kadzi transformatorowej wypełnionej olejem elektroizolacyjnym. Zagadnienia związane z propagacją fal EA w oleju są opisywane przez równania hydrodynamiki. Podstawowym prawem obowiązującym w hydrodynamice jest zasada zachowania materii (5.1) [111].

$$\int \left( \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) \right) dV = 0 \quad (5.1)$$

gdzie:  $\rho$  - gęstość,

$\mathbf{v}$  - wektor prędkości,

$V$  - objętość,

$t$  - czas.

Z równania (5.1) wynika, że ilość cieczy wpływającej do objętości równa jest ilości cieczy z niej wypływającej. Przyjmując, że badana ciecz jest idealna<sup>1</sup>, ma ona

---

<sup>1</sup>Ciecz idealna jest pozbawiona lepkości, ściśliwości, rozszerzalności cieplnej, napięć powierzchniowych i stałej gęstości niezależnie od temperatury i ciśnienia. [111]

charakter makroskopowy, a zatem w każdym punkcie czasu i przestrzeni  $P(x, y, z, t)$  spełniony jest warunek ciągłości wyrażony zależnością (5.2) [111].

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0 \quad (5.2)$$

gdzie:  $\rho$  - gęstość,

$\mathbf{v}$  - wektor prędkości,

$t$  - czas.

Gdy spełnione jest równanie (5.2), zależność (5.1) zachodzi dla dowolnej objętości  $V$ . Na każdy element objętości  $V$  otoczony cieczą działa siła, której całkowita wartość wyrażona jest równaniem 5.3 [111].

$$- \int \nabla p dV \quad (5.3)$$

gdzie:  $p$  - ciśnienie,

$V$  - objętość.

Stosując drugą zasadę dynamiki I. Newtona, L. Euler już w 1755 roku wyprowadził równanie ruchu fali akustycznej (5.4) [111].

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \nabla) \mathbf{v} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \mathbf{g} \quad (5.4)$$

gdzie:  $\mathbf{v}$  - wektor prędkości,

$t$  - czas,

$\rho$  - gęstość,

$p$  - ciśnienie,

$\mathbf{g}$  - praca wykonana przez siły grawitacyjne.

Równanie (5.4) dotyczy ruchu cieczy w polu grawitacyjnym oraz nie uwzględnia procesów dyssypacji energii. Jest to zatem ruch adiabatyczny. W niniejszej rozprawie założono, że ruch cieczy odbywa się przy niezmienniczej entropii  $s$  (5.5), czyli  $s = \text{const}$ , a zatem jest to ruch izentropowy [111].

$$\frac{ds}{dt} = 0 \quad (5.5)$$

W pracy [112] S. D. Poisson wykazał, że równania ruchu cieczy opierają się na dwóch podstawowych zasadach, tj. na zasadzie zachowania energii i na zasadzie zachowania masy. W artykule [99] L. E. Lundgraad napisał, że ruch fali oparty jest na trzech zasadach: ciągłości, zachowania pędu i elastyczności ośrodka. Natomiast w pracy [111] L. D. Landau wykazał, że wzór umożliwiający opis ruchu fal akustycznych można otrzymać przekształcając równania ciągłości i Eulera. Jeżeli równanie falowe (5.4) zostanie przekształcone tak aby zawierało ono potencjał prędkości  $\varphi$ , wówczas przy wykorzystaniu równości (5.6) otrzyma się równanie falowe w postaci zależności (5.7) [111].

$$\mathbf{v} = \nabla\varphi \quad (5.6)$$

$$\Delta\varphi - \frac{1}{c_s^2\rho_0} \frac{\partial^2\varphi}{\partial t^2} = 0 \quad (5.7)$$

gdzie:  $\mathbf{v}$  - wektor prędkości,

$\varphi$  - potencjał prędkości,

$c_s$  - prędkość rozchodzenia się fali EA,

$\rho$  - gęstość,

$t$  - czas.

Ruch potencjalny w cieczy nieściśliwej można opisać uproszczoną formą równania różniczkowego (5.8) [111]

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \quad (5.8)$$

gdzie:  $\mathbf{v}$  - wektor prędkości.

Wykorzystując zależności (5.6) i (5.8) otrzymuje się wzór <sup>2</sup> (5.9), nazywany równaniem Laplace'a dla potencjału prędkości  $\varphi$  [111].

$$\Delta\varphi = 0 \quad (5.9)$$

Jeżeli zostaną uwzględnione procesy dyssypacji energii, związane z wpływem lepkości i przewodnictwa cieplnego podczas ruchu cieczy, a ciecz zostanie uznana

---

<sup>2</sup>  $\Delta\varphi = \nabla \cdot \mathbf{v} = \nabla \cdot \nabla\varphi = \nabla^2\varphi$

za nieściśliwą, czyli  $\nabla \cdot \mathbf{v} = 0$ , wówczas otrzyma się równanie ruchu nazywane równaniem Naviera-Stokesa dla cieczy nieściśliwej (5.10) [111].

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \nabla) \mathbf{v} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \mathbf{g} + \nu \nabla^2 \mathbf{v} \quad (5.10)$$

gdzie:  $\mathbf{v}$  - wektor prędkości,

$p$  - ciśnienie,

$\rho$  - gęstość,

$t$  - czas,

$\mathbf{g}$  - praca wykonana przez siły grawitacyjne,

$\nu = \frac{\eta}{\rho}$  - lepkość kinematyczna,

$\eta$  - lepkość dynamiczna.

W niniejszej rozprawie lepkość nie została uwzględniona. Natomiast przyjęto założenie, że propagacja fali EA następuje w cieczy idealnej o stałej temperaturze. Ponadto założono, że zmiany gęstości  $\rho'$  i ciśnienia  $p'$  w cieczy są małe w porównaniu w wartościami gęstości i ciśnienia w stanie równowagi:

$$\rho' \ll \rho_0 \quad \text{oraz} \quad p' \ll p_0,$$

stąd spełnione są zależności (5.12) i (5.12) [111].

$$p = p_0 + p' \quad (5.11)$$

$$\rho = \rho_0 + \rho' \quad (5.12)$$

gdzie:  $p_0$  - stałe ciśnienie w stanie równowagi,

$\rho_0$  - stała gęstość w stanie równowagi,

$p'$  - zmiana ciśnienia w obszarze fali EA,

$\rho'$  - zmiana gęstości w obszarze fali EA.

Dodatkowo przyjęto, że amplituda fali jest mała względem amplitudy w stanie równowagi [110]. W takim przypadku mała (względem stanu równowagi) jest również prędkość cieczy, co umożliwia pominięcie członu  $(\mathbf{v} \nabla) \mathbf{v}$  w równaniu (5.4). Zależność (5.4) i równanie ciągłości (5.2) będą miały wówczas postać opisaną zależnościami (5.13) i (5.14) [111].

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \frac{1}{\rho_0} \nabla p' = 0 \quad (5.13)$$

$$\frac{\partial \rho'}{\partial t} + \rho_0 \nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \quad (5.14)$$

Z uwagi na adiabatyczny charakter ruchu cieczy niewielka zmiana ciśnienia  $p'$  wynika z niewielkiej zmiany gęstości  $\rho'$ , a zatem można sformułować zależność (5.15) [111].

$$p' = \frac{\partial p}{\partial \rho_0} \rho' \quad (5.15)$$

Przyjmując oznaczenie (5.16) [111]:

$$c_s^2 = \frac{\partial p}{\partial \rho_0}, \quad (5.16)$$

gdzie:  $c_s$  - prędkość rozchodzenia się dźwięku,

$p$  - ciśnienie,

$\rho$  - gęstość,

otrzymuje się wyrażenie (5.17) [111]:

$$p' = c_s^2 \rho', \quad (5.17)$$

które nazywane jest adiabatycznym współczynnikiem sprężystości objętościowej<sup>3</sup>.

Jeżeli z równań (5.13) oraz (5.14) zostanie wyeliminowany wektor prędkości  $\mathbf{v}$  oraz zostanie przyjęte założenie, że  $\mathbf{v} \ll c_s$ , wówczas spełnione jest równanie (5.18) [111].

$$v = \frac{c_s \rho'}{\rho_0} \quad (5.18)$$

gdzie:  $v$  - składowa wektora prędkości.

Dalej, jeżeli uwzględni się, że  $v = p' / \rho_0 c_s$ , to równanie falowe określone dla ciśnienia akustycznego można zapisać za pomocą zależności (5.19) [111].

---

<sup>3</sup>Często oznaczane literą  $K$ . Oznacza odporność ciała na zmianę objętości, gdy jest ono poddane kompresji izometrycznej [111].

$$\frac{1}{c_s^2 \rho_0} \frac{\partial^2 p'}{\partial t^2} - \frac{1}{\rho_0} \nabla^2 p' = 0 \quad (5.19)$$

Równanie falowe (5.19) jest hiperbolicznym równaniem różniczkowym o pochodnych cząstkowych. Równania hiperboliczne opisują, zależne od czasu, fizyczne procesy zachowawcze, które nie ewoluują do stanu równowagi [113]. Ze względu na to, że równania różniczkowe cząstkowe nie posiadają zazwyczaj rozwiązania ogólnego, poszukuje się takich rozwiązań, które spełniają ściśle określone warunki brzegowe. Można wyróżnić następujące warunki brzegowe [114]:

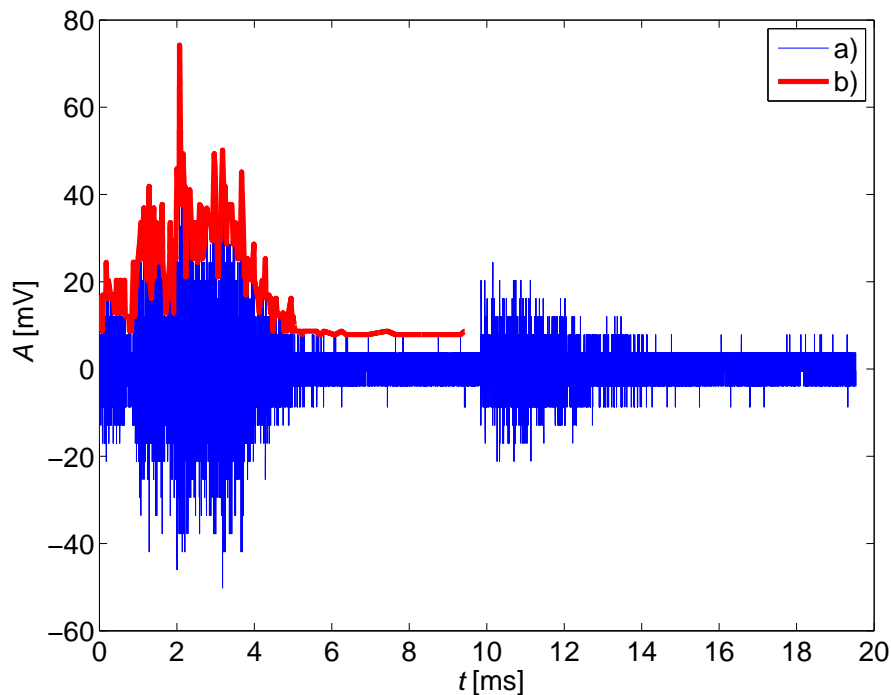
- **Dirichleta** – brzeg rozpatrywanego obszaru zdefiniowany jest przez zadaną wartość funkcji,
- **Neumana** – brzeg rozpatrywanego obszaru zdefiniowany jest przez wartość pochodnej normalnej funkcji,
- **Robina** – brzeg rozpatrywanego obszaru zdefiniowany jest przez kombinację liniową funkcji i jej pochodnej normalnej.

## 5.2 Model matematyczny obwiedni sygnału emisji akustycznej generowanej przez wyładowania niezupełne

W ramach wykonanych badań przeprowadzono identyfikację funkcji regresji opisujących obwiednie sygnałów EA od wybranych klas WNZ. Wykorzystano pięć wybranych modeli matematycznych o jednej zmiennej zależnej i jednej niezależnej, które opisano w dalszej części rozdziału. Sygnały EA zostały zarejestrowane podczas generacji WNZ w układach je modelujących, które były zasilane z układów probierczych wysokiego napięcia. Pomiarzy zostały przeprowadzone przez pracowników naukowych Instytutu Elektroenergetyki Politechniki Opolskiej [5]. Do badań dla z każdej z klasy WNZ wykorzystano 90 różnych sygnałów EA. Przeanalizowano zatem 720 różnych przebiegów.

W załączniku A przedstawiono wybrane przebiegi czasowe sygnałów EA generowanej przez rozpatrywane klasy WNZ. Natomiast na rys. 5.1 zilustrowano

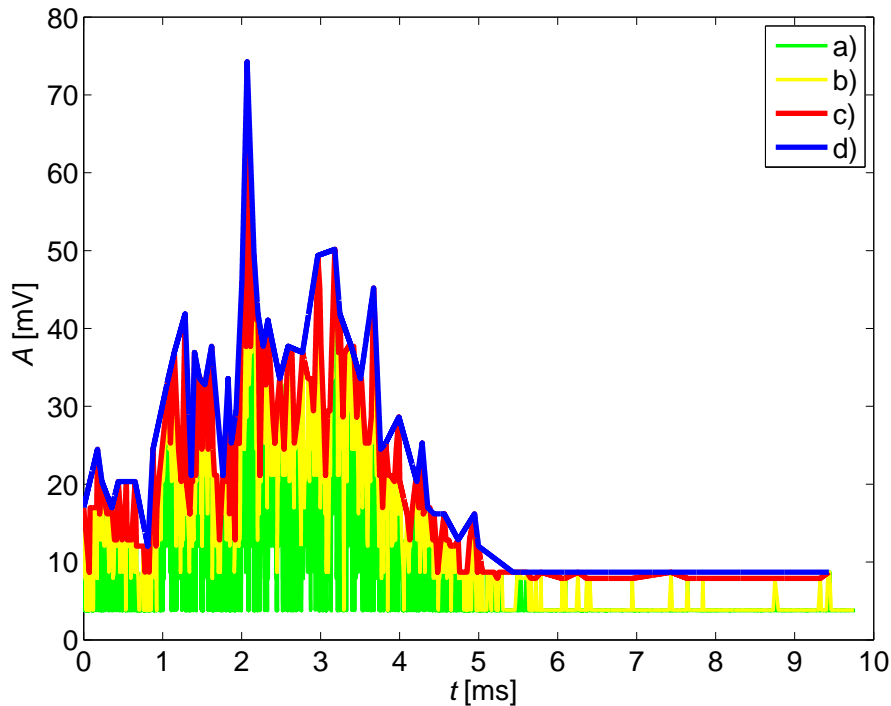
przykładowy przebieg czasowy sygnałów EA generowanej przez WNZ klasy 6. Wykres przedstawia amplitudę sygnałów EA rejestrowanej w jednym okresie napięcia zasilającego ( $f=50$  Hz) i jego obwiednię wyznaczoną dla dodatniego półokresu napięcia zasilającego. Ze względu na niesystematyczny charakter występowania WNZ w ujemnym półokresie napięcia zasilającego, w badaniach nie uwzględniano tej części sygnału.



Rysunek 5.1: Przebiegi czasowe sygnałów EA (a) generowanej przez WNZ klasy 6 z zaznaczoną obwiednią (b), które zarejestrowano w dodatnim półokresie napięcia

Obwiednię sygnałów EA od WNZ określono poprzez wydzielenie z tego sygnału wartości maksymalnych, które następnie interpolowano funkcją liniową w celu otrzymania zbioru wartości o wielkości odpowiadającej przebiegowi oryginalnemu. Wartości maksymalne wyznaczano i interpolowano w czterech następujących po sobie cyklach. Na rys. 5.2 przedstawiono cztery krzywe, które są wynikiem kolejnych cykli wyznaczania obwiedni. Przykładowe przebiegi czasowe obwiedni sygnałów zastawiono w załączniku B.





Rysunek 5.2: Przebiegi czasowe obwiedni sygnałów EA generowanej przez WNZ klasy 6: a) cykl pierwszy, b) cykl drugi, c) cykl trzeci, d) cykl czwarty

W procesie estymacji wykorzystano następujące modele matematyczne funkcji regresji, które w dalszej części rozprawy nazwane są *modelami*:

1. Model funkcji regresji typu Generalized Extreme Value (GEV) (5.20),
2. Model funkcji regresji typu wykładniczo-logarytmiczno-normalnego (LN) (5.21),
3. Model funkcji regresji typu t-Studenta (zmodyfikowany) (TL) (5.22),
4. Model funkcji regresji typu sigmoidalno-wykładniczego (SW) (5.23),
5. Model funkcji regresji typu hyperboliczno-wykładniczego (TH) (5.24).

Zmienną zależną stanowiła amplituda obwiedni zarejestrowanych sygnałów EA, natomiast zmienną niezależną był czas. Przyjęte modele charakteryzują się podobnym przebiegiem wyznaczonej funkcji. Zostały one dobrane na podstawie przeglądu doniesień literaturowych (modele 1, 2, 3) lub zostały opracowane przez autora rozprawy (modele 4 i 5).

Model typu Generalized Extreme Value (GEV) [115]:

$$f_{\text{GEV}}(t) = A \frac{1}{\sigma} \exp \left( - \left( 1 + \frac{k(t - \mu)}{\sigma} \right)^{-\frac{1}{k}} \right) \left( 1 + \frac{k(t - \mu)}{\sigma} \right)^{-1 - \frac{1}{k}}, \quad (5.20)$$

gdzie:  $f_{\text{GEV}}$  - aproksymata funkcji regresji typu GEV,

$t \geq 0$  - czas,

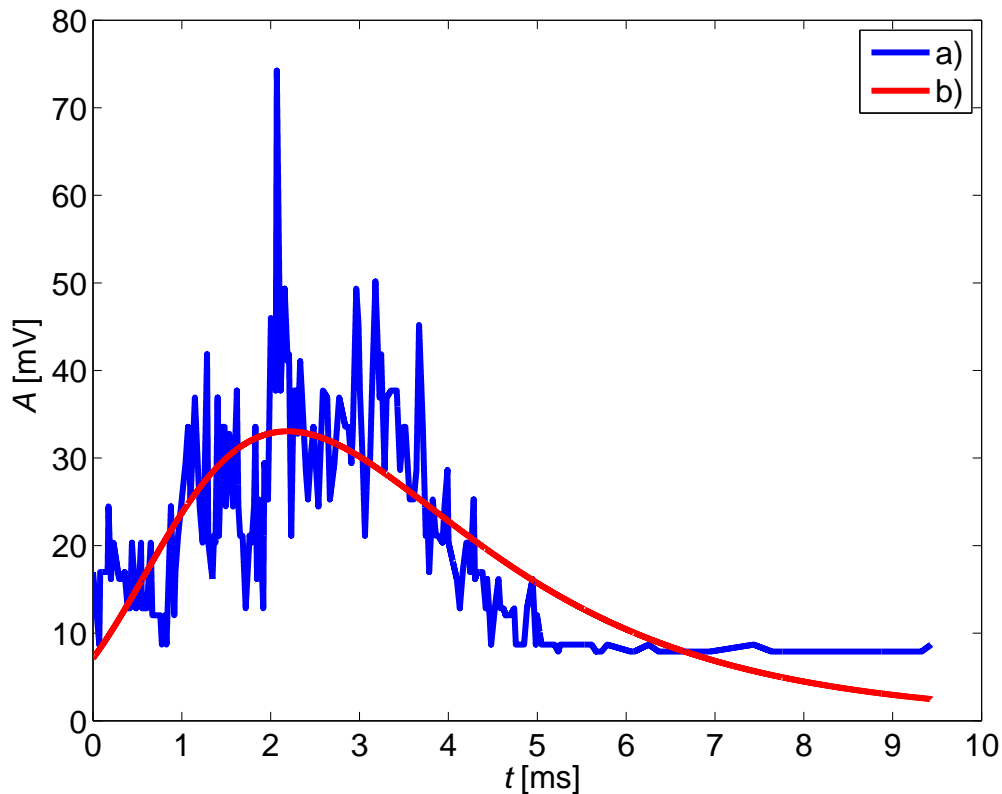
$A \in \mathbb{R}$  - estymata parametru strukturalnego, amplituda,

$\sigma > 0$  - estymata parametru strukturalnego, skala,

$\mu \in \mathbb{R}$  - estymata parametru strukturalnego, lokalizacja,

$k \in \mathbb{R}$  - estymata parametru strukturalnego, kształt.

Na rys. 5.3 przedstawiono przebieg czasowy obwiedni sygnałów EA generowanej przez WNZ klasy 6 i obliczoną krzywą regresji typu GEV.



Rysunek 5.3: Przebieg czasowy obwiedni (a) sygnałów EA generowanej przez WNZ klasy 6 i wyznaczona krzywa regresji (b) opisana funkcją typu GEV.  $R^2=0,727$

Model typu wykładniczo-logarytmiczno-normalnego (LN) [116]:

$$f_{LN}(t) = \frac{A}{t\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\ln t - \mu)^2}{2\sigma^2}\right), \quad (5.21)$$

gdzie:  $f_{LN}$  - aproksymata funkcji regresji typu LN,

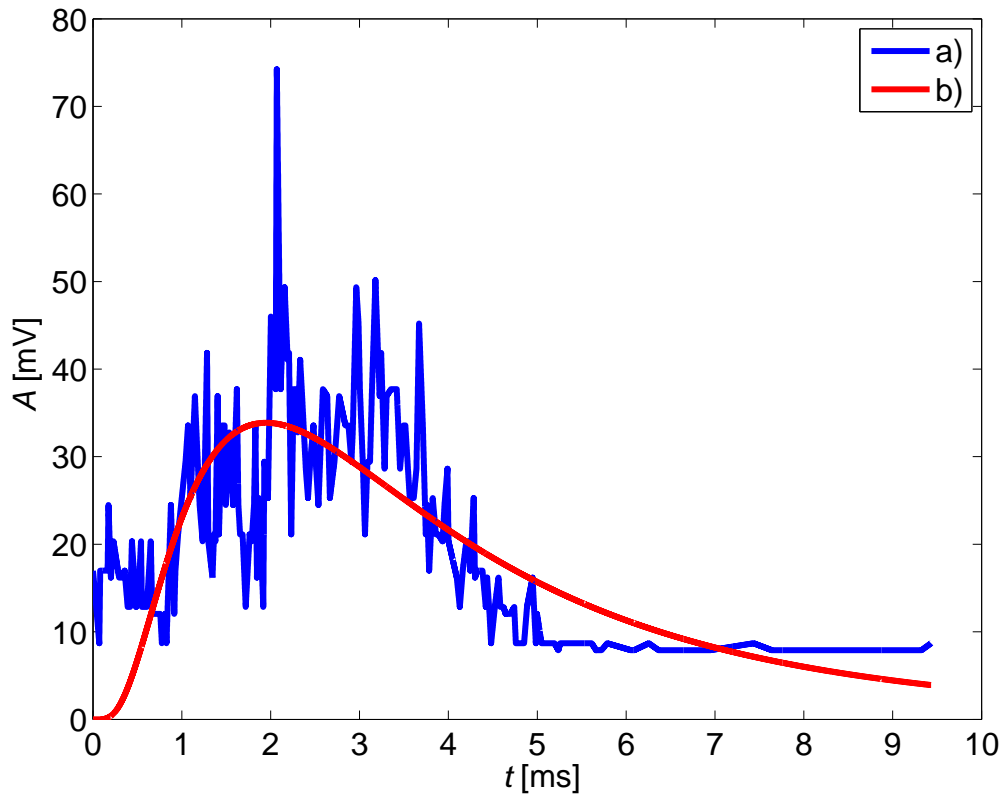
$t \geq 0$  - czas,

$A \in \mathbb{R}$  - estymata parametru strukturalnego, amplituda,

$\sigma > 0$  - estymata parametru strukturalnego, skala,

$\mu \in \mathbb{R}$  - estymata parametru strukturalnego, lokalizacja.

Na rys. 5.4 przedstawiono przebieg czasowy obwiedni sygnałów EA generowanej przez WNZ klasy 6 i obliczoną krzywą regresji typu LN.



Rysunek 5.4: Przebieg czasowy obwiedni (a) sygnałów EA generowanej przez WNZ klasy 6 i wyznaczona krzywa regresji (b) opisana funkcją typu LN.  $R^2=0,656$

Model typu t-Studenta (TL) [117]:

$$f_{\text{TL}}(t) = \frac{A\Gamma\left(\frac{k+1}{2}\right)}{\sigma\sqrt{\sigma\pi}\Gamma\left(\frac{k}{2}\right)} \left[ \frac{k + \left(\frac{t+\mu}{\sigma}\right)^2}{k} \right]^{-\frac{k+1}{2}}, \quad (5.22)$$

gdzie:  $f_{\text{TL}}$  - aproksymata funkcji regresji typu TL,

$t \in \mathbb{R}$  - czas,

$A \in \mathbb{R}$  - estymata parametru strukturalnego, amplituda,

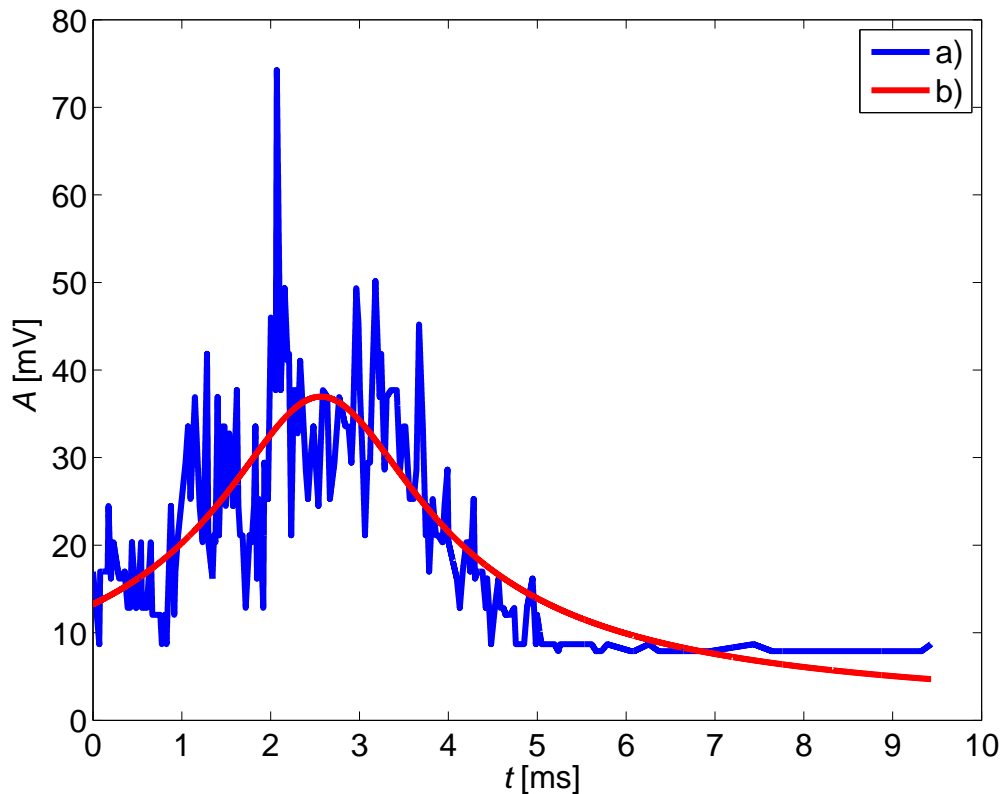
$\sigma > 0$  - estymata parametru strukturalnego, skala,

$\mu \in \mathbb{R}$  - estymata parametru strukturalnego, lokalizacja,

$k > 0$  - estymata parametru strukturalnego, kształt,

$\Gamma$  - funkcja Gamma.

Na rys. 5.5 przedstawiono przebieg czasowy obwiedni sygnałów EA generowanej przez WNZ klasy 6 i obliczoną krzywą regresji typu TL.



Rysunek 5.5: Przebieg czasowy obwiedni (a) sygnałów EA generowanej przez WNZ klasy 6 i wyznaczona krzywa regresji (b) opisana funkcją typu TL.  $R^2=0,793$

Model sigmoidalno-wykładniczy (SW):

$$f_{sw}(t) = \frac{A}{1 + ke^{-(t-\mu)}} \sum_{i=1}^3 a_i e^{\left(-\frac{t-\mu_i}{\sigma_i^2}\right)}, \quad (5.23)$$

gdzie:  $f_{sw}$  - aproksymata funkcji regresji typu SW,

$t \in \mathbb{R}$  - czas,

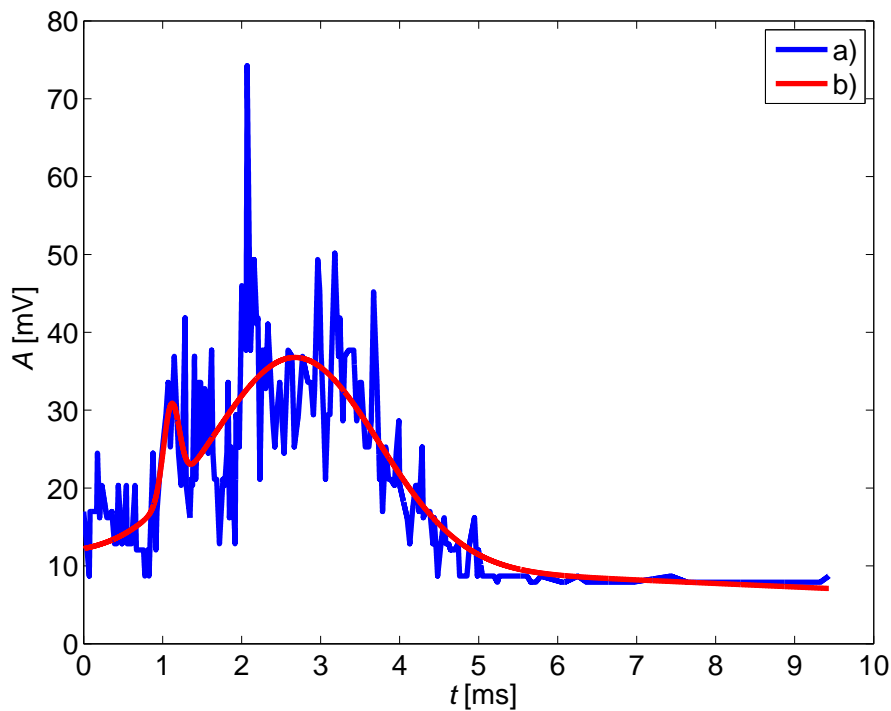
$(A, a_i) \in \mathbb{R}$  - estymaty parametrów strukturalnych, amplituda,

$k > 0$  - estymata parametru strukturalnego, narastanie,

$\sigma_i > 0$  - estymaty parametrów strukturalnych, skala,

$(\mu, \mu_i) \in \mathbb{R}$  - estymaty parametrów strukturalnych, lokalizacja.

Na rys. 5.6 przedstawiono przebieg czasowy obwiedni sygnałów EA generowanej przez WNZ klasy 6 i obliczoną krzywą regresji typu SW.



Rysunek 5.6: Przebieg czasowy obwiedni (a) sygnałów EA generowanej przez WNZ klasy 6 i wyznaczona krzywa regresji (b) opisana funkcją typu SW.  $R^2=0,838$

Model hyperboliczno-wykładniczy (TH):

$$f_{\text{TH}}(t) = (A \tanh(t - \mu) + b) \sum_{i=1}^3 a_i e^{\left(-\frac{t-\mu_i}{\sigma_i^2}\right)}, \quad (5.24)$$

gdzie:  $f_{\text{TH}}$  - aproksymata funkcji regresji typu TH,

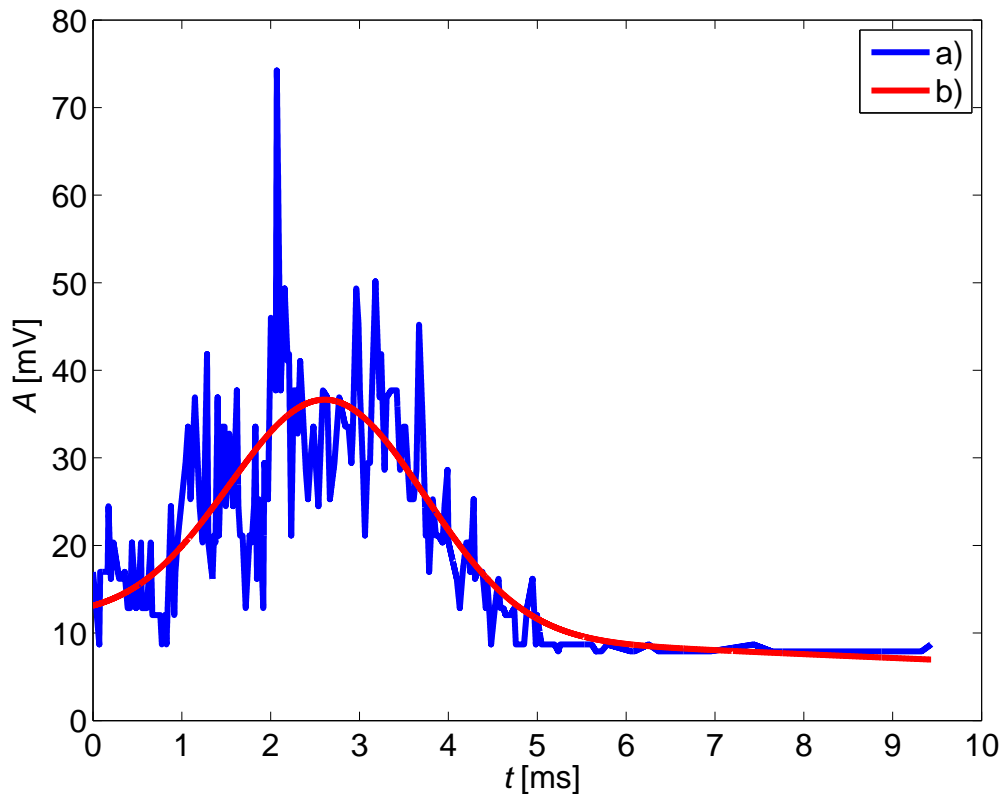
$t \in \mathbb{R}$  - czas,

$(A, a_i) \in \mathbb{R}$  - estymaty parametrów strukturalnych, amplituda,

$\sigma_i \in \mathbb{R}$  - estymaty parametrów strukturalnych, skala,

$(\mu, \mu_i, b) \in \mathbb{R}$  - estymaty parametrów strukturalnych, lokalizacja.

Na rys. 5.7 przedstawiono przebieg czasowy obwiedni sygnałów EA generowanej przez WNZ klasy 6 i obliczoną krzywą regresji typu TH.



Rysunek 5.7: Przebieg czasowy obwiedni (a) sygnałów EA generowanej przez WNZ klasy 6 i wyznaczona krzywa regresji (b) opisana funkcją typu TH.  $R^2=0,822$

Jako miarę dopasowania estymowanych parametrów funkcji regresji do empirycznych wartości wykorzystano współczynnik korelacji, który można wyrazić równaniem (5.25) [12]. Wartości współczynnika wyznaczono dla 90-ciu przebiegów każdej z rozpatrywanych klas. Następnie określono średnią arytmetyczną, medianę

i odchylenie standardowe dla ośmiu klas sygnałów EA od WNZ. Wyznaczone wartości zestawiono w tab. 5.1 i 5.2

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})(\hat{y}_i - \bar{\hat{y}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{\hat{y}})^2}} \quad (5.25)$$

gdzie:  $r$  - współczynnik korelacji,

$y$  - zmienna empiryczna,

$\hat{y}$  - zmienna teoretyczna (estymowana),

$i = \langle 1, 2, \dots, n \rangle$ ,

$n=25000$  - liczba danych wchodzących w skład jednego przebiegu.

Tablica 5.1: Wartości średniej arytmetycznej wyznaczone na podstawie 90-ciu obliczonych współczynników korelacji dla ośmiu klas sygnałów EA od WNZ

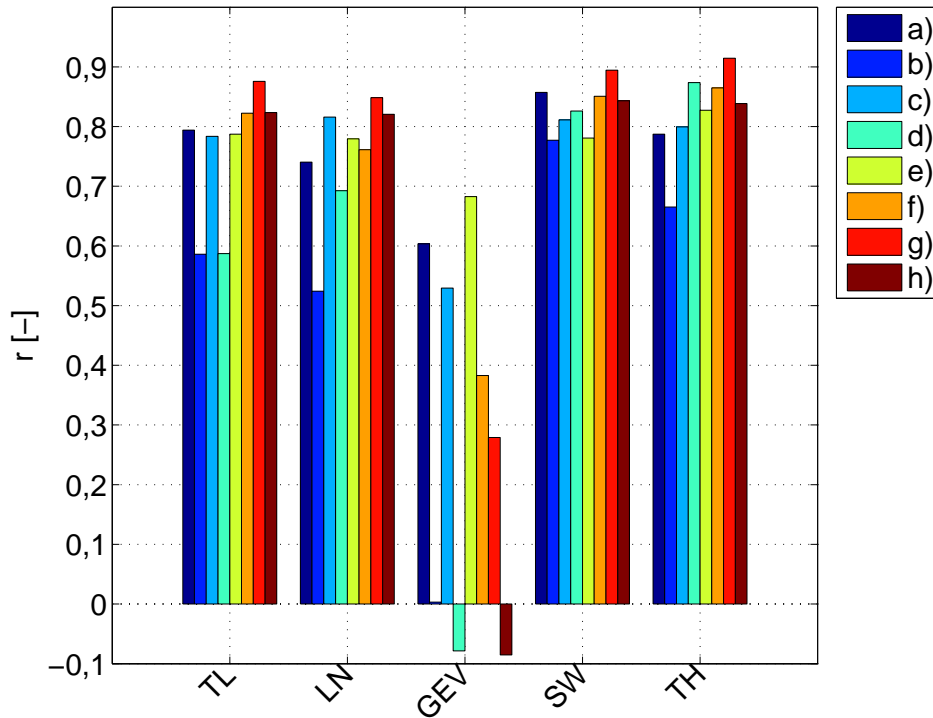
Nr klasy	Wartości wskaźników dopasowania				
	Nazwa modelu				
	TL	LN	GEV	SW	TH
1	0,79	0,74	0,60	0,86	0,79
2	0,57	0,52	0,01	0,78	0,66
3	0,78	0,82	0,53	0,81	0,80
4	0,59	0,69	-0,08	0,83	0,87
5	0,79	0,78	0,68	0,78	0,83
6	0,82	0,76	0,38	0,85	0,86
7	0,88	0,85	0,28	0,89	0,91
8	0,82	0,82	-0,09	0,84	0,84

Tablica 5.2: Wartości średniej arytmetycznej, mediany i odchylenia standardowego wyznaczone dla ośmiu klas sygnałów EA od WNZ

wskaźnik	Wartości wskaźników dopasowania				
	Nazwa modelu				
	TL	LN	GEV	SW	TH
średnia arytmetyczna	0,78	0,75	0,37	0,83	0,81
mediana	0,79	0,77	0,46	0,85	0,81
odchylenie standardowe	0,09	0,10	0,29	0,04	0,07

W celach porównawczych na rys. 5.8 przedstawiono wartości średnich arytmetycznych wyznaczone dla współczynników korelacji obliczonych dla

rozpatrywanych klas WNZ. Natomiast na rys. 5.9 przedstawiono wartości średniej arytmetycznej, mediany i odchylenia standardowego, które wyznaczono na podstawie obliczonych współczynników korelacji dla ośmiu klas, dla 5 modeli matematycznych funkcji regresji.



Rysunek 5.8: Średnie arytmetyczne wyznaczone dla wartości współczynnika korelacji obliczonych dla rozpatrywanych klas WNZ: (a) klasa 1, (b) klasa 2, (c) klasa 3, (d) klasa 4, (e) klasa 5, (f) klasa 6, (g) klasa 7, (h) klasa 8

Parametry badanych modeli estymowano wykorzystując metodę Nelder-Mead Simplex [118], stosując kryterium minimalnej wartości normy reszt  $\delta_R$  (5.26) [119].

$$\delta_R = \|\hat{\mathbf{y}} - \mathbf{y}\| = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2} \quad (5.26)$$

gdzie:  $\delta_R$  - wartość normy  $\|\hat{\mathbf{y}} - \mathbf{y}\|$ ,

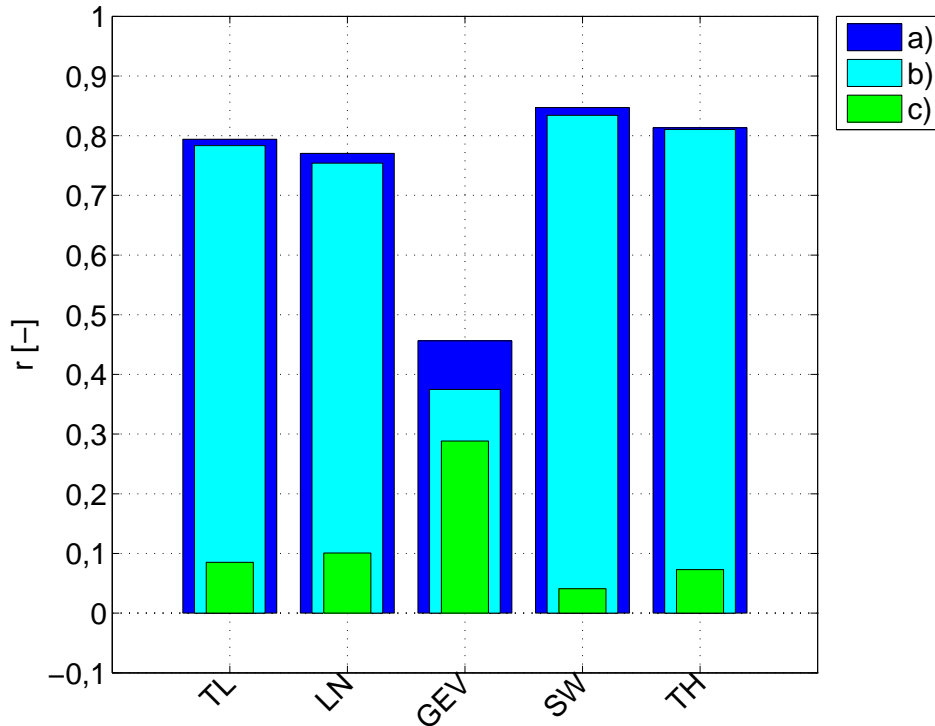
$\hat{\mathbf{y}}$  - aproksymata funkcji regresji,

$\mathbf{y}$  - dane empiryczne,

$i = \langle 1, 2, \dots, n \rangle$ ,

$n=25000$  - liczba danych wchodzących w skład jednego przebiegu.





Rysunek 5.9: Wartości średniej arytmetycznej (a), mediany (b) i odchylenia standardowego (c) wyznaczone na podstawie obliczonych współczynników korelacji dla ośmiu klas WNZ

Przykładowe przebiegi obwiedni sygnałów EA od WNZ i estymaty funkcji regresji zestawiono w załączniku C. Na podstawie analizy porównawczej wartości współczynników determinacji wyznaczonych dla rozpatrywanych modeli, można stwierdzić, że modele typu sigmoidalno-wykładniczego (SW) i hyberboliczno-wykładniczego (TH) osiągają średnio najwyższe wartości wskaźników dopasowania wartości estymowanych do wartości empirycznych, którymi są współczynnik determinacji, jego średnia arytmetyczna i mediana oraz najmniejszą wartość odchylenia standardowego, które obliczono dla 90-ciu przebiegów sygnałów EA od ośmiu rozpatrywanych klas WNZ. Biorąc jednak pod uwagę stosunkowo dużą wartość parametrów modelu SW i TH możliwe jest również zastosowanie modeli typu t - tudenta (TL) lub wykładniczo-logarytmiczno-normalnego (LN), które również wykazują wysoką wartość współczynnika korelacji przy małej, w porównaniu z modelami SW i TH, liczbie parametrów. Ponadto wykazano, że rozpatrywane modele charakteryzują się najwyższym poziomem współzależności dla sygnałów EA generowanej przez WNZ klasy 7 (rys. 5.8g).

### 5.3 Model matematyczny źródła sygnału emisji akustycznej generowanej przez wyładowania niezupełne

Zjawiska EA modeluje się przez wprowadzenie ośrodka liniowo-sprężystego, w którym występują dynamiczne źródła EA w postaci zlokalizowanych naprężeń lub odkształceń. Dynamiczne źródła modeluje się jako punktowe lub rozciągłe. Wprowadzenie źródeł punktowych umożliwia analizę porównawczą wyników uzyskiwanych w eksperymentach z wykorzystaniem sztucznie budowanych dynamicznych źródeł EA. Natomiast źródła rozciągłe wykorzystuje się w celach porównawczych do testowania wyników badań z wykorzystaniem rzeczywistych źródeł EA w ciałach stałych [3]. Autor monografii [3] podaje przykłady modeli matematycznych dla dynamicznych źródeł rozciągłych w postaci niesprężystych odkształceń  $\beta_{ij}^*(\vec{x}^*, t)$  (5.27) i sił masowych  $\vec{F}^*(\vec{x}^*, t)$  (5.28), które są funkcjami czasu określonymi w obszarze  $V^*$  zajmowanym przez źródło EA.

$$\beta_{ij}^* := \beta_{ij}^*(\vec{x}^*, t^*) = \beta_{ij}^*(\vec{x}) f^*(t^*) \quad (5.27)$$

gdzie:  $\beta_{ij}^*$  - niesprężyste odkształcenie w funkcji przestrzeni,

$f^*(t^*)$  - dynamiczne źródło w funkcji czasu.

$$F_i^* := F_i^*(\vec{x}^*, t^*) = F_i^*(\vec{x}) f^*(t^*) \quad (5.28)$$

gdzie:  $F_i^*$  - siła masowa w funkcji przestrzeni,

$f^*(t^*)$  - dynamiczne źródło w funkcji czasu.

Sposób narastania funkcji źródła może być modelowany przez następujące funkcje:

**Funkcja Heaviside'a** [7]

$$f^*(t^*) = \begin{cases} 0 & \text{dla } t^* < 0 \\ 1 & \text{dla } t^* \geq 0 \end{cases} \quad (5.29)$$

**Funkcja liniowa [120]**

$$f^*(t^*) = \begin{cases} 0 & \text{dla } t^* < 0 \\ \frac{t^*}{4\tau} & \text{dla } 0 \leq t^* \leq 4\tau \\ 1 & \text{dla } t^* \geq 4\tau \end{cases} \quad (5.30)$$

gdzie:  $\Delta\tau = 4\tau$  - czas narastania funkcji źródła EA,

**Funkcja typu Gausa [121]**

$$f^*(t^*) = \frac{1}{2} \operatorname{erf}\left(\frac{t^*}{2\tau} + 1\right) \quad (5.31)$$

gdzie:

$$\operatorname{erf}\left(\frac{t^*}{2\tau}\right) = \int_0^{\frac{t^*}{2\tau}} e^{-y^2} dy$$

$\Delta\tau = 2\tau$  - czas narastania funkcji źródła EA.

Autor pracy [8] aproksymuje falę ciśnienia akustycznego generowaną przez WNZ za pomocą kombinacji funkcji opisującej narastanie fali i funkcji opisującej oscylacyjne tłumienie fali. W pracy [8] przedstawiono trzy modele matematyczne:

1. Kombinacja prostej z tłumioną wykładniczo sinusoidą:

$$f(t) = \begin{cases} \frac{t}{\tau} & \text{dla } 0 < t < \tau \\ e^{-\alpha t} \sin \Omega t & \text{dla } t \geq \tau \end{cases} \quad (5.32)$$

gdzie:  $\tau$  - stała czasowa,

$\alpha, \Omega$  - parametry rozpatrywanej prostej.

2. Kombinacja odcinka sinusoidy z tłumioną wykładniczo sinusoidą:

$$f(t) = \begin{cases} \sin \frac{\pi}{2\tau} t & \text{dla } 0 < t < \tau \\ e^{-\alpha t} \sin \Omega t & \text{dla } t \geq \tau \end{cases} \quad (5.33)$$

3. Kombinacja odcinka cosinusoidy z tłumioną wykładniczo sinusoidą:

$$f(t) = \begin{cases} \frac{1}{2}(1 - \cos \frac{\pi}{\tau} t) & \text{dla } 0 < t < \tau \\ e^{-\alpha t} \sin \Omega t & \text{dla } t \geq \tau. \end{cases} \quad (5.34)$$

Autor pracy [8] wykazał, że kształt czoła fali EA nie ma istotnego wpływu na przebiegi krzywych znormalizowanej energii. Natomiast czas narastania czoła fali jest istotnym czynnikiem wpływającym na szerokość widma częstotliwościowego.

Bazując na informacjach zawartych w publikacjach naukowych i referatach konferencyjnych, w których przedstawiono wyniki pomiarów i analiz sygnałów EA generowanej przez WNZ [3, 8, 98, 108], autor rozprawy zaproponował model matematyczny fali EA generowanej przez pojedyncze WNZ w postaci kombinacji funkcji Heaviside'a z wykładniczo tłumioną cosinusoidą, opisaną równaniem (5.35).

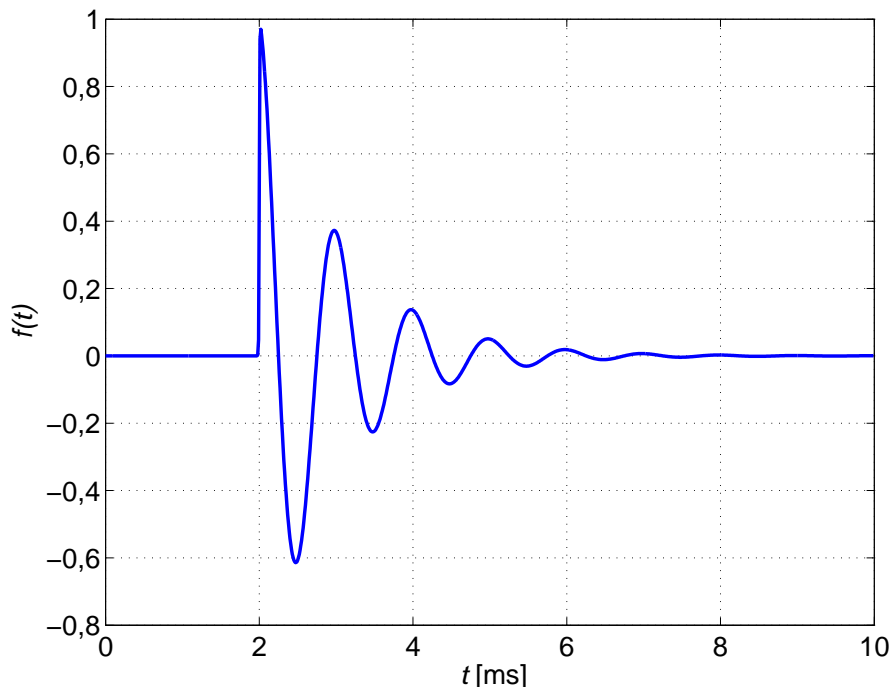
$$y(t) = \mathbf{1}(t)e^{-t/\gamma} \cos(2\pi ft) \quad (5.35)$$

gdzie:  $f$  - częstotliwość sygnału EA,

$t$  - czas,

$\gamma$  - współczynnik skali krzywej wykładniczej.

Założony przebieg czasowy sygnału EA generowanej przez pojedyncze WNZ pokazano na rys. 5.10.



Rysunek 5.10: Przebieg czasowy sygnału EA generowanej przez pojedyncze WNZ

Zaletą tego typu modelu jest jego nieskomplikowana struktura, która nie powoduje znaczących trudności obliczeniowych. Wadą jest natomiast słabe odwzorowanie rzeczywistego przebiegu i nieciągłość funkcji jednostkowej, co z kolei powoduje niestabilność obliczeń numerycznych. Problem ten można częściowo rozwiązać poprzez zastąpienie funkcji Heaviside'a funkcją sigmoidalną (5.36), która jest funkcją ciągłą, co zapewnia stabilność obliczeń numerycznych.

$$y(t) = \frac{A}{1 + ae^{-b(t-\mu_1)}} e^{-\left(\frac{t-\mu_2}{\gamma}\right)} \cos(2\pi f(t - \mu_3)) \quad (5.36)$$

gdzie:  $A$  - amplituda,

$a$  - współczynnik narastania krzywej sigmoidalnej,

$b$  - współczynnik skali krzywej sigmoidalnej,

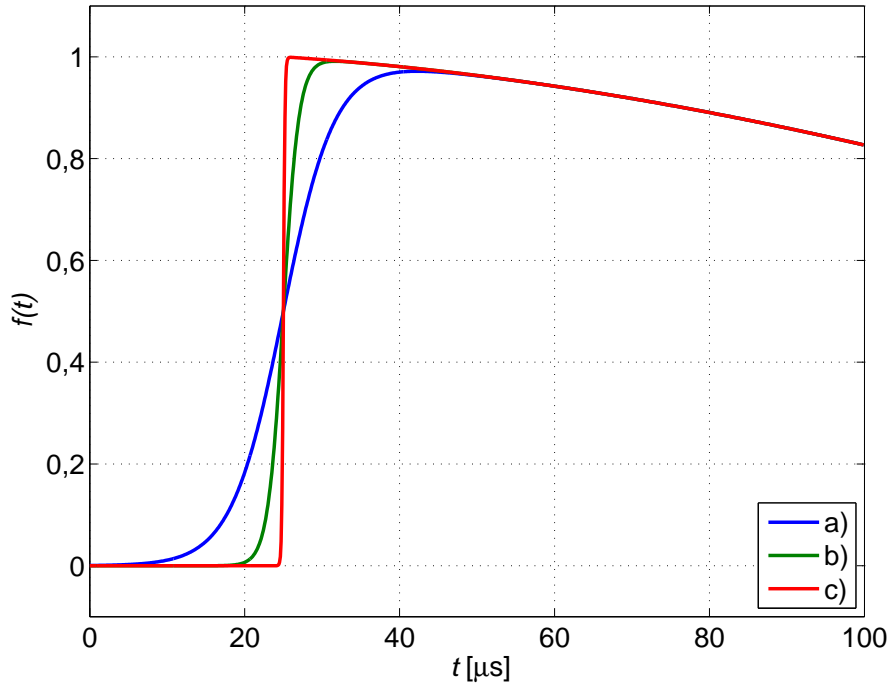
$\gamma$  - współczynnik skali krzywej wykładniczej,

$\mu_i, i \in \langle 1, 2, 3 \rangle$  - współczynniki lokalizacji.

Wartość współczynnika narastania  $a$  ma wpływ na czas narastania czoła fali EA. Na rys. 5.11 przedstawiono wybrany przedział czasowy przebiegu sygnału EA od WNZ dla trzech przykładowych wartości współczynnika narastania krzywej sigmoidalnej  $a$ .

Sygnał EA generowany jest przez pewną bliżej nieokreśloną liczbę pojedynczych WNZ, które występują seryjnie w bardzo bliskiej odległości od siebie oraz w różnych chwilach, aczkolwiek wszystkie w bardzo małym przedziale czasowym, poniżej  $1 \mu s$  [8, 98]. Natomiast czas trwania sygnału EA zależy od parametrów kanału akustycznego i może zawierać się w przedziale od kilku milisekund do około jednej sekundy, przy czym czas narastania fali ciśnienia akustycznego do wartości maksymalnej wynosi około  $10 \mu s$  [8].

Można zatem przyjąć, że sygnał EA od WNZ składa się z  $N$  pojedynczych impulsów zdefiniowanych za pomocą równania (5.36), przy czym każdy z nich posiada różne wartości podstawowych parametrów tj.: częstotliwości, przesunięcia w czasie i amplitudy. Fale EA podlegają zjawiskom falowym, można zatem wykorzystać zasadę superpozycji i zsumować poszczególne impulsy w jeden sygnał, co zapisano za pomocą wyrażenia (5.37).



Rysunek 5.11: Wybrany przedział czasowy przebiegu sygnału EA generowanej przez pojedyncze WNZ dla różnych wartości parametru współczynnika narastania *a*. a)  $a = 0,3e^6$ , b)  $a = 1e^6$ , c)  $a = 10e^6$

$$y(t) = \sum_{i=1}^N \frac{A_i}{1 + a_i e^{-b_i(t-\mu_{1i})}} e^{-\left(\frac{t-\mu_{2i}}{\gamma_i}\right)} A_i^{\cos} \cos(2\pi f_i(t - \mu_{3i})) \quad (5.37)$$

gdzie:  $N$  - liczba pojedynczych impulsów, które składają się na sygnał EA,

$A_i$  - amplituda składowej sigmoidalnej,

$a_i$  - współczynnik narastania składowej sigmoidalnej,

$b_i$  - współczynnik skali składowej sigmoidalnej,

$\gamma_i$  - współczynnik skali składowej wykładniczej,

$A_i^{\cos}$  - amplituda składowej cosinusoidalnej,

$f_i$  - częstotliwość składowej cosinusoidalnej,

$\mu_{1i}, \mu_{2i}, \mu_{3i}$  - współczynniki lokalizacji.

Na podstawie wyników przeprowadzonej analizy korelacyjnej w rozdz. 5.2 wykazano, że do opisu obwiedni sygnałów EA od WNZ można zastosować model sigmoidalny. Ponadto wykazano, że model ten charakteryzuje się wysokim poziomem współzależności dla sygnałów EA generowanej przez WNZ klasy

7 (rys. 5.8g). Dlatego w dalszych rozważaniach rozpatrywano sygnały EA zarejestrowane podczas WNZ w układzie je modelującym typu wieloostre - płyta, który umieszczono w oleju izolacyjnym z pęcherzykami gazowymi (tab. 4.1).

W ramach badań zamodelowano sygnał EA od WNZ określony zależnością (5.37), który złożono z dwunastu pojedynczych impulsów ( $N=12$ ) o różnych wartościach parametrów. Zamodelowany sygnał ma postać, którą wyraża równanie (5.38).

$$y(t) = \sum_{i=1}^{12} \frac{A_i}{1 + a_i e^{-b_i(t-\mu_{1i})}} e^{-\left(\frac{t-\mu_{2i}}{\tau_i}\right)} A_i^{\cos} \cos(2\pi f_i(t - \mu_{3i})) \quad (5.38)$$

Parametry równania sygnału modelowego estymowano w taki sposób, aby odpowiadał on rzeczywistemu przebiegowi sygnałów EA od WNZ klasy 7. Kształt zamodelowanego sygnału określają składowa sigmoidalna i wykładnicza, poprzez wartości parametrów: amplitudy, skali i lokalizacji. Natomiast składowe częstotliwościowe i ich moc określone są przez wartości parametrów  $f_i$  i  $A_i^{\cos}$ .

W celu zweryfikowania zaproponowanego modelu wybrano dwa przykładowe sygnały EA od WNZ klasy 7, które zarejestrowano podczas pomiarów laboratoryjnych. Ponadto wykorzystano modele ich obwiedni, których proces wyznaczenia opisano w rozdz. 5.2. Analiza porównawcza dotyczyła przebiegów widm gęstości mocy Power Spectral Density (PSD), które wyznaczono z wykorzystaniem metody Welch dla sygnału zamodelowanego matematycznie i zarejestrowanego w pomiarach. Wartości parametrów rozpatrywanego modelu wyznaczono przy wykorzystaniu metody Nelder-Mead-Simplex z zachowaniem kryterium minimalnej wartości normy reszt (5.26), która dla analizowanych przypadków wynosiła średnio  $\delta_R = 8.52$ . Z uwagi na zróżnicowany charakter analizowanych przebiegów sygnałów EA od WNZ klasy 7, które charakteryzują się różnym czasem trwania zdarzeń akustycznych i amplitudą składowych częstotliwościowych, wartości parametrów ulegają zmianie dla poszczególnych przypadków. Na podstawie doniesień literaturowych [5, 8, 14] założono, że dla sygnałów EA od WNZ tej samej klasy, pasma dominujących częstotliwości się nie zmieniają. Wartości parametrów zestawiono w tab. 5.3 i 5.4.

Tablica 5.3: Wartości parametrów  $A_i^{\cos}$  i  $f_i$  dla obu zamodelowanych sygnałów EA od WNZ klasy 7

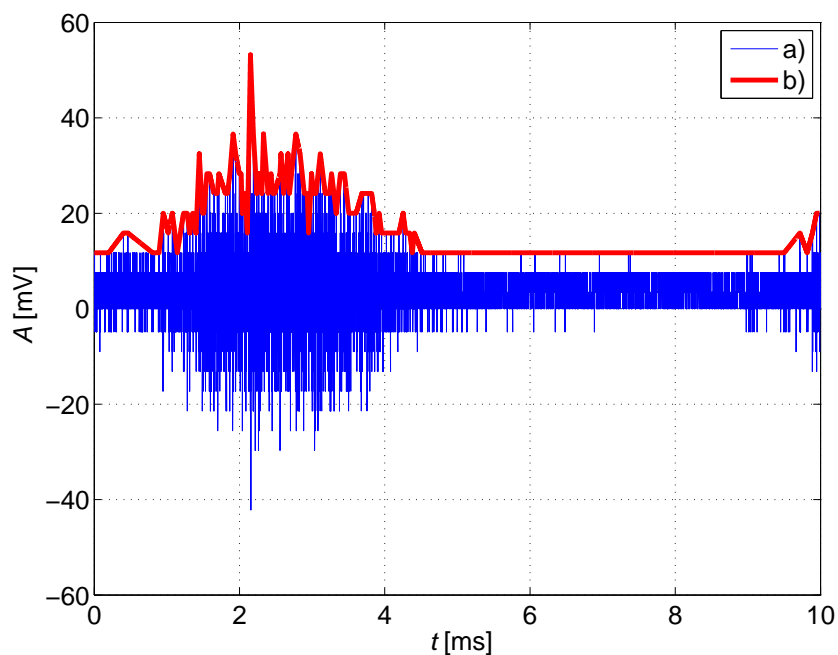
l.p. $i$	Przebieg nr 1		Przebieg nr 2	
	$A^{\cos}$ [V]	$f$ [kHz]	$A^{\cos}$ [V]	$f$ [kHz]
1	6,70	20	3,73	20
2	2,25	70	1,93	70
3	3,00	120	2,98	120
4	2,54	170	2,66	170
5	3,50	220	4,15	220
6	4,56	270	4,29	270
7	-2	320	1,35	320
8	3,21	370	1,25	370
9	2,64	420	1,07	420
10	1,11	470	0,78	470
11	0,79	520	0,51	520
12	0,93	570	0,49	570

Tablica 5.4: Wartości parametrów składowych sigmoidalnej i wykładniczej dla dwóch zamodelowanych sygnałów EA od WNZ klasy 7. Parametry są jednakowe dla wszystkich dwunastu impulsów EA

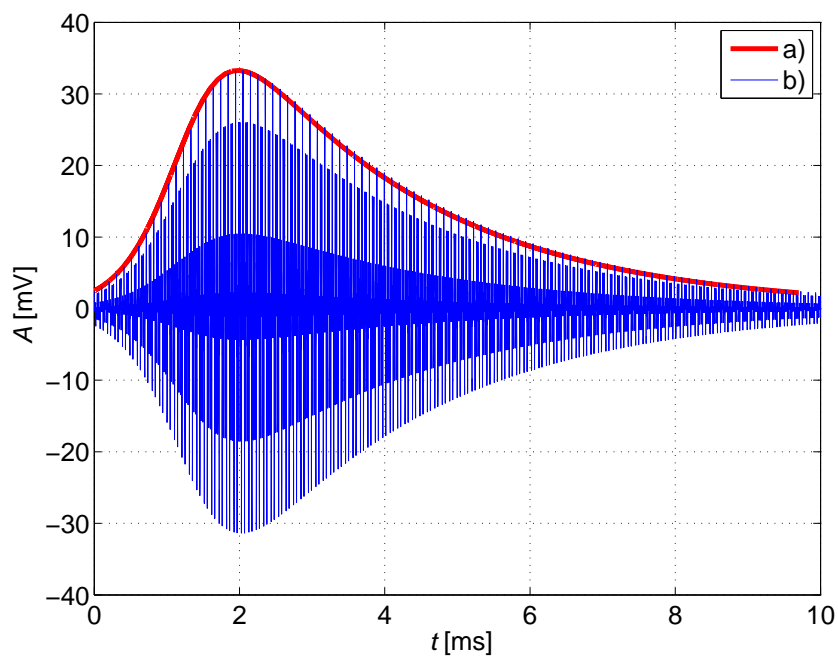
Parametr	Przebieg nr 1	Przebieg nr 2
$A_i$ [V]	1,5e-5	3,14e-5
$a_i$ [-]	0,34	0,34
$b_i$ [-]	2666,53	2666,53
$\gamma_i$ [-]	2,7e-3	0,5e-3
$\mu_{1i}$ [ms]	1,7	2,8
$\mu_{2i}$ [ms]	15,0	5,1
$\mu_{3i}$ [ms]	0,0	0,0

Na rys. 5.12 - 5.15 przedstawiono przebiegi czasowe obu rozpatrywanych sygnałów EA od WNZ klasy 7 odpowiednio: zarejestrowanych podczas pomiarów laboratoryjnych i zamodelowanych na podstawie równania (5.38). Natomiast na rys. 5.16 i 5.17 przedstawiono przebiegi widm gęstości mocy wyznaczone dla obu rozpatrywanych sygnałów EA od WNZ klasy 7. Wartości parametru  $A^{\cos}$  określono na podstawie zgodności widm sygnału uzyskanego z pomiarów laboratoryjnych (5.16a i 5.17a) i sygnału obliczonego na podstawie opracowanego modelu (5.16b i 5.17b). Przy czym w analizach uwzględniano tylko wartości z przedziału częstotliwości (0-600) kHz. Wynikało to z faktu, że badane sygnały EA od WNZ nie zawierały składowych częstotliwościowych o wartościach powyżej 600 kHz.

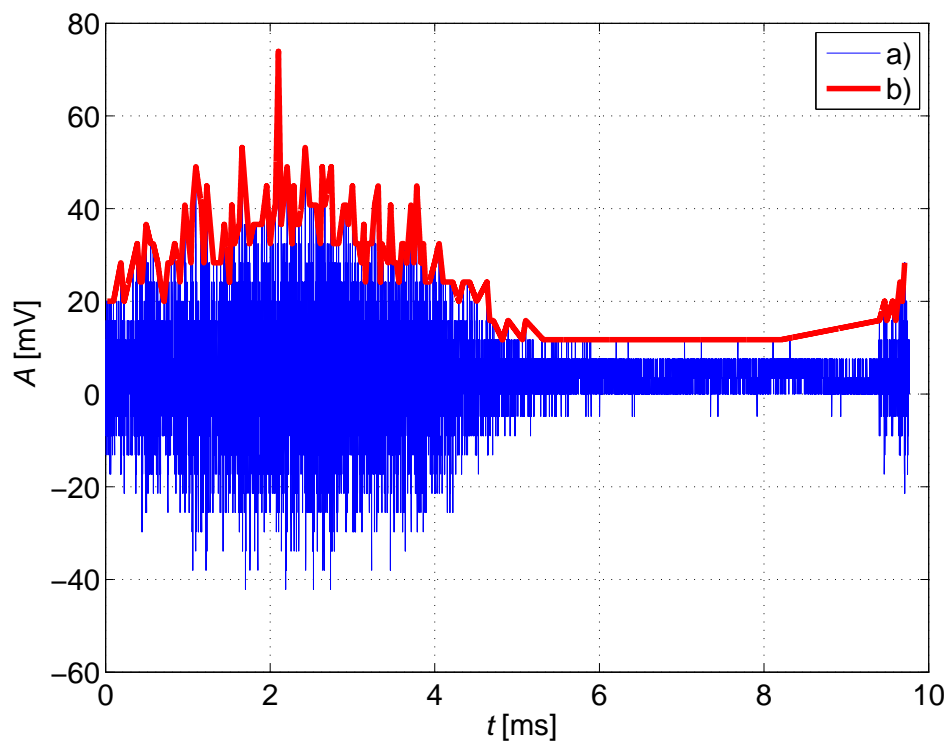




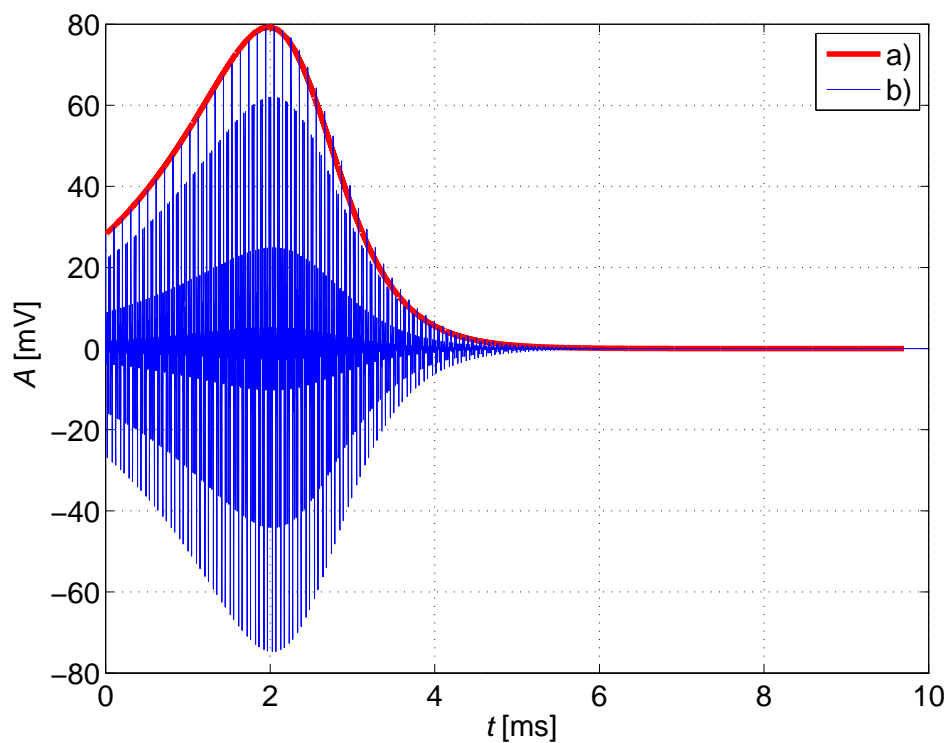
Rysunek 5.12: Przebieg czasowy zarejestrowanego sygnału (a) EA od WNZ klasy 7 z zaznaczoną obwiednią (b). Przebieg nr 1



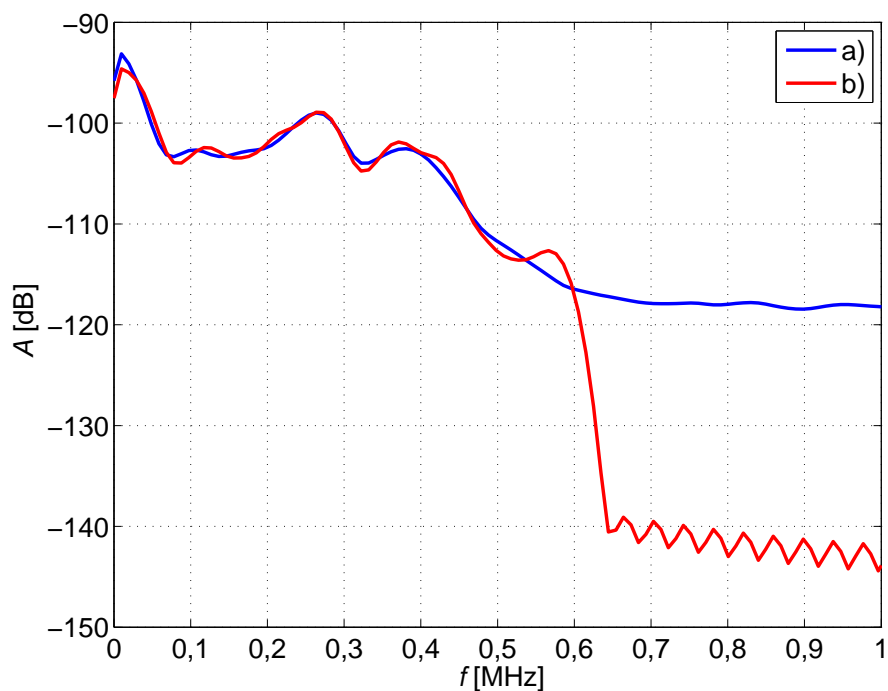
Rysunek 5.13: Przebieg czasowy zamodelowanego sygnału (a) EA od WNZ klasy 7 z zaznaczoną obwiednią (b). Przebieg nr 1



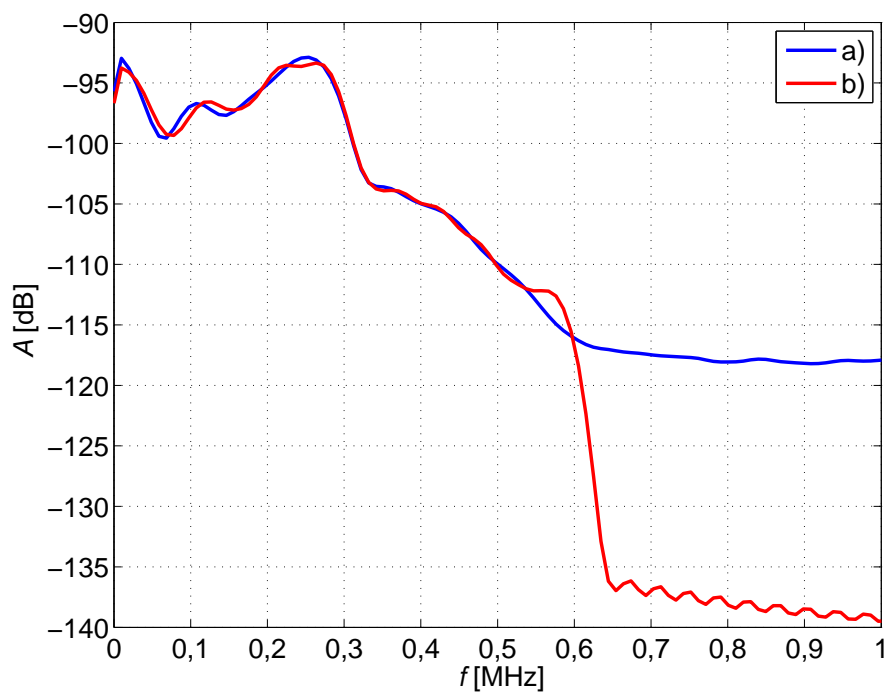
Rysunek 5.14: Przebieg czasowy zarejestrowanego sygnału (a) EA od WNZ klasy 7 z zaznaczoną obwiednią (b). Przebieg nr 2



Rysunek 5.15: Przebieg czasowy zamodelowanego sygnału (a) EA od WNZ klasy 7 z zaznaczoną obwiednią (b). Przebieg nr 2



Rysunek 5.16: Porównawcze zestawienie widm gęstości mocy wyznaczonych dla zamodelowanego (b) i zarejestrowanego (a) w pomiarach laboratoryjnych sygnałów EA od WNZ klasy 7. Przebieg nr 1



Rysunek 5.17: Porównawcze zestawienie widm gęstości mocy wyznaczonych dla zamodelowanego (b) i zarejestrowanego (a) w pomiarach laboratoryjnych sygnałów EA od WNZ klasy 7. Przebieg nr 2

Dodatkowo przeprowadzono analizę czasowo-częstotliwościową rozpatrywanych sygnałów. Spektrogramy uzyskano w wyniku zastosowania krótkoczasowego przekształcenia Fouriera STFT (ang. Short Time Fourier Transform), które dla sygnałów dyskretnych  $x(t)$  określone jest zależnością (5.39) [122, 123].

$$|STFT(n, f)|^2 = \left| \sum_{i=-\frac{N}{2}+1}^{\frac{N}{2}} x(n+i)h(i)e^{-\frac{j2\pi f i}{N}} \right|^2 \quad (5.39)$$

gdzie:  $STFT(n, f)$  - dyskretna postać krótkoczasowego przekształcenia Fouriera,

$n$  - dyskretna wartość czasu,

$f$  - dyskretna wartość częstotliwości,

$N$  - długość sekwencji danych,

$x_n(i)$  - fragment sygnału  $x(n)$  wycięty z przebiegu przez okno  $h(i)$ ,

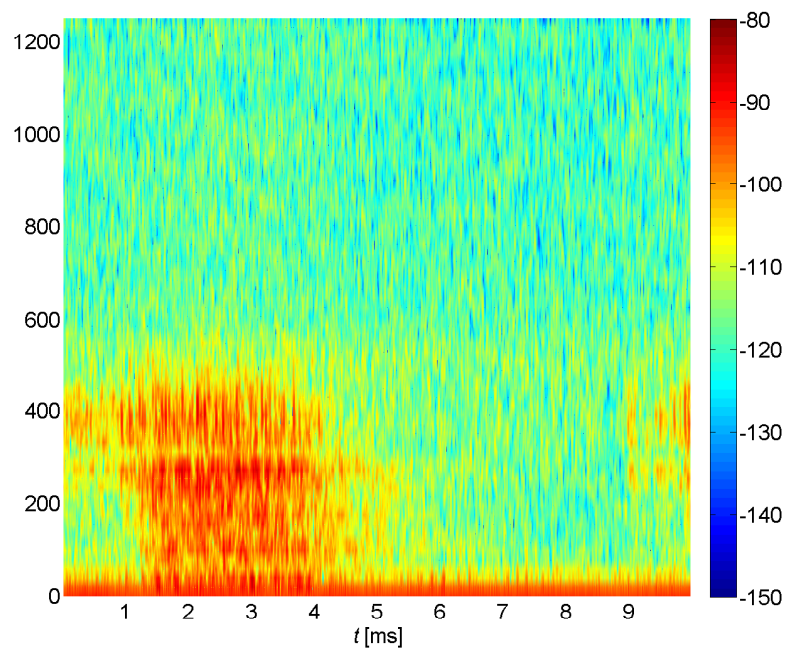
$h$  - funkcja okna.

W obliczeniach zastosowano okno czasowe Hamminga określone zależnością (5.40) [122].

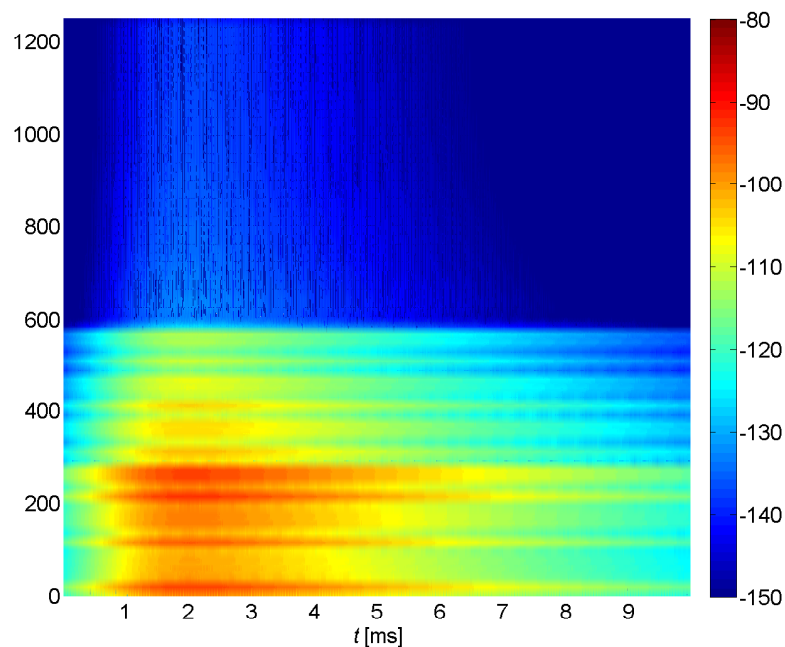
$$h(n) = 0,54 - 0,46 \frac{\cos 2\pi n}{N} \quad 0 \leq n \leq N \quad (5.40)$$

Na rys. 5.18 - 5.20 zaprezentowano wyniki analizy czasowo-częstotliwościowej. Przedstawione spektrogramy opisano, stosując skalę w postaci paska palety kolorów, których poszczególne barwy odpowiadają odpowiednim wartościom amplitud wyznaczonego widma liczone w decybelach.

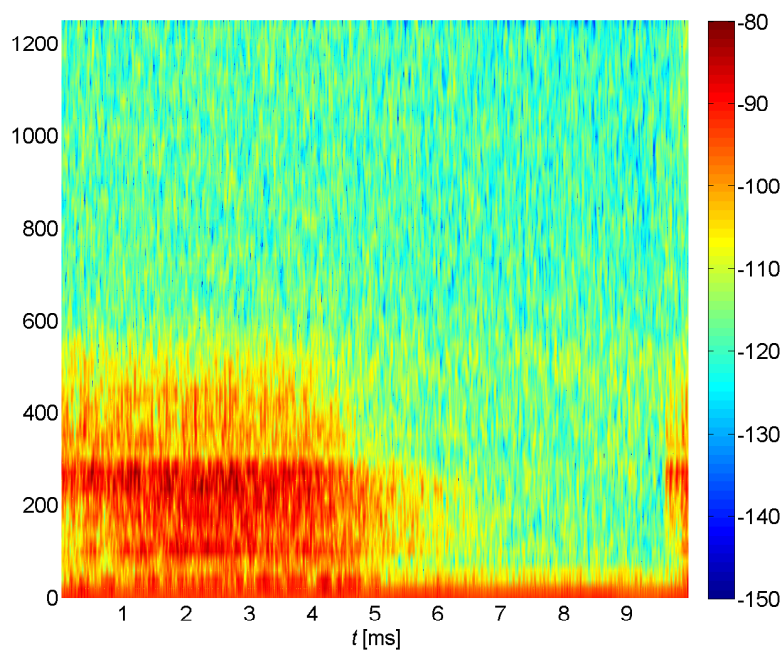
Zaprezentowane struktury czasowo-częstotliwościowe dla sygnałów modelowego i pomiarowego wykazują jednakowe zakresy dominujących częstotliwości. Czas trwania zdarzenia akustycznego w sygnale modelowym zależy od kształtu obwiedni jego przebiegu czasowego. Dla przebiegu nr 1 czas trwania jest dłuższy od oryginalnego sygnału. Natomiast w przypadku przebiegu nr 2 uzyskano strukturę o podobnym w stosunku do sygnału pomiarowego zakresie czasowym i częstotliwościowym.



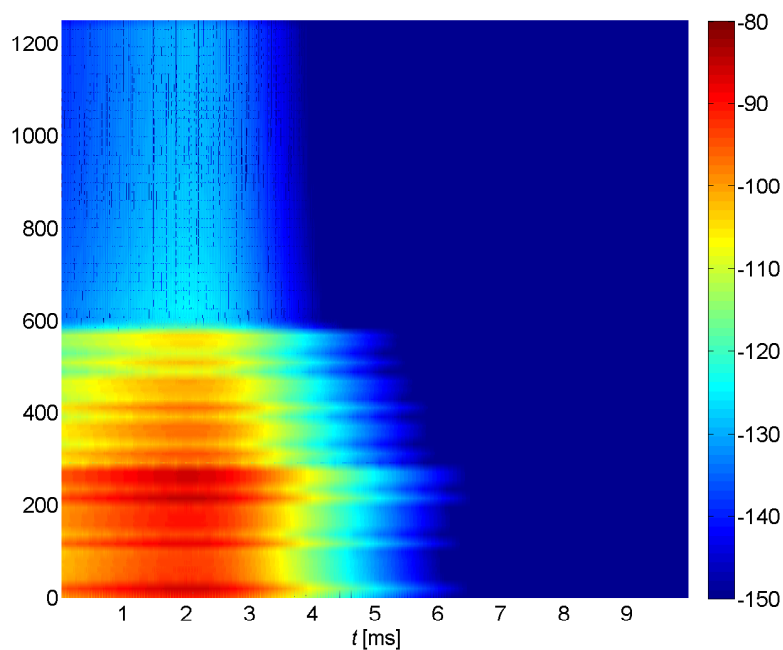
Rysunek 5.18: Spektrogram sygnałów EA od WNZ klasy 7, zarejestrowanych w pomiarach laboratoryjnych. Przebieg nr 1



Rysunek 5.19: Spektrogram sygnałów EA od WNZ klasy 7, wyznaczony na podstawie opracowanego modelu matematycznego. Przebieg nr 1



Rysunek 5.20: Spektrogram sygnałów EA od WNZ klasy 7, zarejestrowanych w pomiarach laboratoryjnych. Przebieg nr 2



Rysunek 5.21: Spektrogram sygnałów EA od WNZ klasy 7, wyznaczony na podstawie opracowanego modelu matematycznego. Przebieg nr 2

Na podstawie wykreślonych przebiegów czasowych, widm amplitudowych i struktur czasowo-częstotliwościowych stwierdzono, że możliwe jest określenie parametrów opracowanego modelu w taki sposób, aby odpowiadał on rzeczywistym sygnałom EA od WNZ zarejestrowanym w pomiarach laboratoryjnych.

W ramach wykonanych badań przeprowadzono symulacje numeryczne, w których zamodelowano źródło generujące falę akustyczną, która odpowiada sygnałom EA od WNZ zdefiniowanym w równaniu (5.37). Wyniki obliczeń numerycznych dla dwuwymiarowego modelu kadzi, dla pięciu składowych sygnału o różniących się wartościach częstotliwości, ale o tej samej amplitudzie  $A$  i o tym samym przesunięciu czasowym  $\mu$ , przedstawiono w rozdz. 6.4.

## Rozdział 6

---

# Symulacje numeryczne fali emisji akustycznej generowanej przez wyładowanie niezupełne

---

W ramach badań wykonano szereg symulacji numerycznych, w których obliczano czasoprzestrzenny rozkład ciśnienia akustycznego dla różnych obiektów. Wyniki przeprowadzonych symulacji zostały opublikowane w materiałach konferencyjnych [124–128] w czasopiśmie naukowych [129, 130]. Między innymi przeprowadzono symulacje w modelu szklanego naczynia wypełnionego olejem, wewnątrz którego umieszczone było źródło fal EA [129]. Ponadto wykonano symulacje dla sferycznych obiektów, w których źródłem fal EA był model zmieniającego objętość pęcherzyka powietrza [124], a także w uproszczonym modelu kadzi transformatora elektroenergetycznego [125, 126, 130] [127, 128].

W niniejszej rozprawie zostały zaprezentowane wyniki obliczeń numerycznych rozkładu ciśnienia akustycznego w modelu kadzi wypełnionej olejem elektroizolacyjnym. Rozpatrywany model odpowiada rzeczywistemu obiektowi, w którym wykonywano pomiary laboratoryjne.



## 6.1 Model fali emisji akustycznej przyjęty w symulacjach numerycznych

W celu określenia rozkładu czasoprzestrzennego ciśnienia akustycznego w rozpatrywanym obiekcie, którym był model kadzi wypełnionej olejem elektroizolacyjnym, przeprowadzono symulacje numeryczne typu transient (zależność czasowa) z wykorzystaniem środowiska programistycznego COMSOL Multiphysics.

W obliczeniach polowych w środowisku COMSOL Multiphysics, wykorzystywana jest metoda MES. Badany obiekt dzielony jest na skończoną liczbę elementów o zadanej wielkości  $\Delta x$ , które tworzą tzw. siatkę. Proces ten nazywa się dyskretyzacją. Metoda MES pozwala na aproksymowanie zmiennej zależnej<sup>1</sup> funkcją opisaną pewną liczbą parametrów nazywanych poziomami swobody  $\mathbf{U}$  w każdym z elementów siatki. Dla każdego z węzłów  $x_i$  w siatce istnieje jeden poziom swobody  $U_i = p(x_i)$  oraz wielomianowa funkcja bazowa<sup>2</sup>  $\varphi_i(x)$ . Wówczas zbiór funkcji  $p(x)$ , który tworzy przestrzeń funkcji nazywaną *przestrzenią elementów skończonych* można wyrazić zależnością (6.1) [131].

$$p(x) = \sum_i U_i \varphi_i(x) \quad (6.1)$$

Wektor  $\mathbf{U}$  zawierający składowe  $U_i$  stanowi rozwiązanie tj. poszukiwany wynik obliczeń.

Analizując zagadnienia falowe należy przestrzegać zasady, że długość fali powinna być większa niż wielkość poszczególnych elementów  $\Delta x$  [74, 131–134]. W przeciwnym przypadku nastąpi zjawisko dyspersji energii fali w siatce powodujące błąd obliczeniowy. Dlatego powinna być spełniona zależność (6.2) [64].

Ponieważ rozmiar siatki jest kluczowym parametrem, który może wpłynąć na poprawność uzyskiwanych wyników obliczeń numerycznych, przeprowadzono symulacje, których celem było określenie wpływu wielkości elementu siatki na otrzymywane rezultaty. Szczegóły wykonanych symulacji opisano w rozdz. 6.2 niniejszej rozprawy.

---

<sup>1</sup>W analizowanych przypadkach zmienną zależną jest ciśnienie akustyczne  $p$ .

<sup>2</sup>W rozpatrywanych przypadkach zastosowano funkcję bazową drugiego rzędu.

$$\Delta x_{max} < \frac{\lambda}{N} = \frac{c_s}{Nf} \quad (6.2)$$

gdzie:  $\Delta x_{max}$  - maksymalna wielkość pojedynczego elementu siatki,

$\lambda$  - długość fali akustycznej,

$c_s$  - prędkość rozchodzenia się fali akustycznej,

$f$  - częstotliwość fali akustycznej,

$N$  - liczba elementów  $\Delta x$  przypadających na jedną długość fali.

Układ zależności (6.3-6.5) [132] przedstawia współczynnikową postać równań linearyzowanych i rozwiązywanych numerycznie dla każdego elementu siatki oraz dla każdego kroku czasowego w środowisku COMSOL. W układzie tym zawarte jest równanie falowe (6.3) i warunki brzegowe Robina (6.4) oraz Dirichleta (6.5). Wartości współczynników opisane są w tab. 6.1.

$$e_a \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} + d_a \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot (-c \nabla p - \alpha p + \gamma) + \beta \cdot \nabla p + \alpha p = Q \quad (6.3)$$

$$\mathbf{n} \cdot (c \nabla p + \alpha p - \gamma) + q p = g \quad (6.4)$$

$$p = r \quad (6.5)$$

Wartości współczynników w równaniu falowym (6.3) określają parametry ośrodka propagacji. Natomiast wartości współczynników w równaniach (6.4) i (6.5) charakteryzują warunki brzegowe [132].

*Warunek Neumanna*, wyrażony zależnością (6.6) oznacza, że składowa normalna prędkości zanika na brzegu ośrodka propagacji [131, 132].

$$\mathbf{n} \cdot \left( \frac{1}{\rho} (\nabla p - \mathbf{q}) \right) = 0 \quad (6.6)$$

gdzie:  $\mathbf{n}$  - wektor normalny ukierunkowany przeciwnie w stosunku do ośrodka,

$\rho$  - gęstość ośrodka propagacji,

$p$  - ciśnienie akustyczne,

$\mathbf{q}$  - wektor źródła dipolowego na brzegu ośrodka propagacji.

W przypadku, gdy gęstość ośrodka  $\rho$  nie zmienia się i gdy nie ma źródła dipolowego  $\mathbf{q}$  wówczas pochodna normalna ciśnienia zanika (6.7) [131, 132].

Tablica 6.1: Wartości współczynniki w równaniach (6.3-6.5) [132]

Współczynnik	Opis
$p$	Zmienna zależna, ciśnienie akustyczne
$t$	Czas
$e_a$	Współczynnik masy
$d_a$	Współczynnik tłumienia
$c\nabla p$	Składnik przepływu dyfuzyjnego w ośrodku propagacji
$\alpha p$	Składnik zachowania przepływu konwekcyjnego w ośrodku propagacji
$\gamma$	Składnik zachowania przepływu w ośrodku propagacji stanowiącym źródło fal EA
$\beta \cdot \nabla p$	Składnik konwekcji w ośrodku propagacji
$ap$	Składnik absorpcji w ośrodku propagacji
$Q$	Funkcja źródła w ośrodku propagacji
$qp$	Współczynnik absorpcji na brzegu ośrodka propagacji
$g$	Wyraz źródła fal EA na brzegu ośrodka propagacji
$\mathbf{n}$	Wektor normalny ukierunkowany przeciwnie w stosunku do ośrodka propagacji
$r$	Wartość warunku brzegowego Dirichleta

$$\frac{\partial p}{\partial n} = 0 \quad (6.7)$$

*Warunek Dirichleta* umożliwia zdefiniowanie wartości ciśnienia akustycznego na brzegu ośrodka propagacji  $r$  jako stałej bądź też jako dowolnej funkcji, np. zmiennej w czasie [131, 132].

*Warunek Robina* wyrażony jest równaniem (6.8) [131, 132].

$$\mathbf{n} \cdot \left( \frac{1}{\rho_0} (\nabla p - \mathbf{q}) \right) + \frac{1}{Z} \frac{\partial p}{\partial t} = 0 \quad (6.8)$$

gdzie:  $\rho_0$  - stała gęstość w stanie równowagi.

W wyrażeniu (6.8) uwzględniona jest impedancja akustyczna  $Z^3$  na granicy ośrodka, której wartość można wyznaczyć z równania (6.9) [135].

$$Z = \frac{p}{c_s} \quad (6.9)$$

gdzie:  $c_s$  - prędkość rozchodzenia się fali akustycznej,

$p$  - ciśnienie akustyczne.

<sup>3</sup>Impedancja akustyczna nazywana jest także akustyczną opornością falową

Jeżeli założyć się, że przesunięcie fazowe między ciśnieniem, a prędkością fali EA wynosi zero, jak w przypadku fali płaskiej, to spełniona jest zależność (6.9) [135].

$$Z = Z_0 = \rho_0 c_s \quad (6.10)$$

gdzie:  $Z_0$  - oporność właściwa, czyli impedancja charakterystyczna ośrodka.

Na graniczących ze sobą brzegach dwóch ośrodków konieczne jest spełnienie *Warunku Ciągłości*, który można wyrazić za pomocą równania (6.11) [131, 132].

$$\mathbf{n} \cdot \left( \frac{1}{\rho_0} (\nabla p - \mathbf{q}) \right)_1 - \left( -\frac{1}{\rho_0} (\nabla p - \mathbf{q}) \right)_2 = 0 \quad (6.11)$$

gdzie: indeksy dolne 1 i 2 oznaczają odpowiednio pierwszy i drugi ośrodek.

W środowisku COMSOL istnieje możliwość zamodelowania jedno lub dwuwymiarowych obiektów posiadających symetrię osiową. Warunek brzegowy *symetrii osiowej* zakłada następujące wartości współczynników w równaniach (6.4) i (6.5):  $q, g, r = 0$ . Zastosowane narzędzie programistyczne umożliwia dodatkowo zdefiniowanie jeszcze dwóch warunków, które nie zostały wykorzystane w symulacjach przeprowadzonych w ramach realizacji niniejszej rozprawy. Umożliwiają one zdefiniowanie zewnętrznego źródła fal EA na brzegu ośrodka propagacji. Pierwszy stosowany jest gdy symulacja uwzględnia zagadnienia mechaniki (np. symulacja łączna zjawisk akustycznych oraz mechanicznych). Drugi zezwala na zdefiniowanie promieniowania fali akustycznej na brzegu ośrodka propagacji [132].

W przyjętym i rozpatrywanym w niniejszej rozprawie modelu numerycznym nie uwzględniono żadnych, poza akustycznymi, zjawisk fizycznych, nie uwzględniono tłumienia fali wynikającej z lepkości. Ponadto założono, że ośrodkiem propagacji jest ciecz idealna, czyli o stałych wartościach temperatury, gęstości i prędkości rozchodzenia się fali EA. Jeżeli w równaniu (6.3) nie uwzględni się współczynników odpowiadających zjawiskom fizycznym, których nie analizowano w badaniach, to równanie ruchu fali EA rozwiązywanej numerycznie w przeprowadzonych symulacjach przybiera postać zależności (6.12).

$$\frac{1}{\rho_0 c_s^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} + \nabla \cdot \left( \frac{-1}{\rho_0} \nabla p \right) = 0 \quad (6.12)$$

We wszystkich symulacjach wykorzystano automatyczne ustawienia zdefiniowane w module *Acoustic Module* w środowisku COMSOL. Dla potrzeb wykonywanych symulacji zostały dobrane następujące parametry i metody:

- zastosowano elementy Lagrange drugiego rzędu<sup>4</sup>,
- w celu określenia zależności czasowych w stanie nieustalonym wybrano analizę typu transient,
- w celu określenia odpowiednich kroków czasowych wybrano opcję "time dependent solver",
- do obliczeń układu równań liniowych wybrano metodę GMRS (ang. Generalized Minimum Residual Method) i metodę Incomplete LU, dzięki którym możliwe było zoptymalizowanie czasu trwania symulacji dla dużej liczby stopni swobody DoF (ang. Degrees of Freedom) [132],
- wartość tolerancji relatywnej zdefiniowano na poziomie  $1e^{-6}$ ,
- wartość tolerancji absolutnej zdefiniowano na poziomie  $1e^{-7}$ .

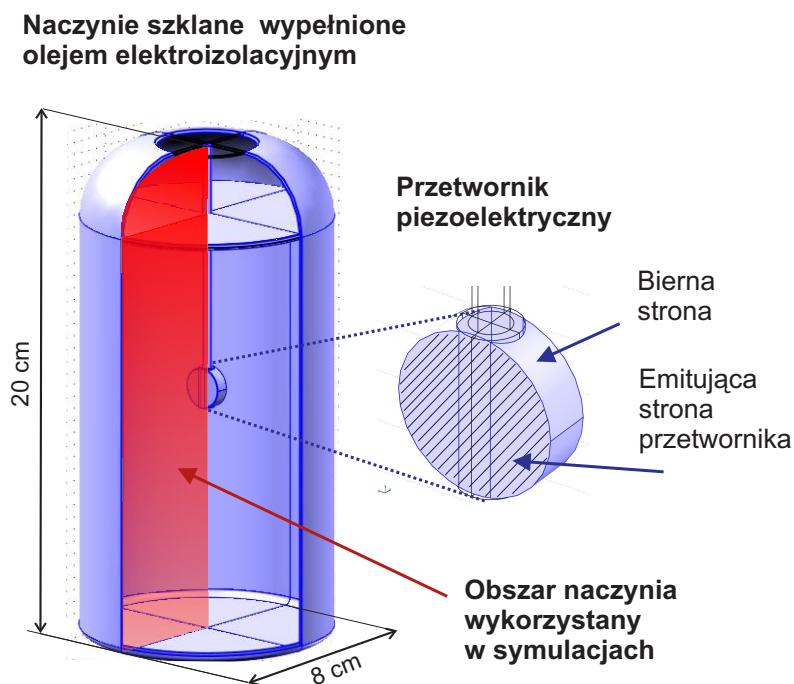
## 6.2 Wpływ wielkości elementu siatki na wyniki obliczeń

W celu określenia wpływu wielkości siatki na wyniki obliczeń, wykonano cztery symulacje, każda dla 150 okresów fali sinusoidalnej. Obiekt badań (6.1) stanowiło szklane naczynie o wymiarach 20 x 8 cm, które wypełnione było olejem elektroizolacyjnym.

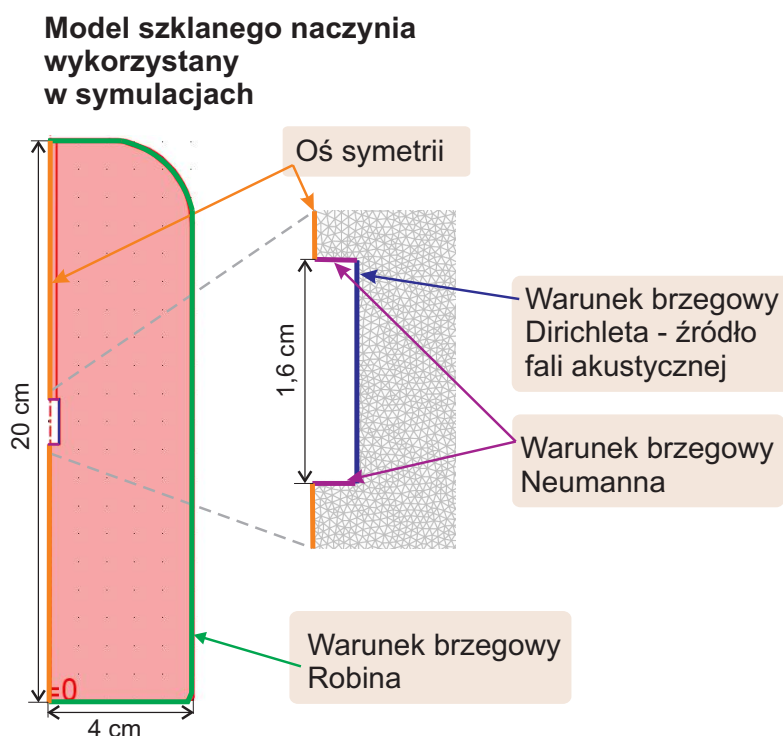
Obliczenia wykonano dla dwuwymiarowego fragmentu naczynia, które przedstawiono na rys. 6.2. Szczegóły symulacji, która dotyczy rozkładu ciśnienia akustycznego dla stanu ustalonego opisano szczegółowo w pracy [129].

---

<sup>4</sup>Rozpatrywane równanie fali zawiera drugą pochodną ciśnienia po czasie, dlatego do obliczeń numerycznych zastosowano elementy Lagrange drugiego rzędu



Rysunek 6.1: Trójwymiarowy model naczynia szklanego wypełnionego olejem elektroizolacyjnym z zaznaczonym obszarem wykorzystanym w symulacjach



Rysunek 6.2: Dwuwymiarowy model naczynia szklanego z zaznaczonymi warunkami brzegowymi, które zastosowano w symulacjach

Symulacje przeprowadzono na obiekcie o stosunkowo małych wymiarach geometrycznych w porównaniu z wymiarami rozpatrywanej kadzi. Dlatego możliwe

było wykonanie obliczeń dla czterech przypadków, w których analizowano różne wielkości pojedynczego elementu siatki w relatywnie krótkim okresie czasu (około doby dla symulacji o największej liczbie elementów). Wykonanie podobnej analizy dla dwuwymiarowego modelu kadzi byłoby niemożliwe ze względu na ograniczenia sprzętowe.

Badany obiekt został przetransformowany w procesie dyskretyzacji w siatkę tak, aby największa wielkość pojedynczego elementu  $\Delta x$  nie przekraczała zadanej wartości. Rozpatrzono cztery przypadki, które odpowiadają kolejno dwudziestu, dziesięciu, pięciu i dwóm elementom siatki na jedną długość fali:

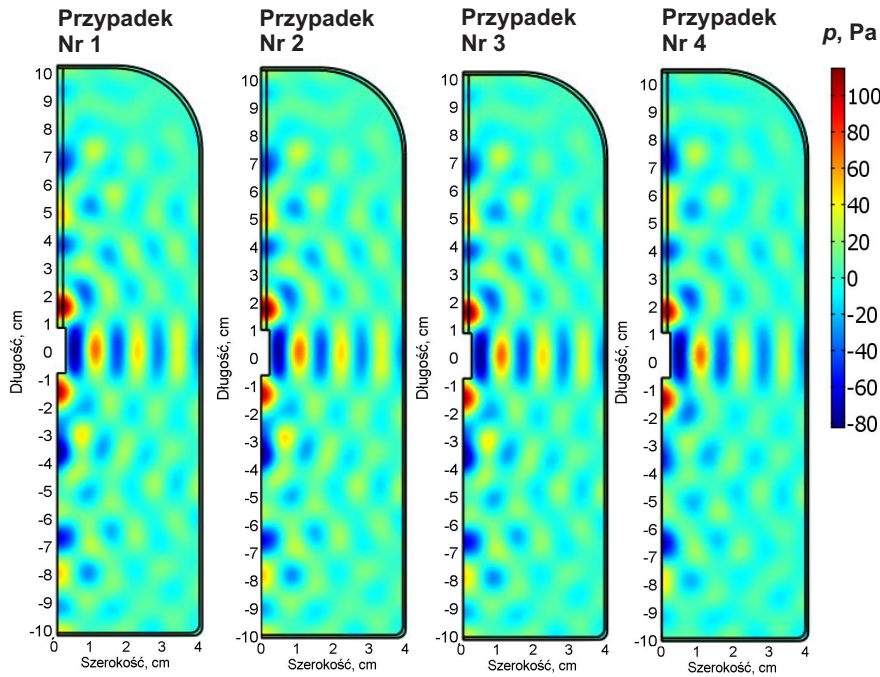
1.  $\Delta x \leq 0,695$  mm,  $N=20$ , DoF=174264 (przypadek referencyjny)
2.  $\Delta x \leq 1,390$  mm,  $N=10$ , DoF=44384
3.  $\Delta x \leq 2,780$  mm,  $N=5$ , DoF=12708
4.  $\Delta x \leq 6,610$  mm,  $N=2$ , DoF=6701

gdzie: DoF - liczba stopni swobody

$N$  - liczba elementów  $\Delta x$  przypadających na jedną długość fali.

Na rys. 6.3 przedstawiono rozkłady ciśnienia akustycznego w analizowanym obiekcie w chwili  $t = 15$  ms, dla wszystkich czterech wymienionych wyżej przypadków. Analizując rozkłady przedstawione na rys. 6.3 można stwierdzić, że dla badanych przypadków otrzymano takie same rozkłady.

Dla rozpatrywanych przypadków obliczono wartość błędu aproksymacji wartości ciśnienia akustycznego (6.13)  $\Delta \mathbf{p}_x$  dla 40 000 punktów symulacyjnych, równomiernie rozłożonych w analizowanym obiekcie. Przyjęto, że wyniki symulacji uzyskane dla przypadku nr 1, w której uwzględniono dwadzieścia elementów siatki na jeden okres fali, stanowią wartości referencyjne  $\mathbf{p}_{\text{ref}}$  [136].



Rysunek 6.3: Zestawienie porównawcze wykresów obrazujących rozkład przestrzenny ciśnienia akustycznego w chwili  $t = 15$  ms liczonej od początku symulacji

$$\Delta \mathbf{p}_x = \left| \frac{\mathbf{p}_{\text{ref}} - \mathbf{p}_x}{\mathbf{p}_{\text{ref}}} \right| * 100\% \quad (6.13)$$

gdzie:  $\Delta \mathbf{p}_x$  - wektor błędu aproksymacji,

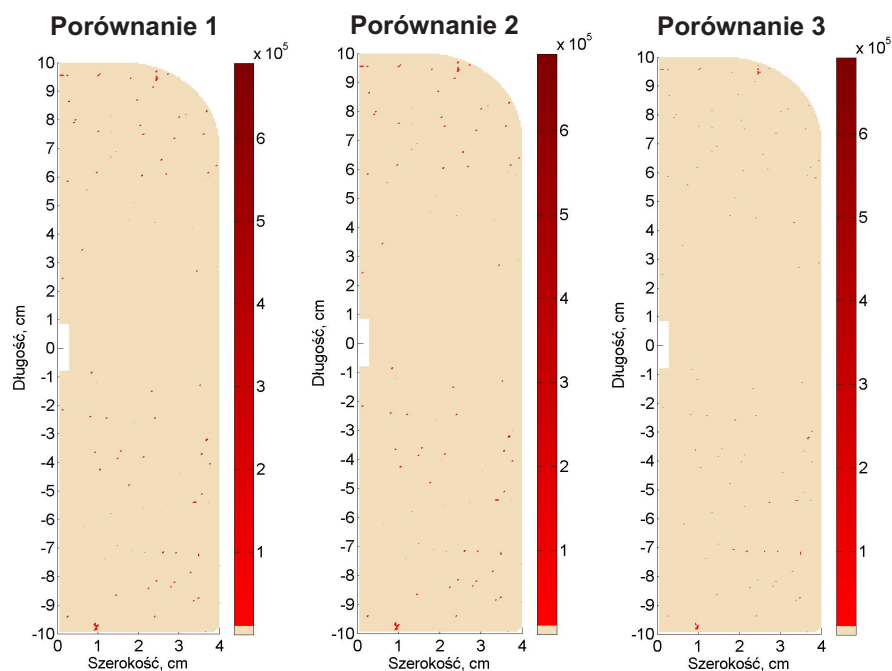
$\mathbf{p}_{\text{ref}}$  - wektor wartości obliczonych dla przypadku nr 1, wartości referencyjne,

$\mathbf{p}_x$  - wektor wartości obliczonych dla przypadków nr 2 - 4.

Na rys. 6.4 przedstawiono wykresy obrazujące wartości błędu aproksymacji obliczonego w 40 000 punktów symulacyjnych, równomiernie rozłożonych w obiekcie. Generalnie we wszystkich trzech przypadkach, błąd występuje tylko w pojedynczych punktach symulacyjnych. Z rys. 6.4 wynika także, że błąd występuje w tych samych punktach symulacyjnych, jednakże wraz z malejącą liczbą elementów siatki wzrasta jego wartość.

W tab. 6.2 zestawiono porównawcze wartości błędu aproksymacji względem wartości referencyjnej obliczone dla 40 000 punktów symulacyjnych, równomiernie rozłożonych w obiekcie, dla przypadków nr 2 - 4 (przypadek nr 1 jest przypadkiem referencyjnym).





Rysunek 6.4: Zestawienie porównawcze wykresów obrazujących rozkład przestrzenny i wielkość błędów aproksymacji obliczonych dla przypadków 2-4 (przypadek 1 stanowi wartość referencyjną).

Tablica 6.2: Zestawienie porównawcze wielkości błędu aproksymacji względem wartości referencyjnej obliczone dla 40 000 punktów, równomiernie rozłożonych w obiekcie, dla rozpatrywanych przypadków

$\Delta p_x$	Porównanie 3	Porównanie 2	Porównanie 1
	$\Delta p_x$ dla przypadku nr 2	$\Delta p_x$ dla przypadku nr 3	$\Delta p_x$ dla przypadku nr 4
wartość maksymalna	48 318	161 680	69 145
wartość minimalna	$4,65 \times 10^{-5}$	$2,3 \times 10^{-3}$	$4,75 \times 10^{-4}$
średnia arytmetyczna	19,1	57,6	295,2
odchylenie standardowe	295,7	1 179,1	5 204,1

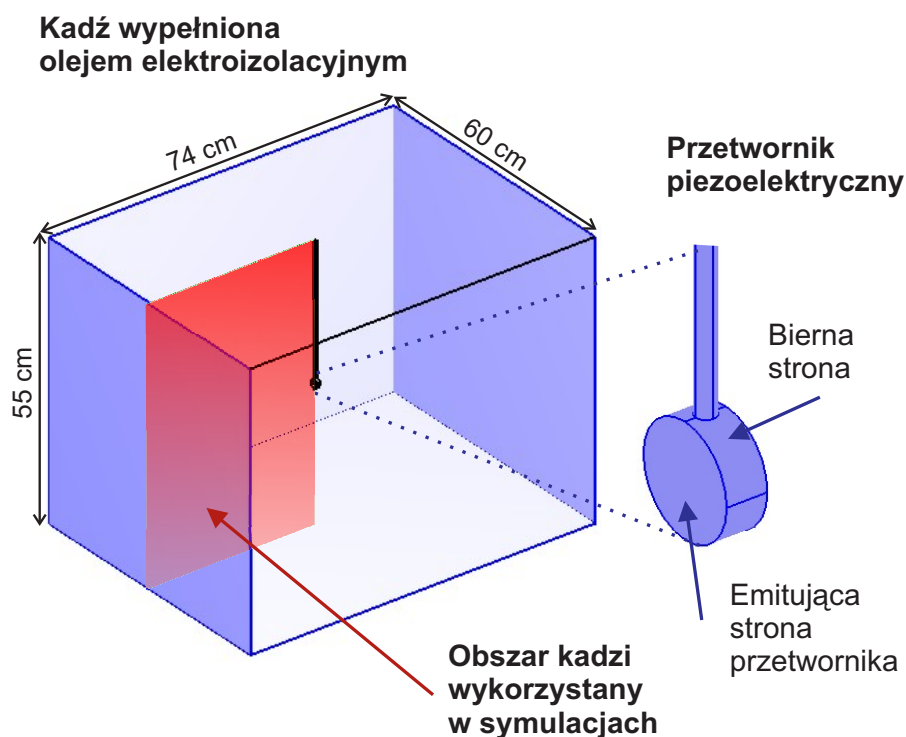
Wyznaczone wartości średnich arytmetycznych, obliczone dla 40 000 wartości błędów aproksymacji (w 40 000 punktach symulacyjnych), wskazują na wzrost wartości średniej wraz z malejącą liczbą elementów siatki. Wartości maksymalna i minimalna są większe w przypadku nr 3 niż w przypadku nr 4, aczkolwiek wartości średniej arytmetycznej i odchylenia standardowego wskazują, że zwiększenie liczby

elementów siatki powoduje zmniejszenie błędu aproksymacji.

Na podstawie przeprowadzonych analiz dotyczących oceny wpływu rozmiaru siatki dyskretyzującej na wielkość błędu aproksymacji, można stwierdzić, że przy podziale obiektu na elementy o wielkości nie przekraczającej 2,78 mm otrzymuje się optymalny wynik obliczeń dla stanu ustalonego. Należy podkreślić, że kształt i rozmiary obiektu nie mają istotnego wpływu na wyniki przeprowadzonej analizy, dlatego rezultaty uzyskane dla szklanego naczynia można zastosować dla dowolnie dużego modelu, czyli również dla rozpatrywanego modelu kadzi. Ze względu na to, że analizowane były jedynie obiekty wypukłe, o jednorodnej strukturze ośrodka, stąd nie należy uogólniać otrzymanych wyników symulacji dla złożonych i niejednorodnych obiektów.

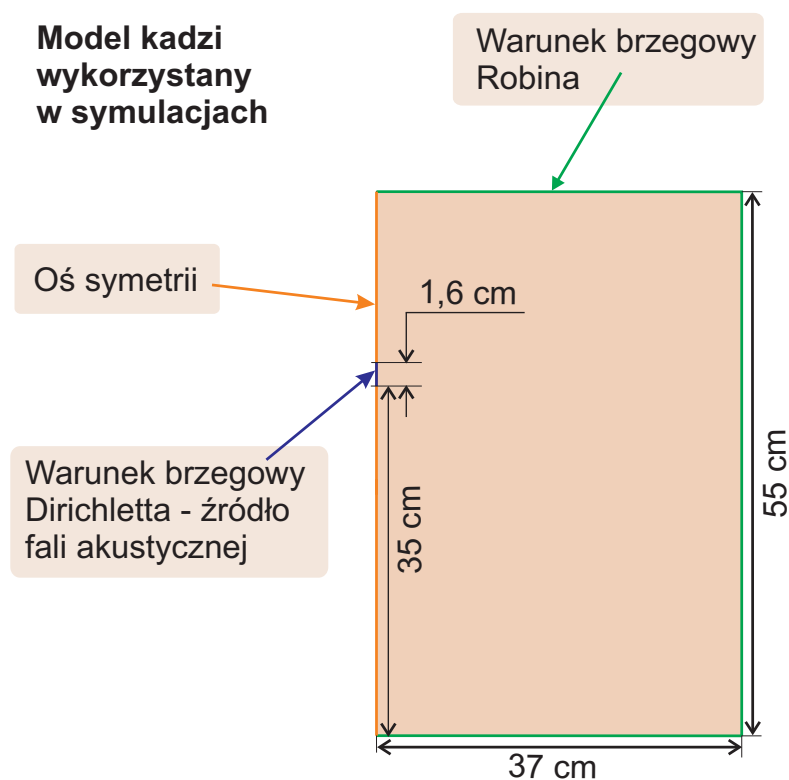
### 6.3 Model numeryczny kadzi

W celu określenia rozkładu ciśnienia akustycznego w modelu kadzi, zamodelowano obiekt, który przedstawiono na rys. 6.5.



Rysunek 6.5: Trójwymiarowy model kadzi z zaznaczonym obszarem wykorzystanym w symulacjach

Wymiary zamodelowanego obiektu, 55 cm x 60 cm x 74 cm, odpowiadają wymiarom rzeczywistej kadzi zastosowanej do badań eksperymentalnych (granica tolerancji  $\pm 1$  cm), którą opisano w rozdz. 7 oraz pokazano na rys. 7.5. Podzielenie trójwymiarowego modelu kadzi na liczbę elementów jak w przypadku nr 3 rozdz. 6.2 wiązałoby się z koniecznością rozwiązania tak znacznej liczby równań, która niemożliwa byłaby do obliczenia na sprzęcie komputerowym dostępnym dla autora rozprawy<sup>5</sup>. Dlatego wykorzystano istniejącą symetrię obiektu oraz uproszczono model do dwóch wymiarów. Otrzymany model zaznaczono czerwoną płaszczyzną na rys. 6.5. Natomiast model wraz z warunkami brzegowymi zaprezentowano na rys. 6.6.



Rysunek 6.6: Dwuwymiarowy model kadzi, który zastosowano w symulacjach numerycznych

Kadź wypełniono olejem elektroizolacyjnym o stałej gęstości  $\rho = 890 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$  i stałej prędkości rozchodzenia się fali dźwiękowej  $c_s = 1390 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ . Podane wartości przyjęto na podstawie doniesień literaturowych [8].

<sup>5</sup>zastosowano komputer klasy PC z procesorem Intel Core2Quad 8200 @2,33 GHz oraz 4GB RAM

Źródło fal EA, czyli odcinek lewej ściany o długości<sup>6</sup> 16 mm, które zlokalizowane było na wysokości 37 cm, emitowało sygnał sinusoidalny o zadanej amplitudzie i częstotliwości. W modelu zastosowano warunek Dirichleta wyrażony równaniem (6.14).

$$p = A \sin(2\pi ft) \quad (6.14)$$

gdzie:  $p$  [Pa] - ciśnienie akustyczne,

$f = 100$  kHz - częstotliwość generowanej fali EA,

$\lambda = 13,9$  mm - długość emitowanej fali EA,

$A = 1e^3 \frac{m}{s}$ , amplituda emitowanej fali EA.

Symulacje przeprowadzono dla następujących warunków początkowych:

$$p(t_0) = 0 \quad \text{oraz} \quad \frac{\partial p}{\partial t}(t_0) = 0$$

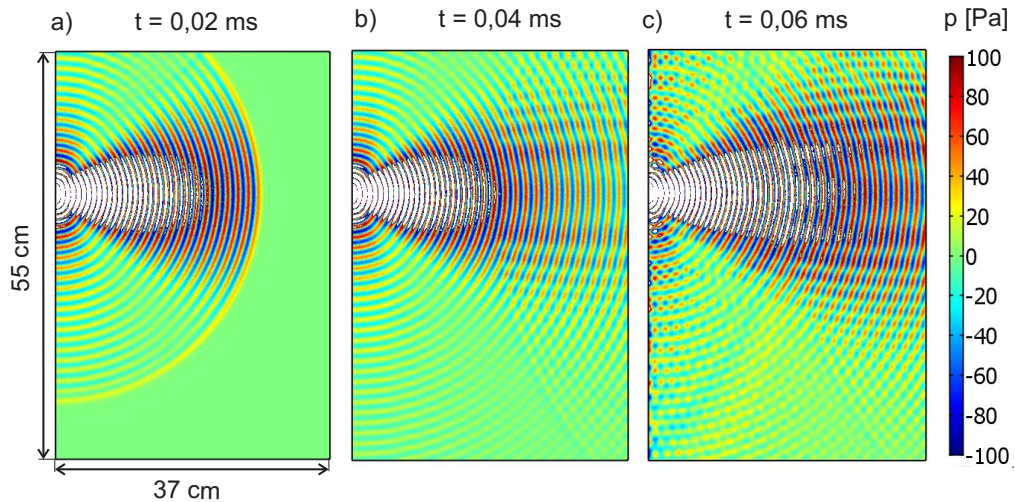
Obiekt podzielono na elementy o wielkości nie przekraczającej 2,78 mm, co związane jest z liczbą stopni swobody równą 22 919. Na ścianach kadzi przyjęto warunek Robina, zakładający wartość impedancji falowej  $Z = 123,7e^4 \frac{kg}{m^2s}$ .

Na rys. 6.7 zaprezentowano rozkład ciśnienia akustycznego w stanie nieustalonym: po upływie odpowiedni 0,02 ms (a) i 0,04 ms (b), co odpowiada 20 i 40 okresom fali EA. Natomiast na rys. 6.7c przedstawiono rozkład ciśnienia akustycznego w stanie ustalonym po upływie 0,06 ms (60 okresów fali EA). Na rys. 6.7a i 6.7b widoczne są grzbiety fal EA generowanych przez źródło i fal odbitych od ścian kadzi. Należy zwrócić uwagę, że założony model uwzględniał oś symetrii, a więc na rys. 6.7c widoczne są również fale EA dochodzące z tej części kadzi, jaka jest niewidoczna na rys. 6.6, a która stanowi symetryczne odbicie dwuwymiarowego modelu.

W celu ułatwienia jednoznacznej oceny wyników obliczeń, na rys. 6.7 zastosowano próg odcinający wartości amplitud, które go przekraczają. Fala ciśnienia akustycznego osiąga największą amplitudę w pobliżu źródła, dla większych odległości następuje gwałtowne tłumienie fali.

---

<sup>6</sup>Wartość 16 mm odpowiada średnicy przetwornika piezoelektrycznego zastosowanego w eksperymentach do generacji fal EA.



Rysunek 6.7: Rozkład ciśnienia akustycznego dla badanego modelu kadzi wypełnionej olejem w kolejnych chwilach czasowych: a) 0,02 ms, b) 0,04 ms, c) 0,06 ms liczonych od początku symulacji

Zależność amplitudy obliczonego ciśnienia akustycznego od odległości do źródła generacji fal EA przedstawiono na rys. 9.1 w rozdz. 9.

## 6.4 Symulacja fal emisji akustycznej generowanej przez kilka źródeł jednocześnie

W symulacji założono pięć punktowych źródeł fal EA równomiernie rozmieszczonych na odcinku 16 mm w miejscu, w którym znajdowało się jedno podłużne źródło fal EA na rys. 6.6. Sygnał rejestrowany w polu dalekim<sup>7</sup>, czyli w odległości większej niż 36,83 mm od źródła, odpowiada zinterferowanej fali EA, którą można określić zależnością (5.37). Dla wszystkich pięciu źródeł przyjęto jednakową amplitudę emitowanej fali EA:  $A_i = 100e^3 \frac{m}{s}$ , dla  $i = \langle 1, 2, \dots, 5 \rangle$  i taką samą wartość parametru  $\mu_i = 0$  s, dla  $i = \langle 1, 2, \dots, 5 \rangle$ . Natomiast wartości częstotliwości, które przedstawiono w tab. 6.3 zostały przyjęte na podstawie wyników zaprezentowanych w pracach [3, 5].

Na rys. 6.8 zilustrowano rezultaty przeprowadzonych symulacji numerycznych obrazujące rozkłady ciśnienia akustycznego w badanym obiekcie, jakie zostały

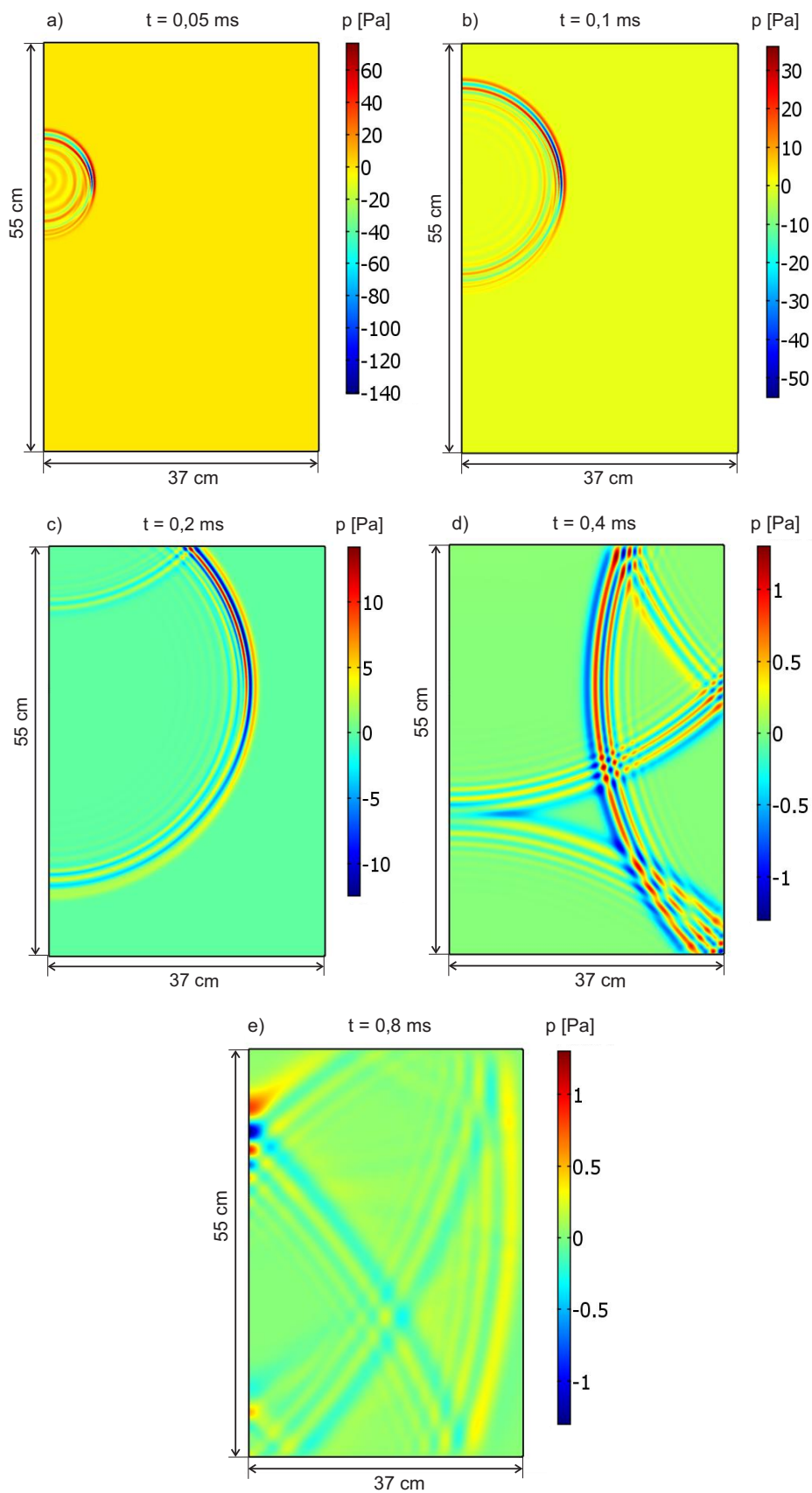
<sup>7</sup>Granice między polem bliskim, a dalekim można określić wykorzystując zależność Fraunhofera:  $d = \frac{2l^2}{\lambda}$ , gdzie:  $l$  – średnica przetwornika generującego falę EA,  $\lambda$  – długość emitowanej fali EA. [137]

Tablica 6.3: Wartości częstotliwości poszczególnych składowych sygnałów EA generowanej przez pięć oddzielnych źródeł

	Generowane częstotliwości $f_i$				
	$f_1$	$f_2$	$f_3$	$f_4$	$f_5$
Jednostka	[kHz]	[kHz]	[kHz]	[kHz]	[kHz]
Wartość	100	150	200	250	300

obliczone dla kolejnych chwil czasowych. Wykresy 6.8a-6.8e przedstawiają rozkłady ciśnienia akustycznego w modelu kadzi po upływie kolejno: 0,05 ms, 0,1 ms, 0,2 ms, 0,4 ms i 0,8 ms (jeden okres fali odpowiada  $T=0,01$  ms). Na wykresach 6.8a-6.8c można zauważyć, że fale wygenerowane w poszczególnych źródłach interferują w jedną falę EA, która rozchodzi się w obiekcie w postaci fali sferycznej. Wartość ciśnienia maleje wraz ze wzrostem odległości. Na wykresie 6.8d przedstawiono fale odbite od poszczególnych ścian kadzi. Natomiast wykres 6.8e ilustruje rozkład ciśnienia akustycznego po upływie  $t = 0,8$  ms liczonym od chwili wygenerowania fal EA. Widoczne są wielokrotnie odbite i zinterferowane fale o stosunkowo małej amplitudzie.

Należy zwrócić uwagę, że omawiana symulacja nie uwzględnia fal poprzecznych powstających na stalowej obudowie. Jednak w ramach badań diagnostycznych wykonywanych metodą akustyczną nie mierzy się ciśnienia akustycznego wewnątrz transformatora, ale na powierzchni kadzi. Dlatego optymalny model numeryczny powinien uwzględniać także oddziaływania mechaniczne powstające na powierzchni kadzi. Jednak w takim przypadku model bardzo się komplikuje i staje się niemożliwym do rozwiązania przy wykorzystaniu standardowego zestawu komputerowego. Rozwiązanie tego problemu wykracza poza zakres zadań realizowanych w ramach niniejszej pracy doktorskiej i stanowiąc problem otwarty będzie w przyszłości rozważany przez autora rozprawy.



Rysunek 6.8: Rozkład ciśnienia akustycznego w dwuwymiarowym modelu kadzi wypełnionej olejem elektroizolacyjnym w kolejnych chwilach czasowych: a)  $t=0,05$  ms, b)  $t=0,1$  ms, c)  $t=0,2$  ms, d)  $t=0,4$  ms, e)  $t=0,8$  ms liczonych od początku symulacji

## Rozdział 7

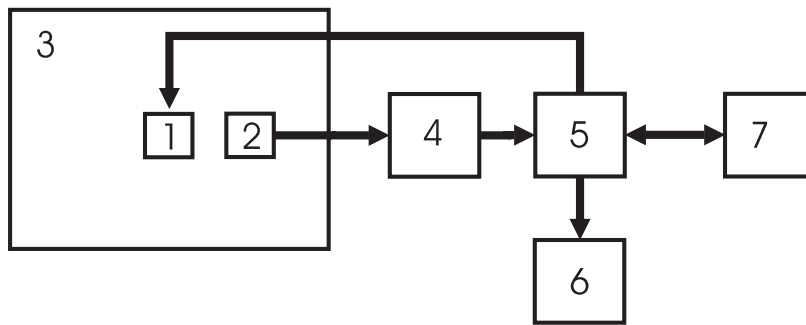
---

# Charakterystyka układu pomiarowego wykorzystanego w badaniach eksperymentalnych

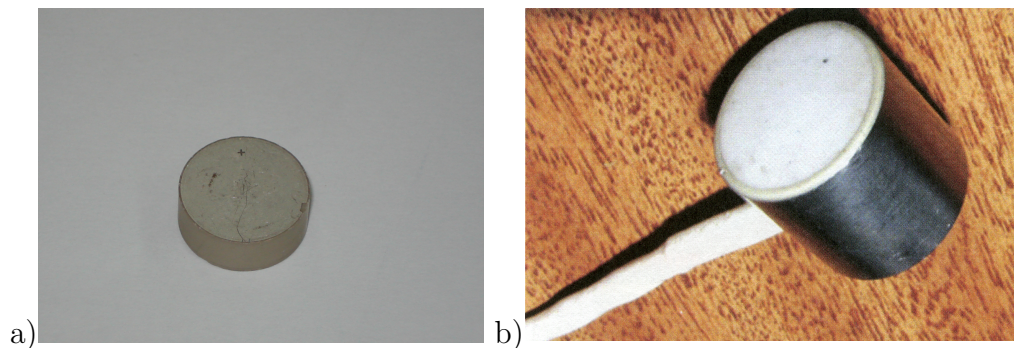
---

Schemat układu zestawionego do generacji, pomiaru i analizy sygnałów EA przedstawiono na rys. 7.1. Do generacji fal EA zastosowano przetwornik piezoelektryczny szerokopasmowy typu PIC155 firmy PI Ceramic [138], wykorzystując odwrotny efekt piezoelektryczny. Ponieważ producent przetwornika PIC155 nie udostępnia jego charakterystyki widma amplitudowego, autor rozprawy wyznaczył jego częstotliwości rezonansowe wykorzystując metodę figur Lissajous [136, 139]. Szczegółowe informacje dotyczące zastosowanego przetwornika PIC155 przedstawiono w dokumentacji [140]. Do pomiaru generowanych fal EA zastosowano dwa typy przetworników: przetwornik typu PIC155 (z wykorzystaniem bezpośredniego efektu piezoelektrycznego) i przetwornik piezoelektryczny szerokopasmowy serii WD typ AH17 firmy PAC (Physical Acoustic Corporation) [141], standardowo wykorzystywany do pomiarów diagnostycznych [5]. Typowy przebieg charakterystyki przenoszenia przetwornika WD typu AH17 przedstawiono na rys. 7.3. Natomiast przetwornik PIC155 zastosowano jako odbiornik w celach porównawczych. Fotografie wykorzystanych przetworników przedstawiono na rys. 7.2.

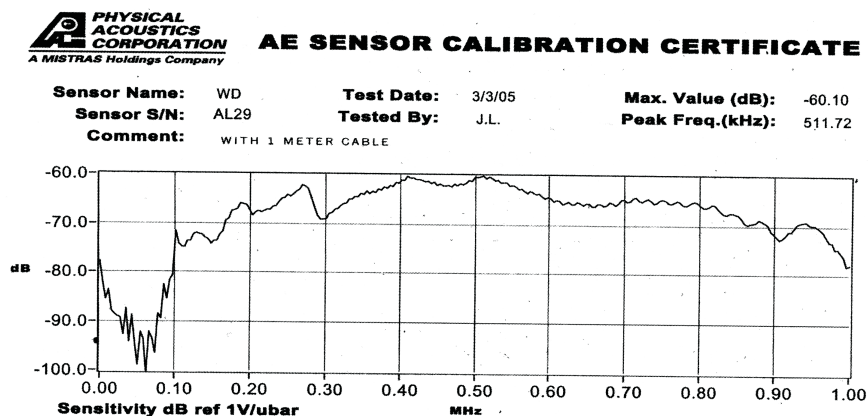




Rysunek 7.1: Schemat układu do generacji, pomiaru i analizy sygnałów EA. 1-przetwornik generujący, 2-przetwornik pomiarowy, 3-kadź wypełniona olejem elektroizolacyjnym, 4-wzmacniacz, 5-karta pomiarowa, 6-oscyloskop, 7-komputer PC



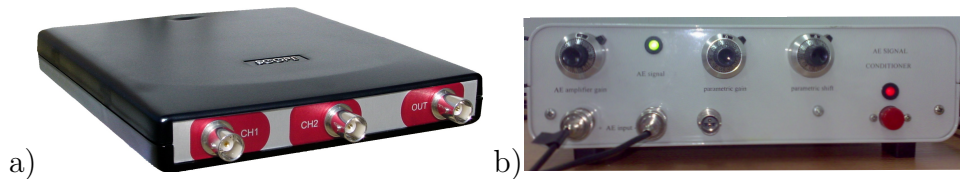
Rysunek 7.2: Widok ogólny przetworników piezoelektrycznych wykorzystanych w badaniach: a) przetwornik piezoelektryczny typ PIC 155, b) przetwornik piezoelektryczny serii WD typ AH17



Rysunek 7.3: Przykładowa charakterystyka przenoszenia przetwornika piezoelektrycznego serii WD typ AH17 firmy PAC

Sygnały EA mierzone przetwornikami piezoelektrycznymi były przekazywane do układu różnicowego wzmacniacza pomiarowego AE SIGNAL CONDITIONER

(AESC) firmy EA Systems [142]. Widok płyty czołowej zastosowanego wzmacniacza przedstawiono na rys. 7.4b. Wzmocnienie AESC było stałe i wynosiło 40 dB. Całkowite pasmo przenoszenia wzmacniacza mieści się w zakresie od 0 Hz do 1,5 MHz. Zastosowane urządzenie wykorzystywane jest podczas pomiarów diagnostycznych układów izolacyjnych transformatorów elektroenergetycznych wykonywanych przy użyciu metody EA [5].



Rysunek 7.4: Widok urządzeń pomiarowych wykorzystanych w badaniach: a) oscyloskop cyfrowy Handyscope HS3, b) wzmacniacz

W ramach wykonywanych prac podjęto próbę zaprojektowania i praktycznego zbudowania urządzenia, za pomocą którego można by było generować falę EA o dowolnym kształcie i amplitudzie w zakresie częstotliwości od 1 kHz do 1 MHz. Zaprojektowane w tym celu przez autora urządzenie zostało opisane w pracy [143]. Parametry wykonanego urządzenia nie spełniły jednak wymagań autora dotyczących jakości generowanego sygnału. Dlatego w badaniach eksperymentalnych wykorzystano urządzenie firmy TiePie engineering [144]. Jest to oscyloskop cyfrowy typ Hanyscope HS3 [145] (rys. 7.4a). Urządzenie HS3 umożliwia pomiar napięcia w dwóch kanałach, z prędkością do 10 MS/s. Natomiast trzeci kanał był wykorzystywany do generacji sygnału napięciowego o dowolnym kształcie z prędkością do 50 MS/s. Sygnał napięciowy może być dowolnie definiowany za pomocą komputera klasy PC, np. w środowisku MATLAB. W ramach wykonanych badań zaimplementowano odpowiednie procedury, za pomocą których można było sterować wszystkimi dostępnymi funkcjami urządzenia HS3. Między innymi zaimplementowano procedury do transferu danych między komputerem a generatorem, a także sterujące generacją i rejestracją sygnałów EA mierzonych w dwóch kanałach pomiarowych. Rejestrowane sygnały były zapamiętywane w pamięci komputera w celu późniejszej analizy. Transfer danych odbywał się za pomocą przewodu USB.

Podczas wszystkich pomiarów rejestrowano zarówno sygnały podawane na przetwornik generujący jak i sygnały EA, które mierzone były przez przetwornik pomiarowy. Zostało to zrealizowane za pomocą bezpośredniej transmisji sygnałów wyjściowych z urządzenia HS3, przekazywanych na przetwornik generujący, na jeden z kanałów oscyloskopu. Natomiast sygnały EA rejestrowane przez przetwornik pomiarowy przekazywane były do drugiego kanału oscyloskopu. Dlatego możliwe było porównanie wybranych parametrów zarówno sygnału wejściowego (zwanego dalej sygnałem generowanym) jak i wyjściowego (zwanego dalej sygnałem rejestrowanym).

Zastosowane przetworniki i urządzenia pomiarowe umożliwiały generację przebiegu o dowolnym kształcie w zakresie  $\pm 12$  V i dla częstotliwości w przedziale od 1 kHz do 1 MHz.

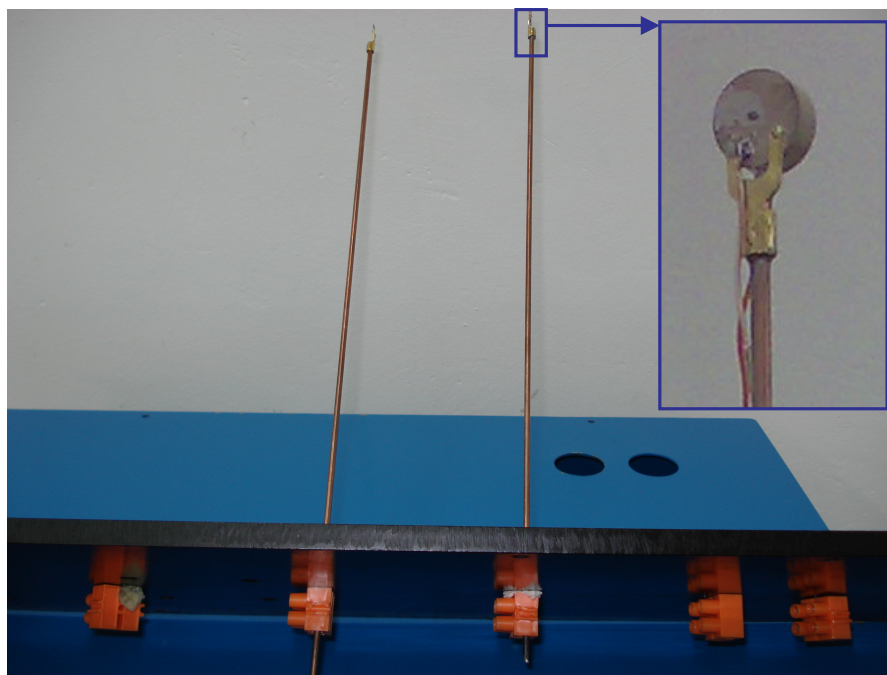
Badania eksperymentalne wykonano w modelu kadzi o wymiarach 60 cm x 60 cm x 70 cm, której widok przedstawiono na rys. 7.5.



Rysunek 7.5: Widok modelu kadzi i płyty bakelitowej z zamocowanymi elementami umożliwiającymi montaż przetworników piezoelektrycznych, które wykorzystano w badaniach eksperymentalnych

Kadź została wypełniona olejem elektroizolacyjnym pochodzącym z wycofanego z eksploatacji transformatora elektroenergetycznego. Wykorzystane do generacji

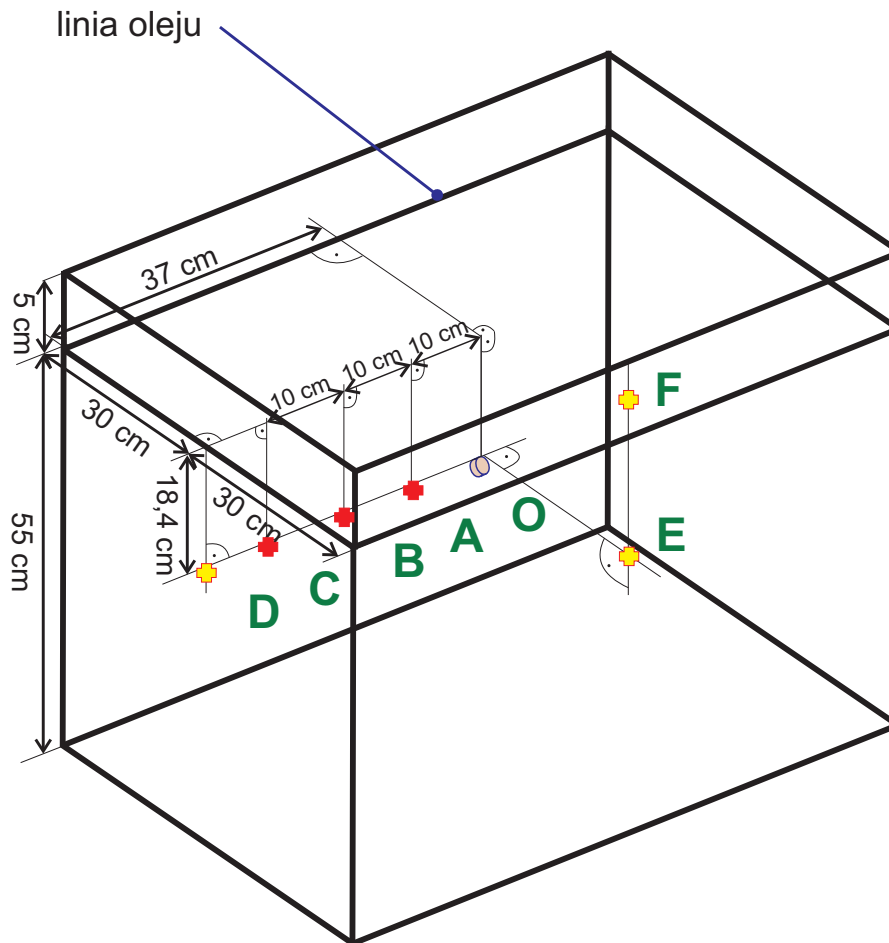
i pomiaru przetworniki PIC155 zamontowano na miedzianym pręcie, który z kolei zamontowano na płycie bakelitowej (rys. 7.6). Płytę umieszczono na kadzi w taki sposób, aby przetworniki zanurzone były w oleju. Wykorzystywany podczas pomiarów przetwornik WD był zamocowany do powierzchni kadzi za pomocą specjalnie wykonanego uchwytu magnetycznego. Siłę docisku przetwornika do powierzchni kadzi można było regulować za pomocą śruby dociskowej, w którą wyposażony był uchwyt mocujący. Jako medium sprzęgające przetwornik ze ścianą kadzi zastosowano towot, który zapewnia niezmienność styku i jego stałość na całej powierzchni [5]. Zastosowany układ pomiarowy był kalibrowany metodą Hsu-Nielsena, która oparta jest na łamaniu pręcika grafitowego pod ściśle określonym kątem nachylenia [104, 105]. Wszystkie badania przeprowadzono dla temperatury oleju  $T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ .



Rysunek 7.6: Widok płyty bakelitowej z zamocowanymi miedzianymi prętami, do których zamontowano przetworniki piezoelektryczne wykorzystane w badaniach eksperymentalnych

Podczas badań przetwornik generujący fale EA umieszczony był w centralnej części kadzi. Umieszczenie generatora oznaczono literą O na rys. 7.7. Natomiast przetwornik rejestrujący sygnały EA umieszczany był w różnych miejscach, zależnie od wykonywanych pomiarów. Umieszczenie odbiornika oznaczono literami A-F na rys. 7.7.

- przetwornik umieszczony na ścianach kadzi (D, E, F)
- przetwornik umieszczony we wnętrzu kadzi (A, B, C)
- generator umieszczony w centralnej części kadzi (O)



Rysunek 7.7: Schemat poglądowy modelu kadzi określający miejsca umieszczenia przetworników piezoelektrycznych podczas badań eksperymentalnych. Pozycje A-F określają położenie czujnika pomiarowego wewnątrz lub na powierzchni kadzi, położenie O określa umiejscowienie przetwornika generującego

Na podstawie wykonanych badań eksperymentalnych wyznaczono następujące parametry rejestrowanych sygnałów EA, które następnie poddano analizom:

1. wartość międzyszczytowa sygnału generowanego  $A_{\text{gen}}^{\text{P-P}}$  przez przetwornik piezoelektryczny umieszczony w położeniu oznaczonym literą O,
2. wartość międzyszczytowa sygnału rejestrowanego  $A_{\text{pom}}^{\text{P-P}}$  przez przetwornik piezoelektryczny w różnych miejscach kadzi.

## Rozdział 8

---

# Wyniki badań eksperymentalnych

---

### 8.1 Analiza sygnałów EA generowanej przez wymuszenie impulsowe

W celu określenia wartości wybranych parametrów fal EA rejestrowanej przy wymuszeniu sygnałem o charakterze impulsowym wykonano następujące badanie. Na przetwornik generujący PIC155, który umieszczono w centralnej części modelu kadzi (położenie oznaczone literą O na rys. 7.7) wypełnionej olejem elektroizolacyjnym przekazywano następujące sygnały napięciowe, które przetwornik przetwarzał na sygnały akustyczne:

- jeden okres przebiegu sinusoidalnego o stałej częstotliwości  $f_{\text{gen}} = 100$  kHz i amplitudzie  $A_{\text{gen}}$  zmienianej w zakresie od 3 V do 12 V, z gradacją co 1 V,
- skok jednostkowy o amplitudzie  $A_{\text{gen}}$  zmienianej w zakresie od 3 V do 12 V, z gradacją co 1 V.

Do pomiaru fal EA zastosowano przetwornik PIC155, który umieszczony był wewnątrz kadzi w odległości  $l = 20$  cm od źródła sygnału (położenie B na rys. 7.7).

### 8.1.1 Przebiegi czasowe sygnałów EA generowanej przez wymuszenie impulsowe

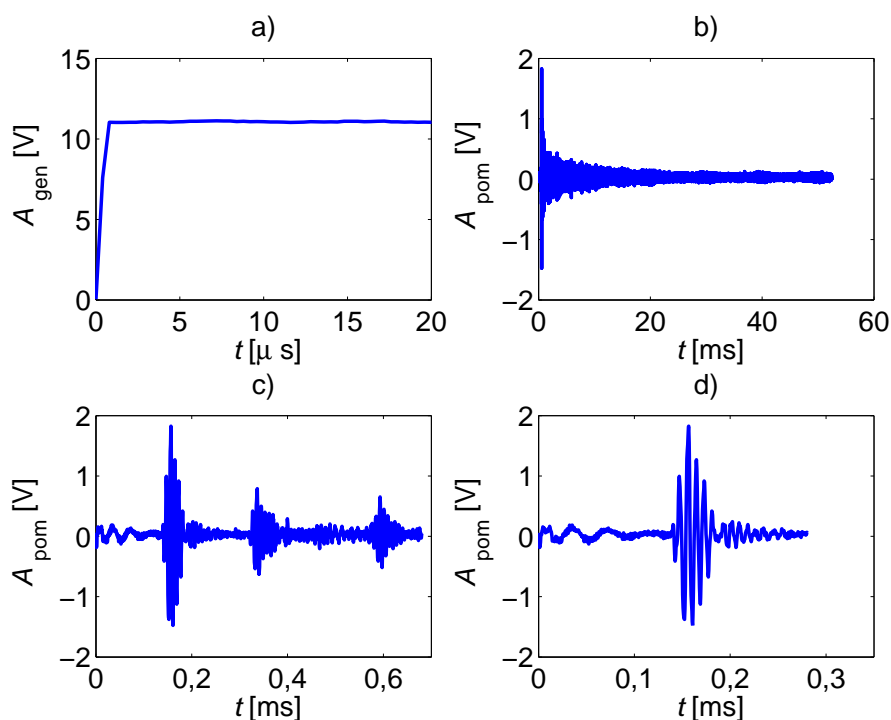
Przykładowe przebiegi czasowe rejestrowanych sygnałów EA podczas generacji fal EA o wybranej wartości amplitudy zaprezentowano na rys. 8.1 i 8.2. Przebiegi czasowe dla obu typów wymuszeń i dla wszystkich rozpatrywanych amplitud przedstawiono w załącznikach D oraz E. Na rys. 8.1 przedstawiono przebiegi sygnałów rejestrowanych podczas wymuszenia skokiem jednostkowym o amplitudzie  $A_{\text{gen}} = 12 \text{ V}$ . Natomiast na rys. 8.2 zilustrowano przebiegi sygnałów rejestrowanych podczas wymuszenia jednym okresem przebiegu sinusoidalnego o amplitudzie  $A_{\text{gen}} = 12 \text{ V}$ .

Na rys. 8.1a i 8.2a przedstawiono przebiegi czasowe sygnałów generowanych  $A_{\text{gen}}(t)$ : skok jednostkowy o amplitudzie 12 V i jeden okres sinusoidy o amplitudzie 12 V. Natomiast na rys. 8.1b i 8.2b zaprezentowano przebiegi czasowe sygnałów mierzonych  $A_{\text{pom}}(t)$  podczas generacji obu analizowanych wymuszeń. Rys. 8.1c i 8.2c przedstawiają wybrane przedziały czasowe rejestrowanych sygnałów, na których widoczne są pierwsze trzy serie fal EA, które zmierzono w przedziale czasu 0,7 ms. Natomiast na rys. 8.1d i 8.2d można zaobserwować serie fal EA, które zarejestrowano w przedziale czasu równym 0,3 ms od momentu wygenerowania rozważanych wymuszeń impulsowych.

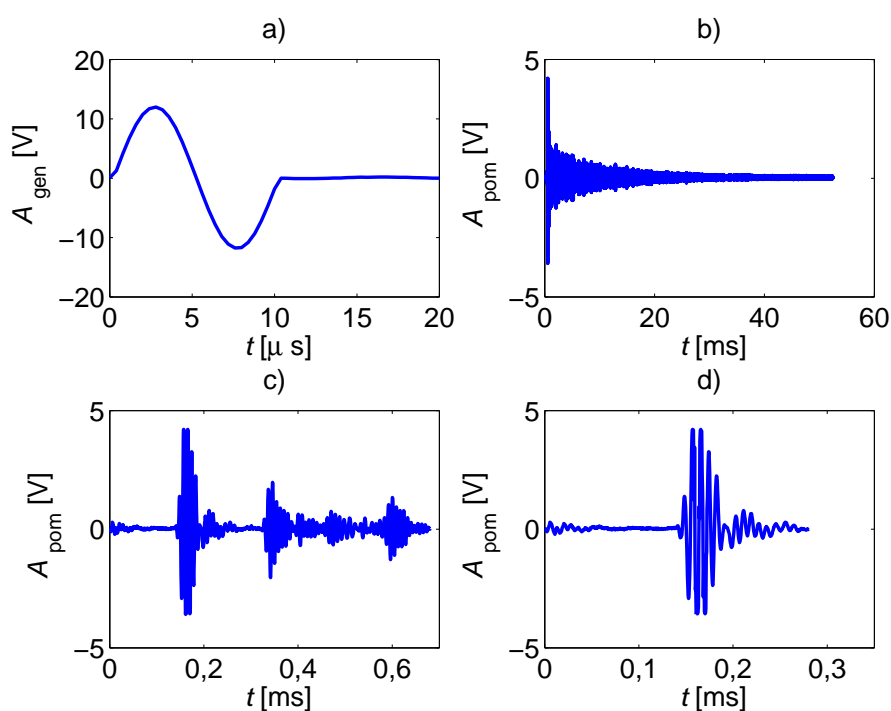
Pomiar trwający 50 ms jest wystarczająco długi aby można było obserwować fale ciśnienia akustycznego odbite od ścian kadzi i od powierzchni na granicy dwóch ośrodków tj. oleju i powietrza. Na rys. 8.1c i 8.1d oraz 8.2c i 8.2d widoczne są opóźnienia czasowe,  $\Delta t = 0,14 \text{ ms}$ , sygnału mierzonego  $A_{\text{pom}}$  względem sygnału generowanego  $A_{\text{gen}}$ , które związane są bezpośrednio z drogą propagacji fal EA w oleju. Ich wielkość zależy od położenia odbiornika względem generatora i jest zgodna z obliczeniami wykonanymi na podstawie wartości prędkości rozchodzenia się fal EA w oleju<sup>1</sup> i znanej odległości między źródłem, a odbiornikiem -  $l$ . Znając czas propagacji fal EA w oleju i geometrię rozpatrywanej kadzi można wykazać, że pierwsza seria fal EA z rys. 8.1c i 8.1d oraz 8.2c i 8.2d, dochodzi do przetwornika rejestrującego bezpośrednio od przetwornika generującego.

---

<sup>1</sup>Prędkość rozchodzenia się fal ciśnienia akustycznego w oleju elektroizolacyjnym wynosi około  $1390 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  [8]



Rysunek 8.1: Przebiegi czasowe sygnałów akustycznych rejestrowanych przy wymuszeniu skokiem jednostkowym o amplitudzie  $A_{\text{gen}} = 12$  V przetwornikiem PIC155 umieszczonym wewnątrz kadzi w położeniu B na rys. (7.7)



Rysunek 8.2: Przebiegi czasowe sygnałów akustycznych rejestrowanych przy wymuszeniu jednym okresem sinusoidy o amplitudzie  $A_{\text{gen}} = 12$  V przetwornikiem PIC155 umieszczonym wewnątrz kadzi w położeniu B na rys. (7.7)



Druga i kolejne serie fal EA są to odbicia od ścian i od górnej powierzchni oleju. Mają one mniejszą amplitudę i dochodzą po opóźnieniu czasowym dwukrotnie większym od wartości  $\Delta t$ . Sygnały EA dochodzące do odbiornika po czasie równym 0,4 ms od momentu generacji to zinterferowane fale EA po kolejnych odbiciach.

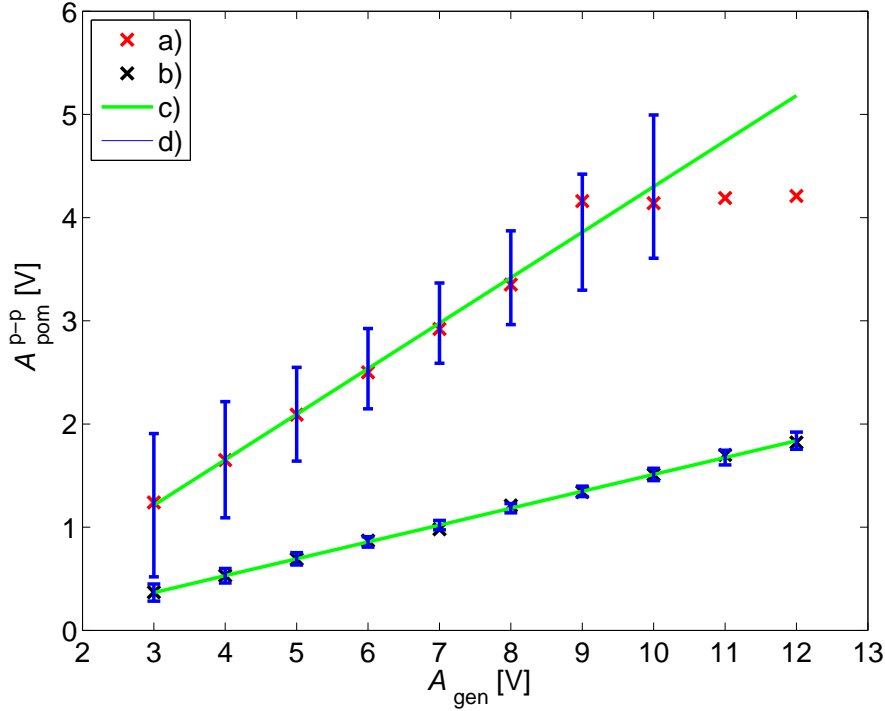
Analizując wykresy na rys. 8.1d i 8.2d, można zauważyć, że przebiegi czasowe sygnałów zarejestrowanych dla rozpatrywanych wymuszeń są zbliżone pod względem kształtu. Różnica dotyczy amplitudy sygnałów mierzonych, która jest co najmniej dwukrotnie niższa przy wymuszeniu skokiem jednostkowym. W tab. 8.1 zestawiono międzyszczytowe wartości sygnałów mierzonych  $A_{\text{pom}}^{\text{P-P}}$  dla pierwszej serii fal (dochodzącej do odbiornika bezpośrednio od źródła), wyznaczone oddzielnie dla poszczególnych wartości amplitudy sygnału generowanego  $A_{\text{gen}}$ ; dla obu rozpatrywanych wymuszeń.

Tablica 8.1: Zestawienie międzyszczytowych wartości sygnałów EA zarejestrowanej dla obu typów wymuszeń

$A_{\text{gen}}$	$A_{\text{pom}}^{\text{P-P}}$ dla skoku jednostkowego	$A_{\text{pom}}^{\text{P-P}}$ dla jednego okresu sinusoidy
[V]	[V]	[V]
3	0,37	1,24
4	0,53	1,65
5	0,69	2,09
6	0,87	2,50
7	0,98	2,92
8	1,21	3,35
9	1,34	4,16
10	1,51	4,14
11	1,70	4,19
12	1,82	4,21

Na rys. 8.3 przedstawiono międzyszczytowe wartości sygnałów zarejestrowanych podczas generacji rozpatrywanych wymuszeń. Można zauważyć, że amplituda sygnału w przypadku wymuszenia skokiem jednostkowym ma mniejsze wartości i jednocześnie mniejszy gradient wraz z narastającą wartością amplitudy generowanego sygnału niż w drugim analizowanym przypadku. Dla wymuszenia jednym okresem sinusoidy podczas generacji sygnałów o amplitudzie powyżej 9 V, następuje przesterowanie zastosowanego wzmacniacza, stąd wartość międzyszczytowa sygnałów rejestrowanych  $A_{\text{pom}}^{\text{P-P}}$  utrzymuje się na stałym poziomie,

około 4 V, niezależnie od wartości zwiększanej amplitudy sygnału generowanego  $A_{gen}$ . Wspomniane przesterowanie wzmacniacza nie ma istotnego wpływu na kształt rejestrowanego sygnału, zmienia natomiast przebiegi struktur czasowo-częstotliwościowych, które omówione zostaną w dalszej części rozdziału.



Rysunek 8.3: Porównanie wartości  $A_{pom}^{p-p}$  w funkcji  $A_{gen}$  dla obu badanych wymuszeń: a) skok jednostkowy, b) jeden okres sinusoidy, c) liniowe funkcje regresji (8.1) i (8.2), d) przedziały ufności (poziom ufności 99%)

Przy wykorzystaniu metody MNK oszacowano współczynniki liniowych funkcji regresji (8.1) i (8.2), za pomocą których aproksymowano zależność międzyszczytowej wartości sygnałów mierzonych w funkcji amplitudy sygnałów generowanych dla obu rozpatrywanych wymuszeń. Wyznaczone krzywe zaznaczono na rys. 8.3.

$$f^{skok}(x) = p_1^{skok} x + p_2^{skok} \quad (8.1)$$

gdzie:  $f^{skok}(x)$  - aproksymata funkcji regresji dla wymuszenia skokiem jednostkowym, zmienną zależną jest  $A_{pom}$ ,

$p_1^{skok}$  i  $p_2^{skok}$  - estymaty parametrów strukturalnych,

$x$  - zmienna niezależna - amplituda sygnałów generowanych  $A_{gen}$ .

$$f^{okres}(x) = p_1^{okres}x + p_2^{okres} \quad (8.2)$$

gdzie:  $f^{okres}(x)$  - aproksymata funkcji regresji dla wymuszenia jednym okresem sinusoidy, zmienną zależną jest  $A_{pom}$

$p_1^{okres}$  i  $p_2^{okres}$  - estymaty parametrów strukturalnych,

$x$  - zmienna niezależna - amplituda sygnałów generowanych  $A_{gen}$ .

Wartości wyznaczonych współczynników  $p_1^{skok}$  i  $p_2^{skok}$  oraz  $p_1^{okres}$  i  $p_2^{okres}$  oraz górną i dolną granicę przedziałów ufności wyznaczono dla poziomu ufności 95%, a ich wartości zestawiono w celach porównawczych w tab. 8.2.

Tablica 8.2: Wartości estymat funkcji regresji i granice przedziałów dla poziomu ufności 95 %

Parametr	Współczynniki			
	Jeden okres sinusoidy		Skok jednostkowy	
	$p_1^{skok}$	$p_2^{skok}$	$p_1^{okres}$	$p_2^{okres}$
Estymata	0,44	-0,11	0,16	-0,12
Górna granica	0,49	0,27	0,17	-0,08
Dolna granica	0,27	-0,49	0,16	-0,17

Dobrano i wyznaczono wartości następujących parametrów, które mogą być wykorzystane jako wskaźniki dopasowania estymaty funkcji regresji do danych empirycznych:

- współczynnik zmienności niewyjaśnionej przez regresję określony zależnością (8.3) [146, 147],
- współczynnik determinacji określony zależnością (8.4) [146, 147].

$$SSE = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (8.3)$$

gdzie:  $SSE$  - współczynnik zmienności niewyjaśnionej przez regresję,

$y_i$  - zmienna empiryczna,

$\hat{y}_i$  - zmienna teoretyczna - estymowana,

$i = \langle 1, 2, \dots, n \rangle, n = 54$  - liczba danych.

$$R_2 = \frac{SSR}{SST} \quad (8.4)$$

gdzie:  $R_2$  - współczynnik determinacji,

$SSR$  zmienność wyjaśniona przez regresję określona zależnością (8.5) [146, 147],

$SST$  zmienność całkowita określona zależnością (8.6) [146, 147].

$$SSR = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y}_i)^2 \quad (8.5)$$

gdzie:  $\bar{y}_i$  - średnia arytmetyczna z wartości empirycznych.

$$SST = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2 \quad (8.6)$$

Wartości wskaźników dopasowania estymaty funkcji regresji do wartości wyznaczonych empirycznie zestawiono w tabeli 9.3.

Tablica 8.3: Wartości wskaźników dopasowania estymaty funkcji regresji

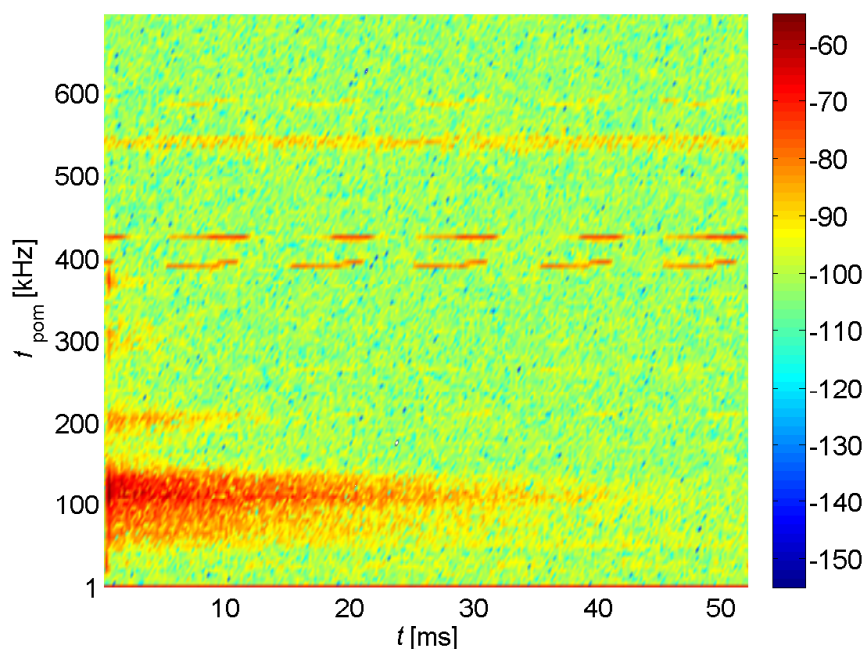
	Wartości wskaźników dopasowania			
	Jeden okres sinusoidy		Skok jednostkowy	
Parametr	SSE	$R_2$	SSE	$R_2$
Wartość	$3,54 \times 10^{-3}$	0,99	0,13	0,98

Na podstawie wyznaczonych modeli stwierdzono, że wartość amplitudy sygnałów rejestrowanych rośnie wprost proporcjonalnie w stosunku do amplitudy sygnałów generowanych dla obu rozpatrywanych wymuszeń. W przypadku jednego okresu sinusoidy amplituda przyrasta z gradientem równym 0,44 [V/V]. Natomiast dla skoku jednostkowego amplituda przyrasta z gradientem 0,16 [V/V]. Ponadto stwierdzono, że stworzone modele liniowe wyjaśniają zdecydowaną większość zmienności zmiennej zależnej, którą jest amplituda sygnałów rejestrowanych.

### 8.1.2 Spektrogramy sygnałów EA generowanej przez wymuszenie impulsowe

W ramach badań przeprowadzono analizy czasowo-częstotliwościowe (spektrogramy) dla obu rozpatrywanych wymuszeń, przy zmianach wartości amplitudy sygnałów generowanych. Analizy porównawcze wykonano w celu określenia różnic i wskazania cech wspólnych w wyznaczonych strukturach czasowo-częstotliwościowych badanych sygnałów EA. Spektrogramy wykonane dla obu typów wymuszeń, dla wszystkich rozpatrywanych amplitud przedstawiono w załącznikach G i F. Zaprezentowane spektrogramy opisano, stosując skalę w postaci paska palety kolorów, których poszczególne barwy odpowiadają odpowiednim wartościom amplitud wyznaczonego widma. Spektrogramy uzyskano w wyniku zastosowania krótkoczasowego przekształcenia Fouriera STFT określone zależnością (5.39). W obliczeniach zastosowano okno czasowe Hamminga określone zależnością (5.40).

Na rys. 8.4 zaprezentowano spektrogram sygnałów EA zarejestrowanej podczas generacji skoku jednostkowego o amplitudzie 12 V.



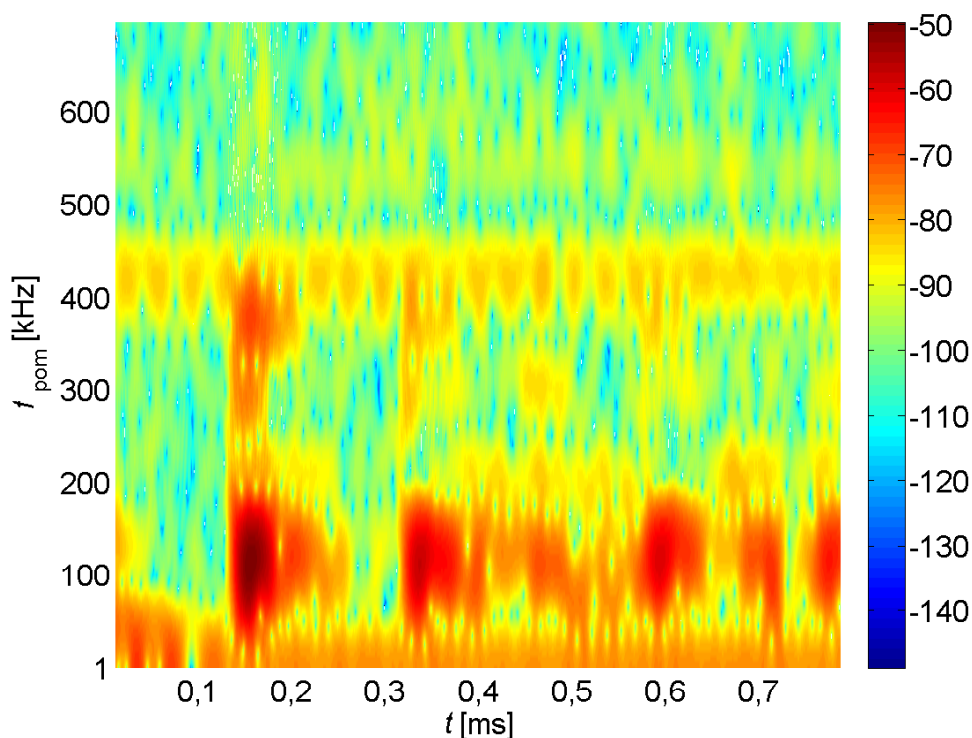
Rysunek 8.4: Spektrogram sygnałów EA  $A_{\text{pom}}$  [dB] zarejestrowanej przy wymuszeniu skokiem jednostkowym o amplitudzie  $A_{\text{gen}}=12$  V przetwornikiem PIC155 umieszczonym w położeniu B (rys. 7.7)

Przedstawione obrazy struktur czasowo-częstotliwościowych zawierają składowe w czterech przedziałach częstotliwości. Pierwszy przedział dotyczy relatywnie długotrwałej (około 30 ms) struktury zawierającej częstotliwości w zakresie od około 70 kHz do około 150 kHz. Drugi przedział zawiera strukturę relatywnie krótkotrwałą (około 10 ms), która zawiera częstotliwości z przedziału od około 180 kHz do 220 kHz. Kolejne dwie struktury czasowo-częstotliwościowe występują dla częstotliwości w zakresie (280-320) kHz i (380-390) kHz. Są one relatywnie szybko wytłumiane i zanikają po upływie około 0,5 - 1 ms. Okresowo występujące struktury na poziomie około 400 kHz i 440 kHz oraz ciągła struktura występująca na poziomie około 550 kHz to zakłócenia, które występują we wszystkich zarejestrowanych sygnałach.

W celu wyeksponowania obszaru struktur czasowo-częstotliwościowych o największych amplitudach na rys. 8.5 przedstawiono spektrogram sygnałów EA zarejestrowanej podczas generacji skoku jednostkowego o amplitudzie 12 V dla ograniczonego przedziału czasowego w zakresie (0-0,8) ms.

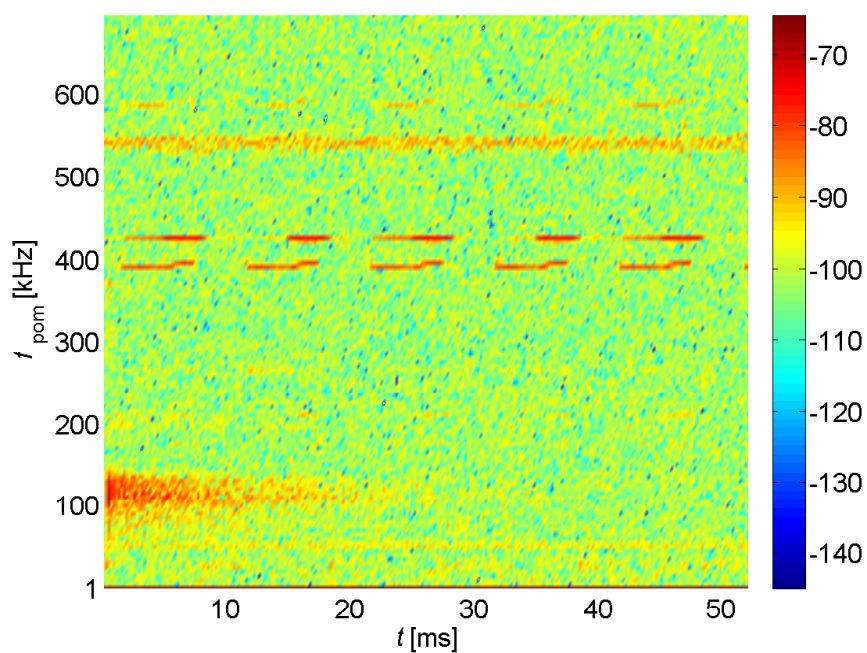
Na zaprezentowanym spektrogramie można zauważyć, że omawiane zdarzenie akustyczne rozpoczęło się w chwili czasowej  $t=0,15$  ms. Dominujące struktury czasowo-częstotliwościowe, które występują w przedziale czasowym od 1,15 ms do 2,5 ms, zawarte są w paśmie od około 40 kHz do 200 kHz. Wyraźne struktury można zaobserwować w zakresach (280-320) kHz i (350-440) kHz. Struktury, które występują w przedziale czasowym (0-0,8) ms odpowiadają serii fal dochodzących do przetwornika rejestrującego bezpośrednio od generatora. Na zaprezentowanym spektrogramie można również zaobserwować, że sygnały EA rejestrowanej po upływie około 0,3 ms nie zawierają dominujących składowych wysokoczęstotliwościowych w przedziałach (280-320) kHz i (380-390) kHz. Wynika stąd, że ulegają one całkowitemu wytłumieniu podczas odbić fal EA od ścian kadzi.

W celach porównawczych na rys. 8.6 i 8.7 przedstawiono spektrogramy sygnałów EA zarejestrowanej podczas wymuszenia skokiem jednostkowym o amplitudzie  $A_{\text{gen}}=3$  V. Na rys. 8.6 zilustrowano przebieg całego zarejestrowanego zdarzenia akustycznego. Natomiast na rys 8.7 przedstawiono ograniczony przedział czasowy sygnału, tj. w zakresie (0-0,8) ms.

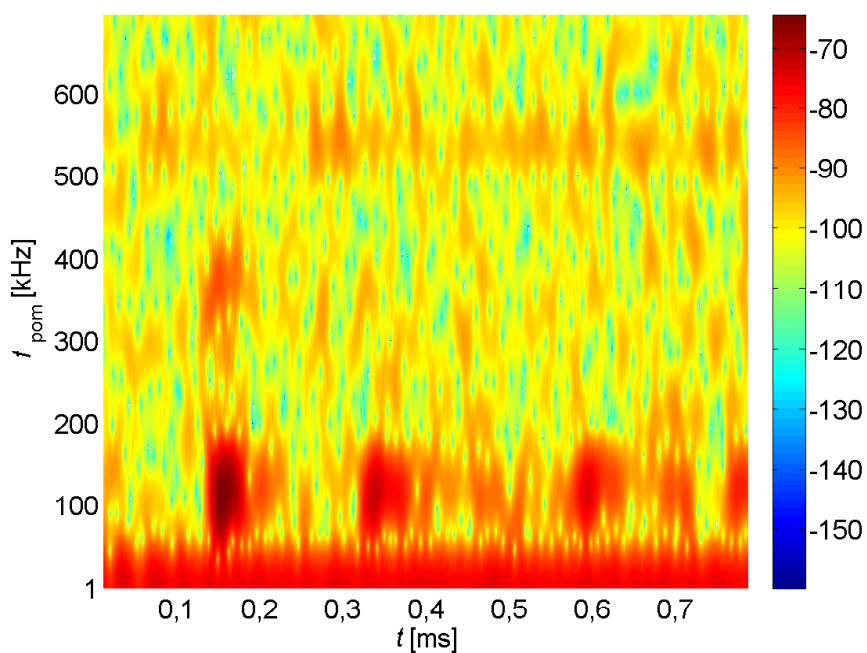


Rysunek 8.5: Spektrogram sygnałów EA  $A_{\text{pom}}$  [dB] zarejestrowanej przy wymuszeniu skokiem jednostkowym o amplitudzie  $A_{\text{gen}}=12$  V przetwornikiem PIC155 umieszczonym w położeniu B (rys. 7.7), dla przedziału czasu  $t \in (0 - 0,8)$  ms

Na podstawie zobrazowanych struktur, można stwierdzić, że w sygnałach dominują częstotliwości zawarte w zakresie (70-150) kHz, jednak mają one o około 15 dB mniejszą amplitudę niż w przypadku wmuszenia skokiem jednostkowym o amplitudzie 12 V. Ponadto czas trwania omawianego zdarzenia akustycznego jest dwukrotnie krótszy (20 ms) w porównaniu z wymuszeniem o amplitudzie 12 V. W omawianych sygnałach nie występują struktury wysokoczęstotliwościowe, z wyjątkiem struktury czasowo-częstotliwościowej występującej w przedziale czasu (0,15-0,18) ms, która wykazuje zawartość częstotliwości w zakresach (280-320) kHz i (380-390) kHz.



Rysunek 8.6: Spektrogram sygnałów EA  $A_{\text{pom}}$  [dB] zarejestrowanej przy wymuszeniu skokiem jednostkowym o amplitudzie  $A_{\text{gen}}=3$  V przetwornikiem PIC155 umieszczonym w położeniu B (rys. 7.7)

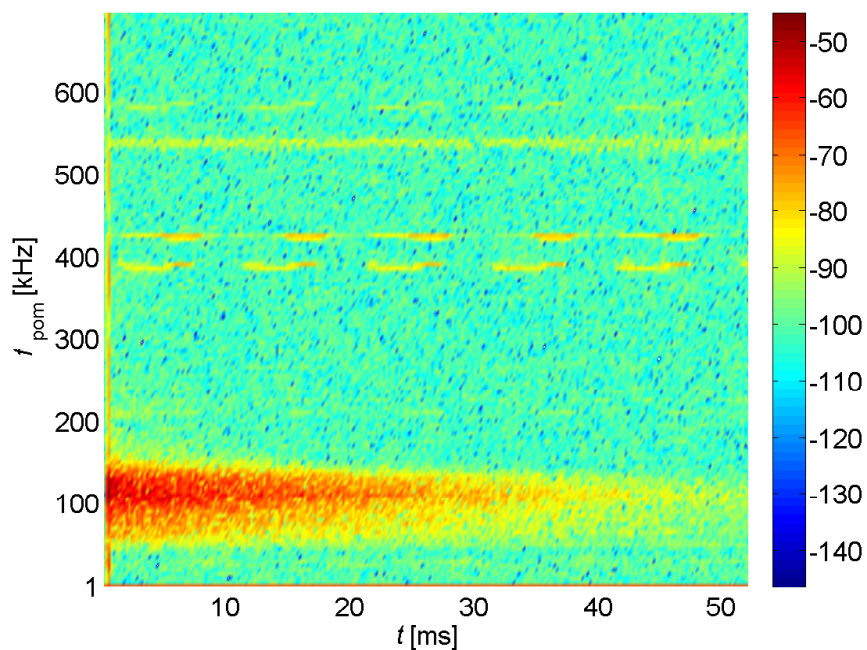


Rysunek 8.7: Spektrogram sygnałów EA  $A_{\text{pom}}$  [dB] zarejestrowanej przy wymuszeniu skokiem jednostkowym o amplitudzie  $A_{\text{gen}}=3$  V przetwornikiem PIC155 umieszczonym w położeniu B (rys. 7.7), dla przedziału czasu  $t \in (0 - 0,8)$  ms

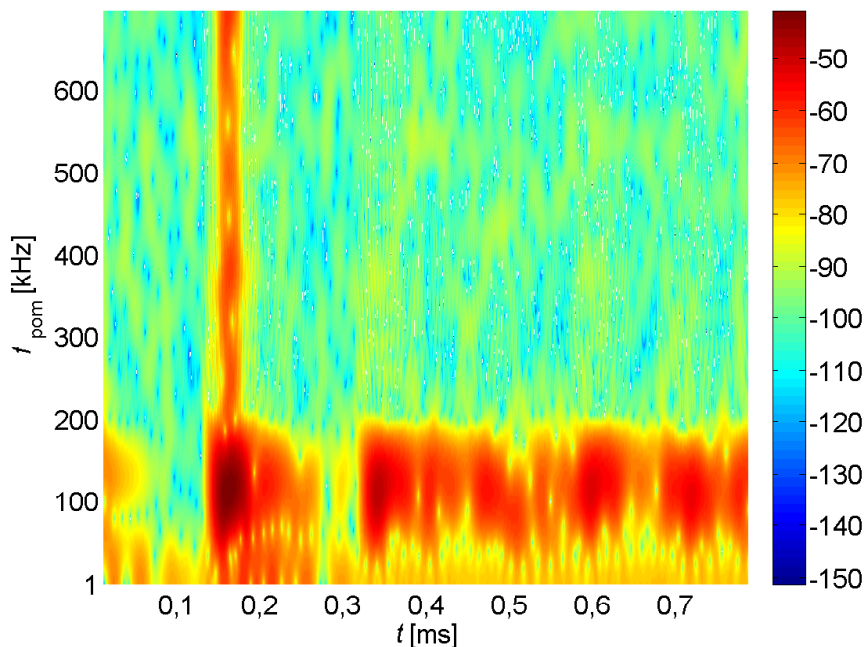


Na rys. 8.8 zaprezentowano spektrogram sygnałów EA zarejestrowanej podczas generacji jednego okresu sinusoidy o amplitudzie 12 V i częstotliwości 100 kHz. Natomiast na rys. 8.9 przedstawiono spektrogram dla ograniczonego przedziału czasowego, tj. (0-0,8) ms. Podobnie jak w przypadku wymuszenia skokiem jednostkowym o amplitudzie 12 V, dominujące struktury czasowo-częstotliwościowe zawierają częstotliwości w paśmie (50-150) kHz. Jednak w przypadku wymuszenia jednym okresem sinusoidy o amplitudzie 12 V zarejestrowane zdarzenie akustyczne jest dłuższe o około 10 ms i ma większą o 10 dB amplitudę. Ponadto struktura czasowo-częstotliwościowa występująca w czasie (0,15-0,18) ms, która odpowiada serii fal EA dochodzących do przetwornika rejestrującego bezpośrednio od generatora, zawiera częstotliwości w całym analizowanym paśmie, czyli do 0,7 MHz. Wynika to prawdopodobnie z przesterowania zastosowanego wzmacniacza pomiarowego, ponieważ omawiany szerokopasmowy impuls ani wysokoczęstotliwościowe składowe nie pojawiają się w sygnałach EA rejestrowanej przy wymuszeniu o amplitudzie sygnału generowanego poniżej 9 V ani przy wymuszeniu skokiem jednostkowym.

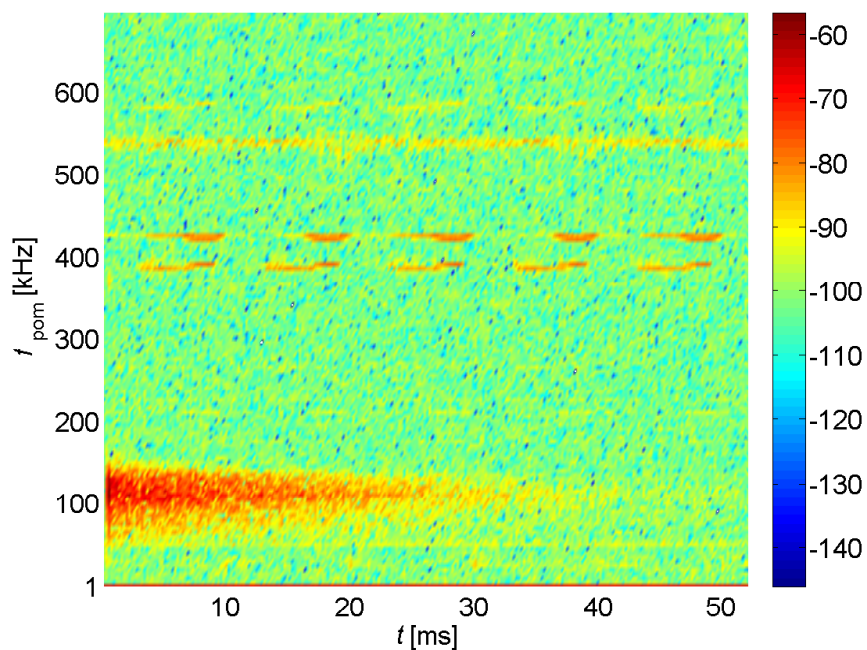
W celach porównawczych na rys. 8.10 i 8.11 przedstawiono spektrogramy sygnałów EA zarejestrowanej podczas wymuszenia jednym okresem sinusoidy o amplitudzie  $A_{\text{gen}} = 3$  V. Omawiane zdarzenie akustyczne zanika po upływie około 40 ms i ma ono o około 10 dB mniejszą amplitudę niż w przypadku wymuszenia o amplitudzie 12 V.



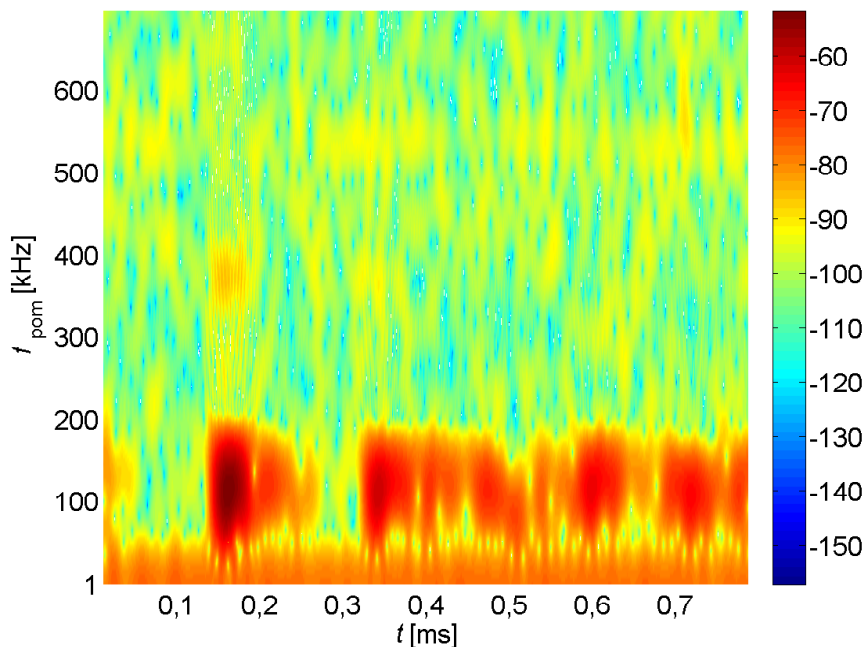
Rysunek 8.8: Spektrogram sygnałów EA  $A_{\text{pom}}$  [dB] rejestrowanej przy wymuszeniu jednym okresem sinusoidy o amplitudzie  $A_{\text{gen}}=12$  V przetwornikiem PIC155 umieszczonym w położeniu B (rys. 7.7)



Rysunek 8.9: Spektrogram widm amplitudowych  $A_{\text{pom}}$  [dB] rejestrowanej przy wymuszeniu jednym okresem sinusoidy o amplitudzie  $A_{\text{gen}}=12$  V przetwornikiem PIC155 umieszczonym w położeniu B (rys. 7.7), dla przedziału czasu  $t \in (0 - 0,8)$  ms



Rysunek 8.10: Spektrogram sygnałów EA  $A_{\text{pom}}$  [dB] rejestrowanej przy wymuszeniu jednym okresem sinusoidy o amplitudzie  $A_{\text{gen}}=3$  V przetwornikiem PIC155 umieszczonym w położeniu B (rys. 7.7)



Rysunek 8.11: Spektrogram sygnałów EA  $A_{\text{pom}}$  [dB] rejestrowanej przy wymuszeniu jednym okresem sinusoidy o amplitudzie  $A_{\text{gen}}=3$  V przetwornikiem PIC155 umieszczonym w położeniu B (rys. 7.7), dla przedziału czasu  $t \in (0 - 0,8)$  ms

### 8.1.3 Określenie modelu matematycznego dla zarejestrowanych fal EA propagujących bezpośrednio od źródła do odbiornika

Charakterystyczny sygnał EA odpowiadający serii fal ciśnienia akustycznego, które dochodzą do przetwornika rejestrującego bezpośrednio od przetwornika generującego wymuszenie impulsowe, można aproksymować funkcją  $y(t)$ , w której skład wchodzi suma  $N$  funkcji Gaussowskich. W procesie estymacji parametrów funkcji  $y(t)$  wykorzystano nieliniowy model funkcji regresji opisanej równaniem (8.7)[123].

$$\hat{Y} = f(X,P) + \xi \quad (8.7)$$

gdzie:  $\hat{Y}$  - teoretyczna wartość funkcji regresji  $\hat{Y} = f(X,P)$ ,

$X$  - zbiór zmiennych funkcji regresji,

$P$  - zbiór parametrów strukturalnych funkcji regresji  $Y$  względem  $X$ ,

$\xi$  - składnik losowy.

Estymata funkcja regresji  $\hat{y}(t)$  ma postać opisaną równaniem (8.8).

$$f(X, P) = \hat{y}(t) = \sum_{i=1}^N \alpha_i e^{-\left(\frac{t-\beta_i}{\gamma_i}\right)^2} \quad (8.8)$$

gdzie:  $\hat{y}$  - aproksymata funkcji regresji,

$\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$  - estymaty parametrów strukturalnych: amplituda, centroid, szerokość  $i$ -tej składowej Gaussowskiej,

$i = \langle 1, 2, \dots, N \rangle$ ;  $N = 19$  - liczba składowych funkcji Gaussowskich,

$t$  - zmienna niezależna, czas.

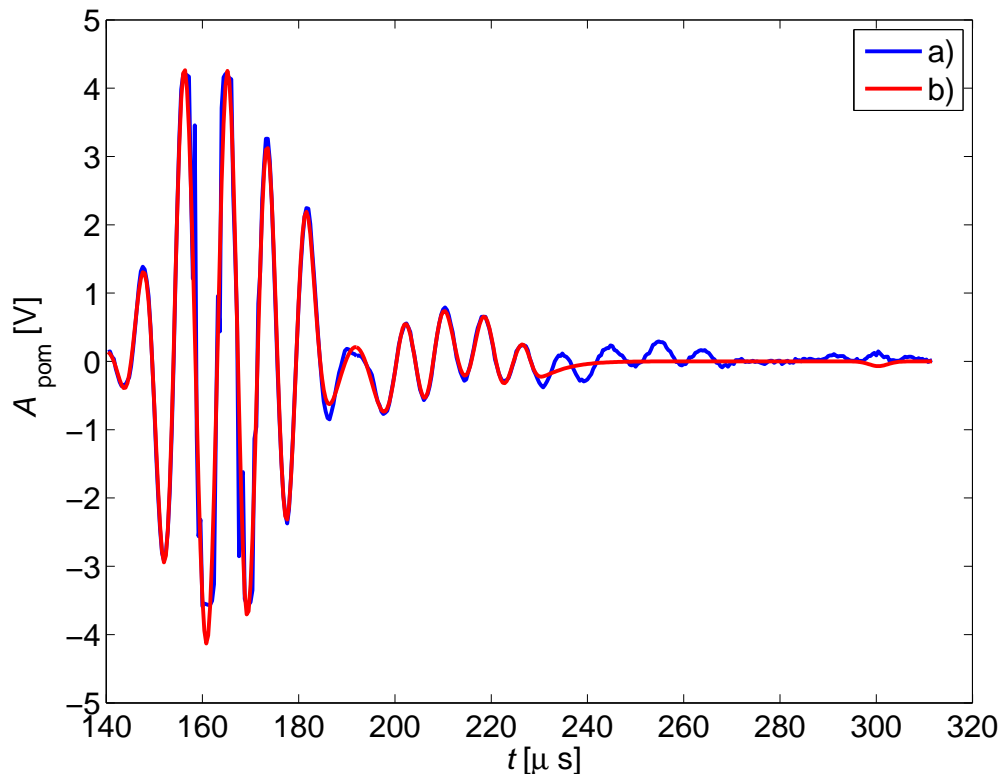
Parametry strukturalne funkcji regresji:  $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$  oszacowano przy zastosowaniu metody MNK. Następnie poddano je procesowi optymalizacji, w którym wykorzystano metodę Nelder-Mead Simplex [118]. Przy czym zastosowano kryterium minimalnej normy reszt  $\delta_r$  (5.26) [119]. Liczbę składowych

Gaussowskich w funkcji regresji  $N = 19$  wyznaczono na podstawie analizy wizualnej uzyskanego wyniku estymacji.

Badany przebieg czasowy składał się z  $n = 352$  próbek pomiarowych, co odpowiada serii fal EA dochodzących bezpośrednio od źródła do odbiornika. Należy podkreślić, że sygnał ten odpowiada przebiegowi czasowemu zaprezentowanemu w pracy [91], który to sygnał autorzy klasyfikują jako typowy sygnał EA generowanej przez WNZ. Graficzną prezentację estymaty funkcji regresji i przebieg czasowy badanego sygnału przedstawiono na rys. 8.12.

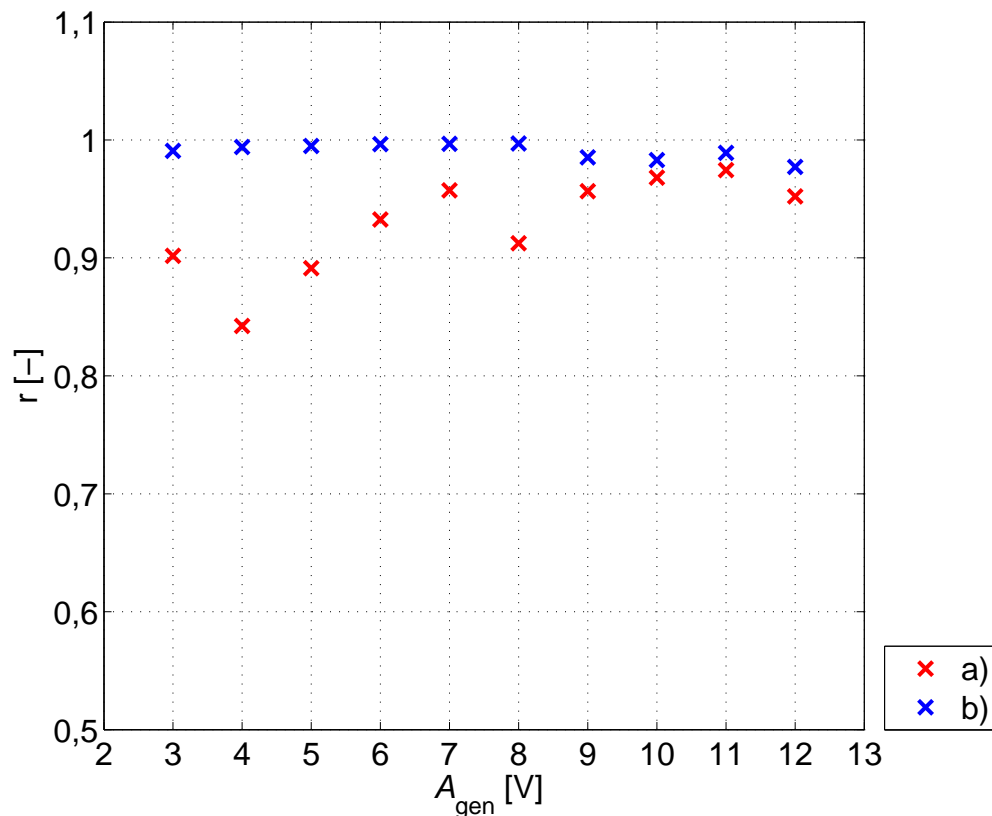
Parametry rozpatrywanego modelu funkcji regresji (8.8) określono dla wszystkich zarejestrowanych sygnałów przy obu typach wymuszeń. Wykresy przedstawiono w załącznikach H i I.

W celu określenia liczbowej współzależności między danymi empirycznymi  $y_i = A_{\text{pom}}(i)$ , a estymatami  $\hat{y}(i)$  wyznaczono wartości współczynnika korelacji określonej równaniem (5.25)[12].



Rysunek 8.12: Przebiegi czasowe funkcji regresji (b) i sygnałów EA (a) zarejestrowanej przy wymuszeniu jednym okresem sinusoidy o amplitudzie  $A_{\text{gen}}=12$  V, w przedziale czasowym  $t \in (140-320)$   $\mu\text{s}$ , (dla 352 próbek sygnału) przetwornikiem PIC155 w położeniu B (rys. 7.7)

Na rys. 8.13 przedstawiono wartości wyznaczonych współczynników dla sygnałów EA rejestrowanej podczas obu badanych wymuszeń i ich funkcji regresji, dla 10 badanych wartości amplitudy sygnału generowanego.



Rysunek 8.13: Wartości współczynnika korelacji dla rozpatrywanych przebiegów sygnałów EA rejestrowanej przy wymuszeniu jednym okresem sinusoidy (a) i skokiem jednostkowym (b), dla 10 analizowanych amplitud sygnałów generowanych

Średnia wartość współczynnika korelacji obliczona dla 10 analizowanych przebiegów sygnałów zarejestrowanych dla wymuszenia jednym okresem sinusoidy i dla 10 sygnałów zarejestrowanych przy wymuszeniu skokiem jednostkowym, która równa jest odpowiednio  $\bar{r}_{okres} = 0,99$  i  $\bar{r}_{skok} = 0,93$  wskazuje na bardzo wysoką współzależność, a tym samym dobre dopasowanie estymaty funkcji regresji do danych empirycznych.

## 8.2 Określenie wpływu położenia przetwornika rejestrującego fale EA na uzyskiwane wyniki pomiarów

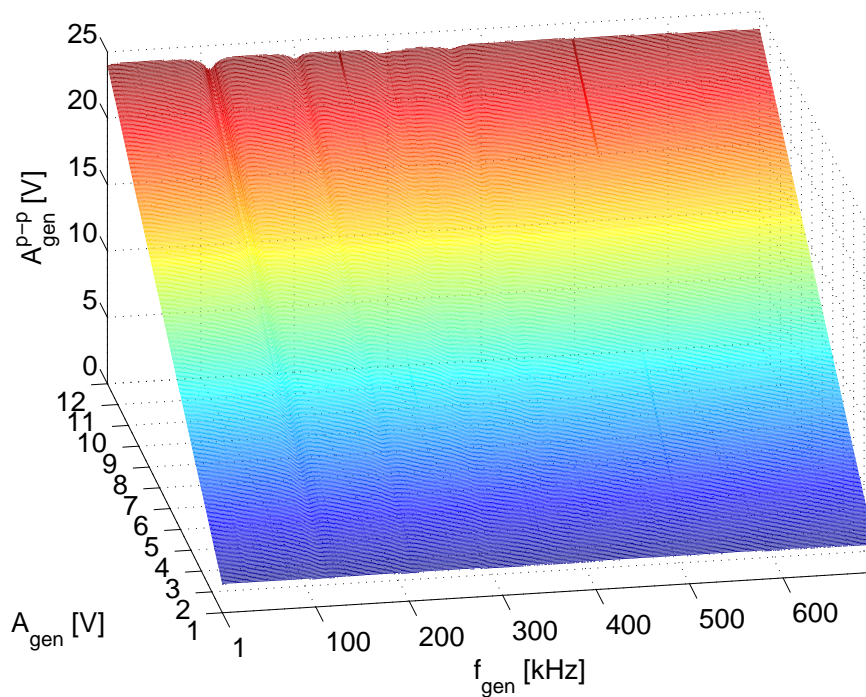
W celu określenia wpływu miejsca rejestracji fal EA na uzyskiwane wyniki, wykonano pomiary zmieniając położenie przetwornika WD-AH17, umieszczając go w czterech miejscach tj:

1. na ścianie od frontu kadzi na wysokości generatora fali akustycznej - położenie D na rys. 7.7,
2. na ścianie z boku kadzi na wysokości generatora fali akustycznej - położenie E na rys. 7.7,
3. na ścianie kadzi poza linię oleju - położenie F na rys. 7.7,
4. wewnątrz kadzi, w odległości około 10 cm od generatora fali akustycznej - położenie A na rys. 7.7,
5. wewnątrz kadzi, w odległości około 20 cm od generatora fali akustycznej - położenie B na rys. 7.7.

W trakcie trwania jednego pomiaru generowano, za pomocą przetwornika piezoelektrycznego umieszczonego w położeniu O na rys. 7.7, sygnały sinusoidalne o stałej amplitudzie i stałej częstotliwości. Dla każdego z rozpatrywanych miejsc umieszczenia przetwornika pomiarowego i dla każdej z analizowanych wartości amplitud oraz częstotliwości generowanego sygnału wykonano jeden pomiar. Rozpatrzono 12 wartości amplitud w zakresie od 1 V do 12 V, z gradacją 1 V i częstotliwości w paśmie od 1 kHz do 500 kHz, z gradacją co 1 kHz, przy czym podczas niektórych pomiarów generowano częstotliwości do 600 lub 1000 kHz. Zakres rozpatrywanych częstotliwości z początkowej wartości od 1 kHz do 1 MHz zredukowano do zakresu od kHz do 700 kHz, a następnie do 500 kHz, ponieważ nie zaobserwowano istotnych zmian w analizowanych sygnałach EA rejestrowanej podczas emisji fal o częstotliwościach powyżej 500 kHz. Dodatkowym powodem zmniejszenia zakresu rozpatrywanych częstotliwości był relatywnie długi czas

trwania, około 3 godz., pojedynczej serii pomiarów, tj: generacji sygnałów o stałej amplitudzie w zakresie częstotliwości od 1 kHz do 1 MHz.

Na rys. 8.14 przedstawiono zależność wartości międzyszczytowej sygnałów generowanych  $A_{\text{gen}}^{\text{P-P}}$  w funkcji dwóch zmiennych tj: częstotliwości sygnału generowanego  $f_{\text{gen}}$  i amplitudy sygnału generowanego  $A_{\text{gen}}$ . Na podstawie wyznaczonych wykresów można stwierdzić, że amplituda sygnałów generowanych przez przetwornik utrzymuje się na stałym poziomie w całym analizowanym paśmie, z wyjątkiem niewielkich spadków amplitudy w pobliżu niektórych częstotliwości rezonansowych tj: około 115 kHz, 208 kHz, 280 kHz, 305 kHz i 365 kHz. Takie same wartości częstotliwości rezonansowych wyznaczono w dodatkowym eksperymencie poprzez określenie zależności impedancji w funkcji częstotliwości z wykorzystaniem metody oscyloskopowej [136, 139].



Rysunek 8.14: Międzyszczytowa wartość sygnałów EA, które generowano przetwornikiem PIC155 umieszczonym w centralnej części kadzi (położenie O na rys. 7.7) w funkcji dwóch zmiennych: amplitudy sygnału generowanego  $A_{\text{gen}}$  i częstotliwości sygnału generowanego  $f_{\text{gen}}$

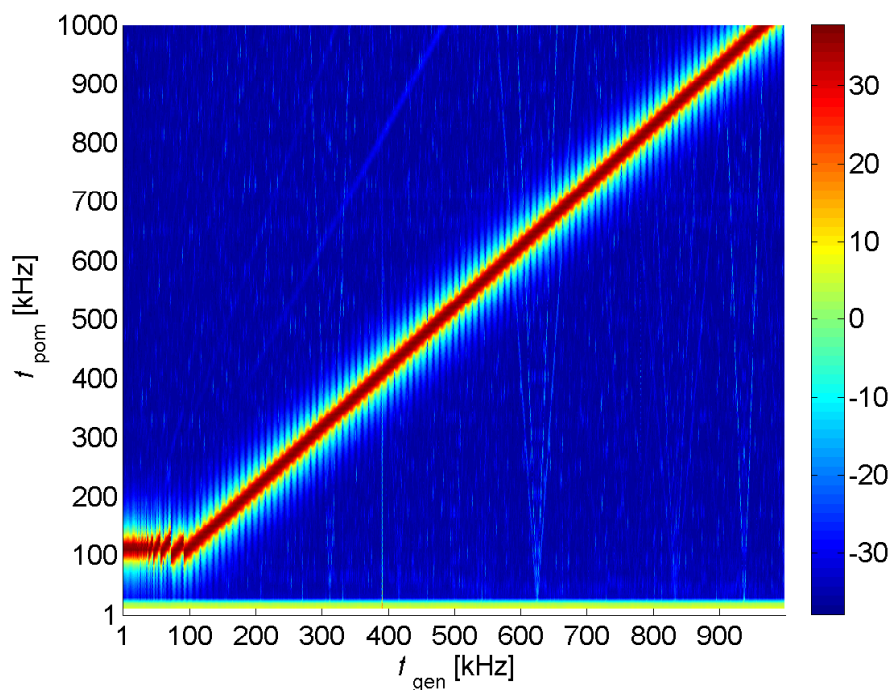
Na rys. 8.15 i 8.16 przedstawiono przykładowe przebiegi widm amplitudowych sygnałów generowanych i rejestrowanych, które wyznaczono na podstawie analizy wyników pomiarów uzyskanych podczas generacji sygnałów EA o stałej amplitudzie,  $A_{\text{gen}}=6$  V i częstotliwości zmienianej w zakresie od 1 kHz do 1000 kHz.



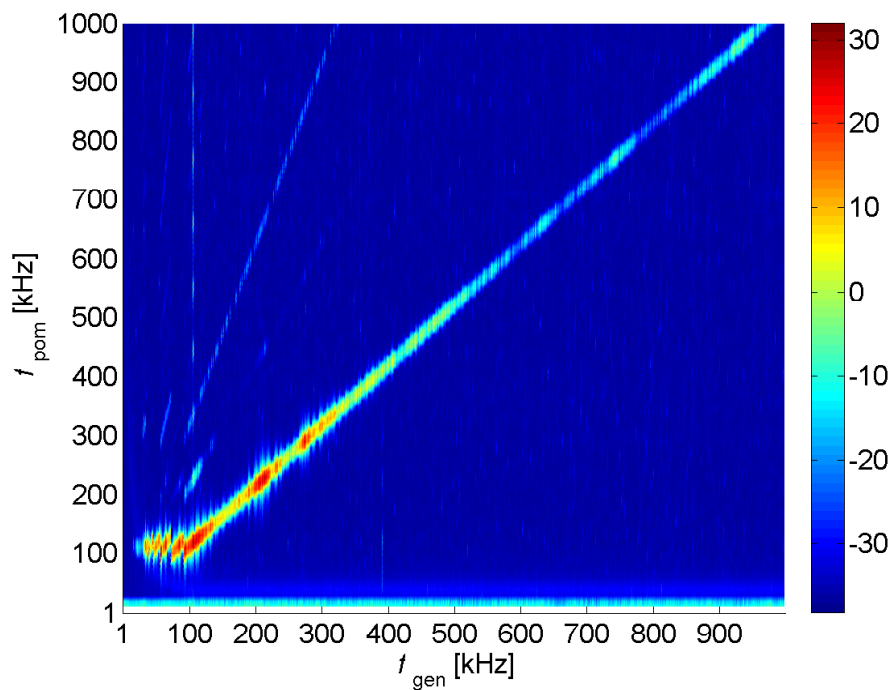
Skala zastosowana na rys. 8.15 i 8.16 ma postać paska palety kolorów, których poszczególne barwy odpowiadają odpowiednim wartościom amplitud wyznaczonego widma. Przebiegi widm amplitudowych sygnałów rejestrowanego i generowanego dla wszystkich rozpatrywanych amplitud przedstawiono odpowiednio w załącznikach J i K.

Omawiane przebiegi widm amplitudowych dla sygnałów EA generowanych i rejestrowanych w kadzi, wyznaczono w celu określenia składowych częstotliwościowych, różnych od częstotliwości generowanej.

Na podstawie wykreślonych zależności można stwierdzić, że zastosowany do generacji fal EA przetwornik PIC155 nie przetwarza sygnałów zawartych w paśmie od 1 kHz do około 90 kHz. Natomiast generowane sygnały sinusoidalne o stałej częstotliwości zawartej w paśmie od około 100 kHz do 1 MHz są przetwarzane przez przetwornik generujący bez zmian zarówno w amplitudzie jak i częstotliwości. Zależności przedstawione na rys. 8.16 wykazują istotne różnice w zaprezentowanych widmach w porównaniu z rys. 8.15. Różnice w amplitudzie sygnałów rejestrowanych oznaczają, że sygnały EA ulegają zmianie w torze pomiarowym, w którym następuje propagacja fal EA. Dotyczy to zarówno właściwości zastosowanego przetwornika, urządzeń pomiarowych jak i właściwości oleju elektroizolacyjnego. Sygnały te ulegają wzmocnieniu w pobliżu częstotliwości rezonansowych. Natomiast wysokoczęstotliwościowe sygnały ulegają częściowemu wytłumieniu, stąd na rys. 8.16 dla częstotliwości generowanych np. w paśmie około 600 kHz i 800 kHz jest niższa amplituda sygnałów rejestrowanych w porównaniu np. z wartością amplitudy podczas generacji sygnałów o częstotliwości 500 kHz.



Rysunek 8.15: Przebiegi widm amplitudowych,  $A(f)$  [dB], wyznaczone dla sygnałów generowanych (które rejestrowano w drugim kanale oscyloskopu) w funkcji częstotliwości sygnału generowanego o amplitudzie  $A_{\text{gen}} = 6$  V



Rysunek 8.16: Przebiegi widm amplitudowych,  $A(f)$  [dB], wyznaczone dla sygnałów zarejestrowanych w funkcji częstotliwości sygnału generowanego o amplitudzie  $A_{\text{gen}} = 6$  V

Na rys. 8.17 przedstawiono przykładowe wyniki analizy korelacyjnej generowanych i rejestrowanych sygnałów EA, uzyskane przy zastosowaniu funkcji koherencji. Wartość funkcji koherencji  $\Gamma(f)$  obliczono na podstawie zależności (8.9)[123].

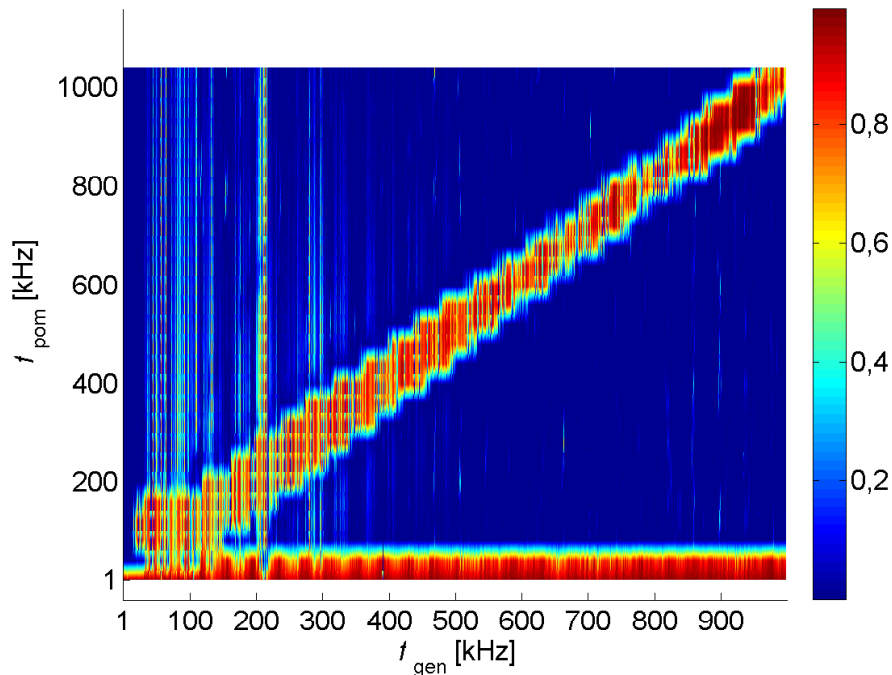
$$|\Gamma(f)|^2 = \frac{|P_{XY}(f)|^2}{P_{XX}(f)P_{YY}(f)} \quad (8.9)$$

gdzie:  $P_{XX}$  - widmo gęstości mocy sygnału generowanego,

$P_{YY}$  - widmo gęstości mocy sygnału rejestrowanego,

$P_{XY}$  - widmo wzajemne mocy sygnałów generowanego i rejestrowanego.

Na rys. 8.17 przedstawiono przebiegi funkcji koherencji wyznaczone dla sygnałów rejestrowanego i generowanego podczas emisji sygnałów o zmienianej częstotliwości w zakresie od 1 kHz do 1 MHz i amplitudzie  $A_{\text{gen}} = 6$  V. Przebiegi funkcji koherencji dla wszystkich rozpatrywanych amplitud przedstawiono w załączniku K.



Rysunek 8.17: Przebiegi funkcji koherencji  $|\Gamma(f)|^2$  sygnałów EA rejestrowanej przy wymuszeniu sinusoidalnym o zmienianej częstotliwości w zakresie (1-1000) kHz i amplitudzie  $A_{\text{gen}} = 6$  V czujnikiem WD umieszczonym w położeniu B (rys. 7.7)

Na podstawie uzyskanych zależności można stwierdzić, że sygnały EA są mocno skorelowane w paśmie częstotliwości w pobliżu częstotliwości sygnału generowanego, na co wskazuje koherencja bliska jedności. Natomiast w pozostałych przedziałach, w których wartość koherencji jest bliska zeru, sygnały nie są skorelowane. W przypadku analizowanych sygnałów EA może to wynikać m. in. z następujących powodów:

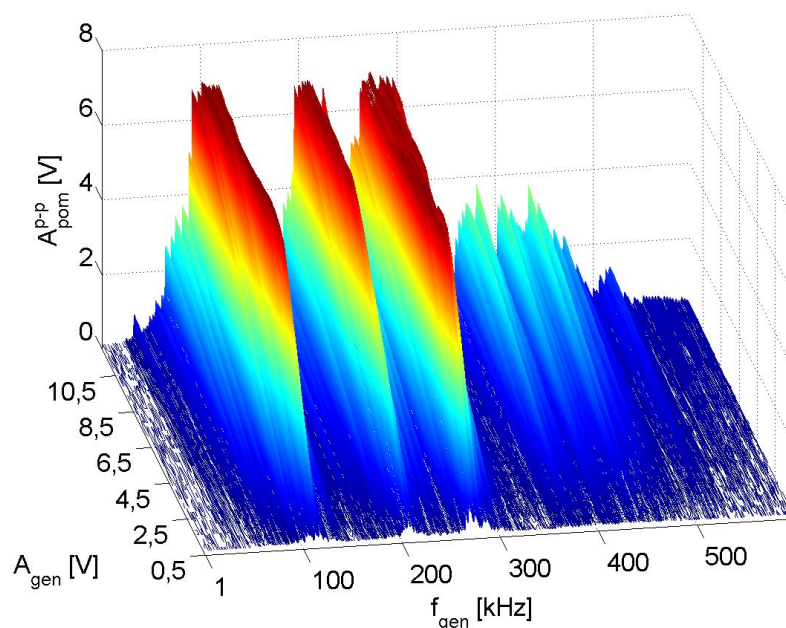
- droga propagacji fal EA wpływa w sposób nieliniowy na współzależność sygnałów rejestrowanych i generowanych,
- w układzie pomiarowym występują zakłócenia.

Na rys. 8.18- 8.22 zaprezentowano wykresy obrazujące zależność międzyszczytowej wartości sygnałów EA rejestrowanej przetwornikiem WD dla wybranych punktów pomiarowych w funkcji częstotliwości sygnałów generowanych. Sporządzono je w celu określenia zależności wartości międzyszczytowej sygnałów mierzonych  $A_{\text{pom}}^{\text{P-P}}$  od częstotliwości sygnałów generowanych  $f_{\text{gen}}$ , którą wyznaczono dla różnych amplitud i dla czterech miejsc umieszczenia czujnika pomiarowego. Na podstawie obliczonych zależności można określić wielkość tłumienia lub wzmocnienia sygnałów rejestrowanych w zależności od rozpatrywanej częstotliwości sygnału generowanego. Widoczne są silne wzmocnienia sygnałów w pobliżu częstotliwości rezonansowych. Dodatkowo można wyróżnić wzmocnienie w pobliżu harmonicznej  $f = 280$  kHz. Ponadto należy zauważyć, że podczas generacji sygnałów o amplitudzie powyżej 6 V w zakresie silnie wzmacnianych częstotliwości następuje przesterowanie wzmacniacza pomiarowego. W takim przypadku rzeczywista wartość amplitudy  $A_{\text{pom}}$  jest w zastosowanym układzie pomiarowym niemożliwa do określenia. Dlatego do dalszych badań i analiz<sup>2</sup> należy wykorzystać jedynie takie wartości sygnałów generowanych, dla których nie występowało przesterowanie wzmacniacza, czyli dla  $A_{\text{gen}} \leq 6$  V.

Analizując wykresy przedstawione na rys. 8.18 - 8.22 można stwierdzić, że dla badanych przypadków otrzymano podobne zależności.

---

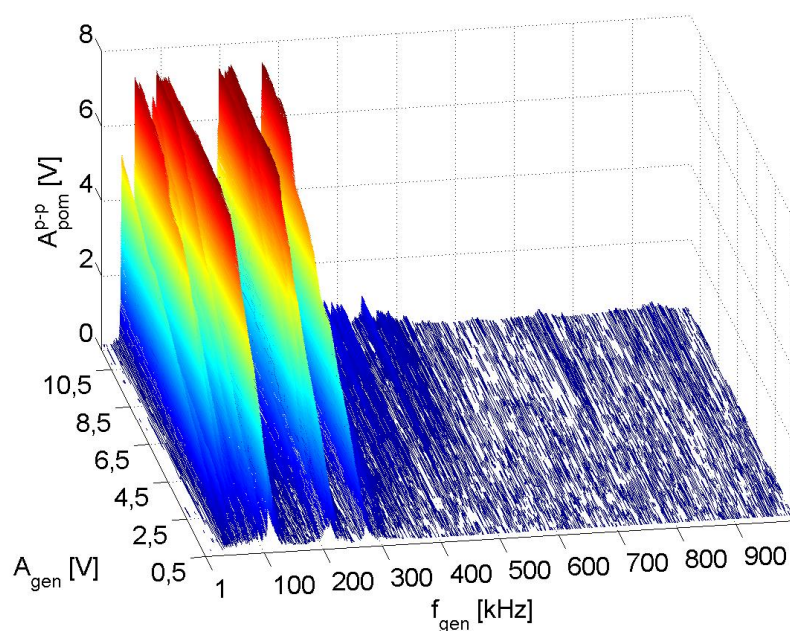
<sup>2</sup>Możliwości i kierunki dalszych badań zaprezentowano w rozdziale 11



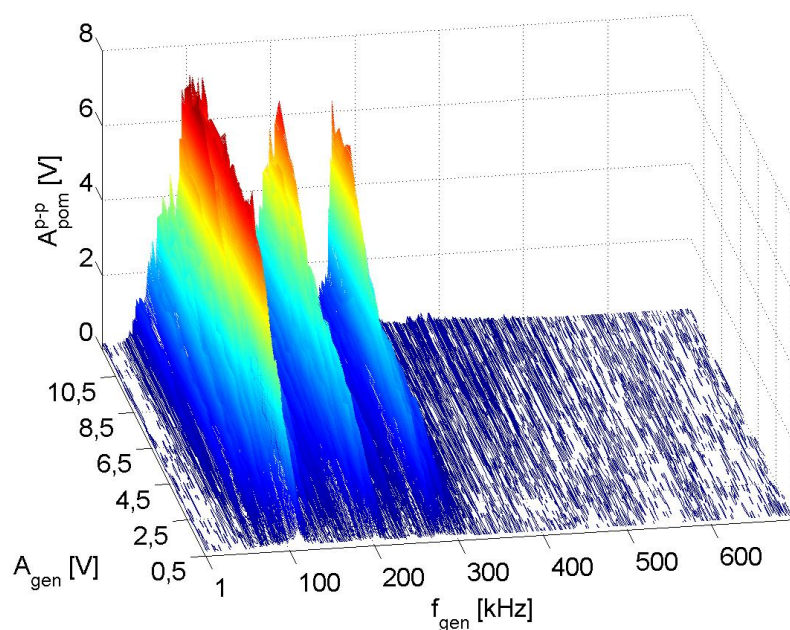
Rysunek 8.18: Międzyszczytowa wartość sygnałów EA rejestrowanej przetwornikiem WD umieszczonym wewnątrz kadzi w odległości 10 cm od generatora sinusoidalnej fali akustycznej (położenie A na rys. 7.7) w funkcji dwóch zmiennych: amplitudy sygnału generowanego  $A_{\text{gen}}$  i częstotliwości sygnału generowanego  $f_{\text{gen}}$

Amplituda sygnałów mierzonych na ścianie kadzi na wysokości generatora (położenia D i E), podczas emisji sygnałów EA o częstotliwościach rezonansowych, wzmacniana jest jednakowo, podczas gdy sygnały mierzone poza linią oleju (położenie F) mają dwukrotnie mniejszą amplitudę.

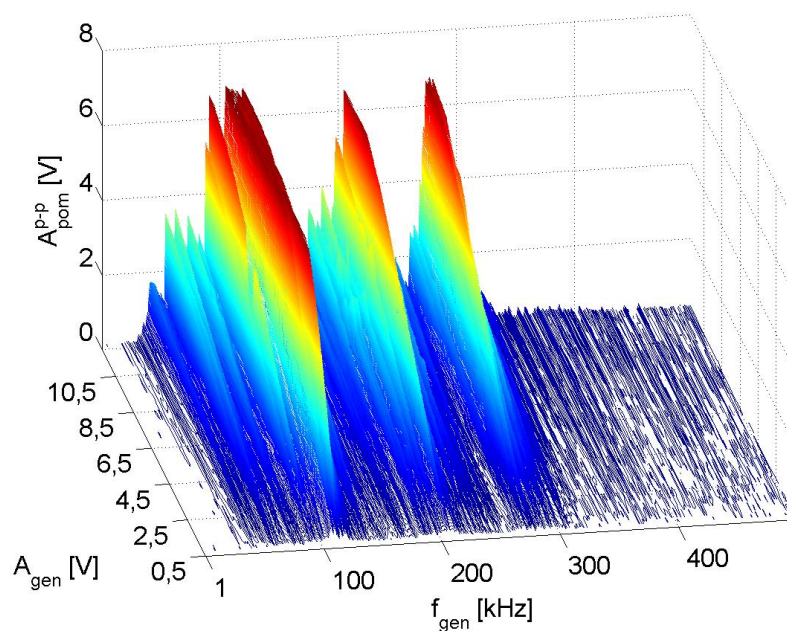
Podczas emisji fal EA z częstotliwością w paśmie od 350 kHz do 500 kHz następuje wzmocnienie sygnałów EA rejestrowanej wewnątrz kadzi (położenia A i B). Natomiast w przypadku rejestracji sygnałów EA na powierzchni kadzi tego typu wzmocnienia nie występowały. Zjawisko to wynika z silnego tłumienia wysokoczęstotliwościowych sygnałów EA w oleju.



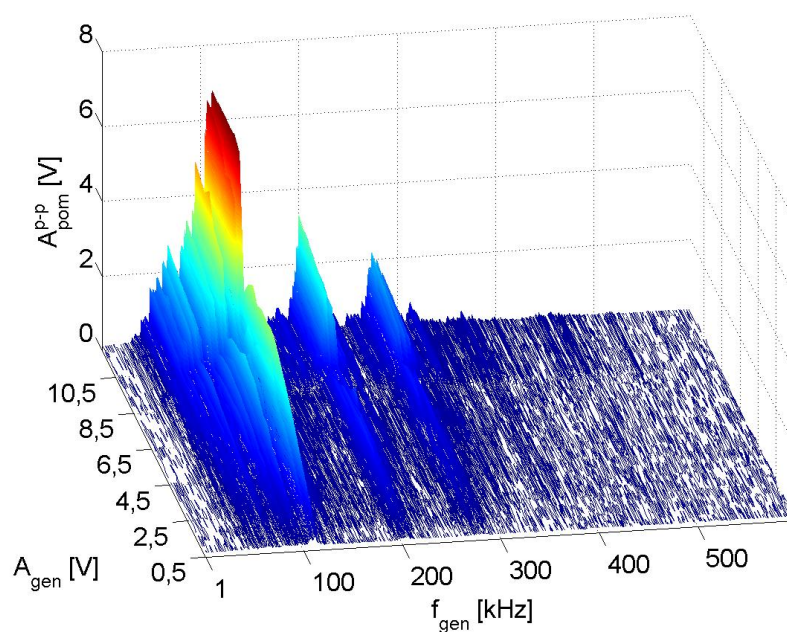
Rysunek 8.19: Międzyszczytowa wartość sygnałów EA rejestrowanej przetwornikiem WD umieszczonym wewnątrz kadzi w odległości 20 cm od generatora sinusoidalnej fali akustycznej (położenie B na rys. 7.7) w funkcji dwóch zmiennych: amplitudy sygnału generowanego  $A_{\text{gen}}$  i częstotliwości sygnału generowanego  $f_{\text{gen}}$



Rysunek 8.20: Międzyszczytowa wartość sygnałów EA rejestrowanej przetwornikiem WD umieszczonym na ścianie kadzi, położenie D na rys. 7.7, w funkcji dwóch zmiennych: amplitudy sygnału generowanego  $A_{\text{gen}}$  i częstotliwości sygnału generowanego  $f_{\text{gen}}$

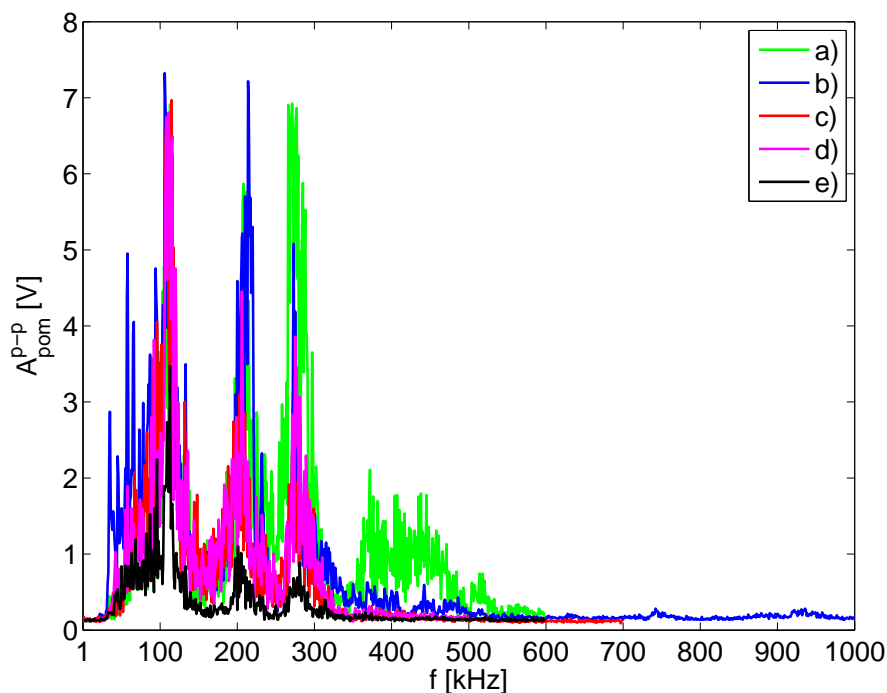


Rysunek 8.21: Międzyszczytowa wartość sygnałów EA rejestrowanej przetwornikiem WD umieszczonym na ścianie kadzi, położenie E na rys. 7.7, w funkcji dwóch zmiennych: amplitudy sygnału generowanego  $A_{\text{gen}}$  i częstotliwości sygnału generowanego  $f_{\text{gen}}$



Rysunek 8.22: Międzyszczytowa wartość sygnałów EA rejestrowanej przetwornikiem WD umieszczonym na ścianie kadzi poza linią oleju, położenie F na rys. 7.7, w funkcji dwóch zmiennych: amplitudy sygnału generowanego  $A_{\text{gen}}$  oraz częstotliwości sygnału generowanego  $f_{\text{gen}}$

W celu umożliwienia dokładniejszej oceny wizualnej, na rys. 8.23 przedstawiono wykresy zależności wartości międzyszczytowej sygnałów EA zarejestrowanej dla różnych miejsc pomiarowych w funkcji częstotliwości. Zależności wyznaczono dla jednej, wybranej amplitudy sygnału generowanego  $A_{\text{gen}} = 6$  V. Natomiast przebiegi wyznaczone dla wszystkich rozpatrywanych amplitud przedstawiono w załączniku L.



Rysunek 8.23: Zestawienie porównawcze wykresów przedstawiających międzyszczytową wartość sygnałów EA rejestrowanej przetwornikiem WD umieszczonym w różnych miejscach: a) położenie A, b) położenie B, c) położenie D, d) położenie E, e) położenie F

Dwukrotnie mniejszą amplitudą odznaczają się sygnały mierzone czujnikiem umieszczonym na ścianie kadzi poza linią oleju (położenie F). Umieszczony w miejscu oznaczonym literą F przetwornik nie rejestruje fal podłużnych docierających bezpośrednio z oleju, jak to ma miejsce w przypadku przetwornika umieszczonego w położeniach A, B, D i E, a jedynie fale poprzeczne, których propagacja następuje bezpośrednio po stalowej konstrukcji kadzi.

Dla każdego z rozpatrywanych przypadków widoczne są ekstrema dla częstotliwości około 100 kHz niezależnie od miejsca umieszczenia przetwornika. Natomiast sygnały o częstotliwościach około 200 kHz i 280 kHz wykazują



mniejszą amplitudę gdy mierzone są na ścianach kadzi. Wynika stąd, że sygnały EA o wyższych częstotliwościach ulegają wytłumieniu na drodze propagacji przechodząc przez olej elektroizolacyjny i stalową konstrukcję kadzi.

W ramach analiz zarejestrowanych sygnałów EA wyznaczono wartości współczynnika korelacji  $r$  (8.10)[12], określającego współzależność sygnałów rejestrowanych w różnych miejscach pomiarowych.

$$r_{jk} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_{ijk} - \bar{x}_{jk})(y_{ijk} - \bar{y}_{jk})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_{ijk} - \bar{x}_{jk})^2 \sum_{i=1}^n (y_{ijk} - \bar{y}_{jk})^2}} \quad (8.10)$$

gdzie:  $r_{jk}$  - współczynnik korelacji dla  $k$ -tej kombinacji pozycji pomiarowych (tab. 8.4) podczas generacji fal o stałej amplitudzie  $A_j$ ,

$x, y$  - uśrednione wartości międzyszczytowe zarejestrowane podczas generacji sygnału EA o stałej częstotliwości  $f_i$  i stałej amplitudzie  $A_j$   $k$ -tej kombinacji pozycji pomiarowych,

$i = (1, 2, \dots, 500)$  - liczba rozpatrywanych częstotliwości generowanego sygnału,

$j = (1, 2, \dots, 23)$  - liczba rozpatrywanych amplitud sygnału generowanego,

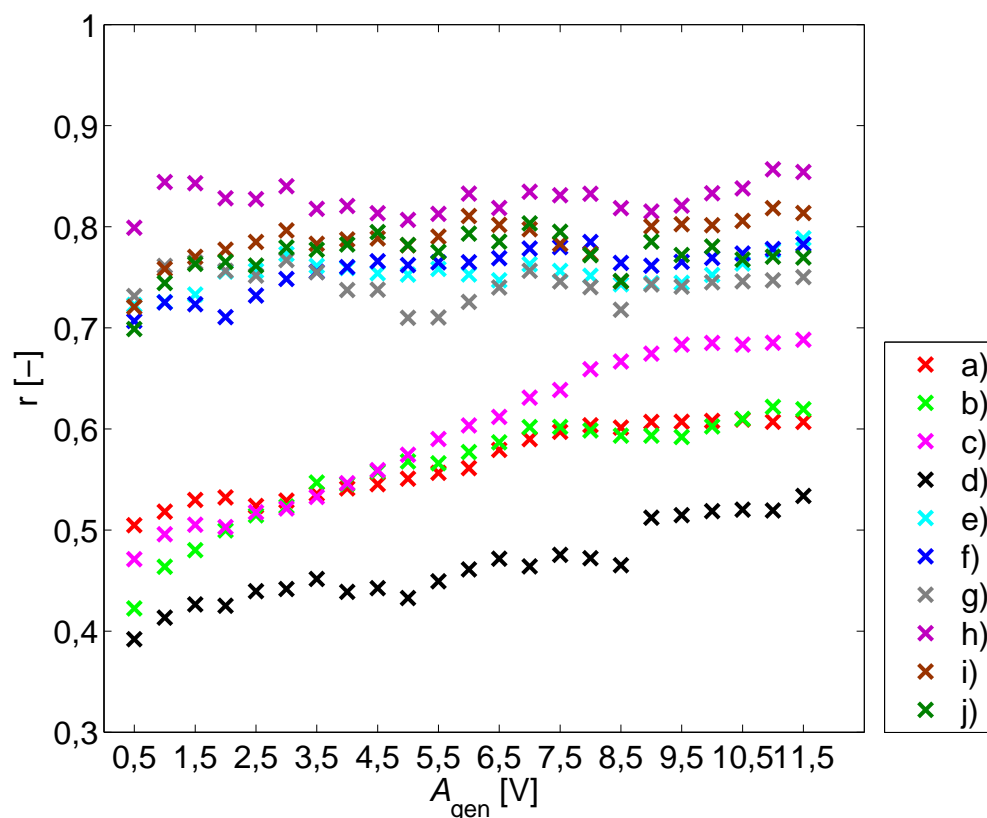
$k = (1, 2, \dots, 10)$  - liczba rozpatrywanych kombinacji pozycji pomiarowych.

W tab. 8.4 przedstawiono wszystkie kombinacje rozpatrywanych umiejscowień przetwornika pomiarowego, dla których wyznaczono współczynniki korelacji. Wartości współczynników wyznaczono dla uśrednionych wartości międzyszczytowych sygnałów zarejestrowanych dla 23 serii pomiarowych, podczas których emitowano fale EA o różnych amplitudach w zakresie od 0,5 V do 11,5 V i o różnych częstotliwościach w przedziale od 1 kHz do 500 kHz. Wartości wyznaczonych współczynników przedstawiono na rys. 8.24. Krzywe odnoszą się do współczynników obliczonych dla poszczególnych kombinacji jak podano w tab. 8.4. W tab. 8.4 podano średnie arytmetyczne  $\bar{r}_k$  obliczone według zależności (8.11).

$$\bar{r}_k = \sum_{j=1}^{23} r_{jk} \quad (8.11)$$

Tablica 8.4: Opis rozpatrywanych kombinacji położeń dla krzywych zilustrowanych na rys. 8.24 i wartości średnich arytmetycznych  $\bar{r}_k$

k	Krzywa	Rozpatrywane położenia	Wartość $\bar{r}_k$
1	a)	położenia A i B	0,57
2	b)	położenia A i D	0,56
3	c)	położenia A i E	0,60
4	d)	położenia A i F	0,46
5	e)	położenia B i D	0,75
6	f)	położenia B i E	0,76
7	g)	położenia B i F	0,74
8	h)	położenia D i E	0,83
9	i)	położenia D i F	0,79
10	j)	położenia E i F	0,77



Rysunek 8.24: Wartości współczynnika korelacji dla rozpatrywanych lokalizacji przetwornika pomiarowego. Krzywe (a-j) opisano w tab. 8.4

Wyraźną współzależność, która nie zależy od amplitudy generowanych fal EA, wykazują sygnały rejestrowane przetwornikiem umieszczonym na ścianach kadzi (położenia D, E, F) lub wewnątrz kadzi w odległości 20 cm od źródła (położenie B). Z uwagi na szerszy zakres przenoszonych częstotliwości sygnałów EA rejestrowanych w pobliżu źródła (położenie A) w stosunku do sygnałów mierzonych

w pozostałych miejscach, współzależność tych sygnałów jest średnia lub znaczna. Ponadto stwierdzono, że wraz ze wzrostem amplitudy sygnału generowanego wzrasta wartość współczynnika korelacji.

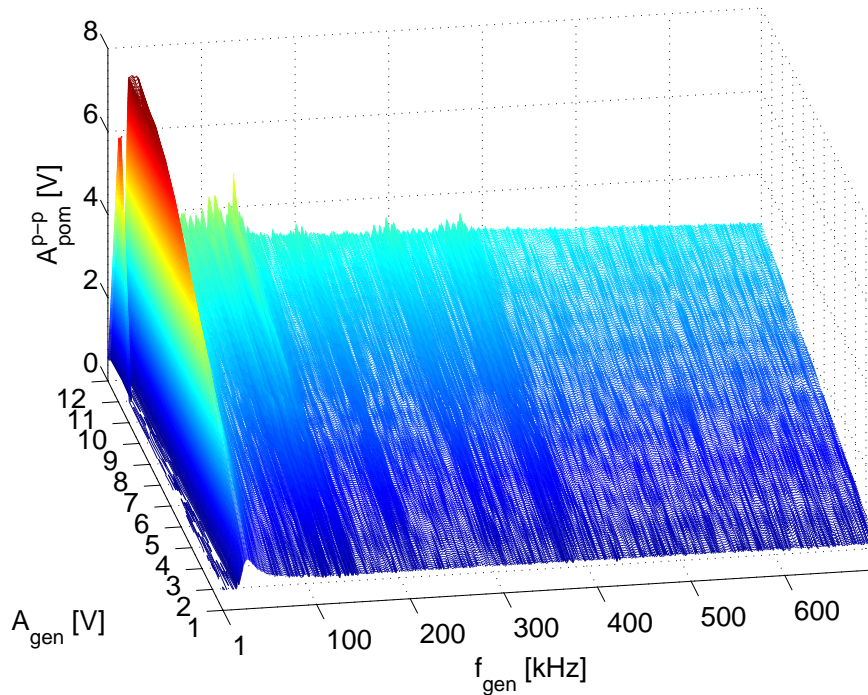
Wynika stąd, że w przypadku gdy przetwornik pomiarowy umieszczony jest na powierzchni kadzi to jego położenie względem źródła fal EA ma wpływ jedynie na amplitudę rejestrowanych sygnałów, nie ma natomiast wpływu na kształt przebiegu ich widm częstotliwościowych.

### **8.3 Określenie wpływu odległości między źródłem, a odbiornikiem na wartości wybranych parametrów sygnałów EA**

W celu określenia wpływu odległości między źródłem, a odbiornikiem sygnałów EA na wybrane parametry rejestrowanych sygnałów wykonano pomiary dla trzech odległości. Do generacji fal EA zastosowano przetwornik PIC155, który umieszczono w położeniu oznaczonym literą O na rys. 7.7. Do rejestracji sygnałów EA zastosowano również przetwornik PIC155, który umieszczano w położeniach A, B i C (rys. 7.7), co odpowiadało odległościom: 10 cm, 20 cm i 30 cm od źródła sygnału EA.

W trakcie trwania jednego pomiaru generowano sygnały sinusoidalne o stałej amplitudzie i stałej częstotliwości. Dla każdego z rozpatrywanych miejsc umieszczenia przetwornika pomiarowego i dla każdej z analizowanych wartości amplitud oraz częstotliwości generowanych sygnałów wykonano jeden pomiar. Rozpatrzono 12 wartości amplitud w zakresie od 1 V do 12 V, z gradacją 1 V i częstotliwości w paśmie od 1 kHz do 700 kHz, z gradacją co 1 kHz.

Na rys. 8.25 przedstawiono wykresy obrazujące zależność międzyszczytowej wartości sygnałów EA zarejestrowanej przetwornikiem PIC155 umieszczonym w położeniu B (rys. 7.7) w funkcji dwóch zmiennych: amplitudy sygnału generowanego  $A_{gen}$  i częstotliwości sygnału generowanego  $f_{gen}$ .



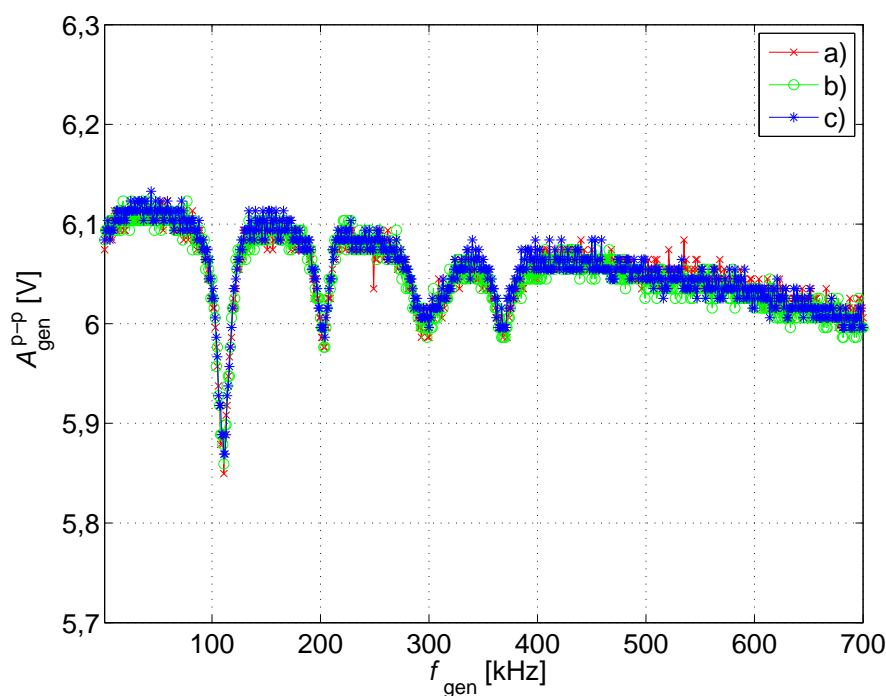
Rysunek 8.25: Międzyszczytowa wartość sygnałów EA, które rejestrowano przetwornikiem PIC155 umieszczonym w położeniu B (rys. 7.7) w funkcji dwóch zmiennych: amplitudy sygnału generowanego  $A_{gen}$  i częstotliwości sygnału generowanego  $f_{gen}$

Na podstawie wykreślonych zależności można stwierdzić, że w paśmie (90-700) kHz amplituda sygnałów utrzymuje się na stałym poziomie. Silne wzmocnienia sygnałów, które dla dużych amplitud generowanego sygnału ( $A_{gen} \geq 9V$ ) powodują przesterowanie zastosowanego wzmacniacza, występują w paśmie częstotliwości poniżej 70 kHz. Na podstawie analizy wykresów na rys. 8.25 i 8.19 można stwierdzić, że przetwornik PIC155 posiada lepsze właściwości przetwarzania sygnałów w szerokim paśmie częstotliwości (powyżej 90 kHz) w porównaniu z przetwornikiem WDAH-17 i dlatego zastosowano go do dalszych badań i analiz. Ponadto stwierdzono, że sygnały o relatywnie niskich amplitudach generacji ( $A_{gen} \leq 6V$ ) nie powodują przesterowania wzmacniacza. Dlatego do analiz wybrano wartość amplitudy generowanego sygnału równą 3 V.

Na rys. 8.26 przedstawiono międzyszczytowe wartości sygnałów EA generowanej przez przetwornik PIC155 umieszczony w położeniu oznaczonym literą O (rys. 7.7), w funkcji częstotliwości sygnałów generowanych ze stałą amplitudą równą 3 V. Zobrazowane krzywe odpowiadają pomiarom dla trzech rozpatrywanych odległości między źródłem a odbiornikiem. Na podstawie wyznaczonej wartości

współczynnika korelacji  $r = 0,98$ , który obliczono wg. zależności (5.25) dla sygnałów generowanych w trzech pomiarach (dla trzech odległości) i w oparciu o przedstawione wykresy można stwierdzić, że generowane sygnały są jednakowe we wszystkich trzech przypadkach.

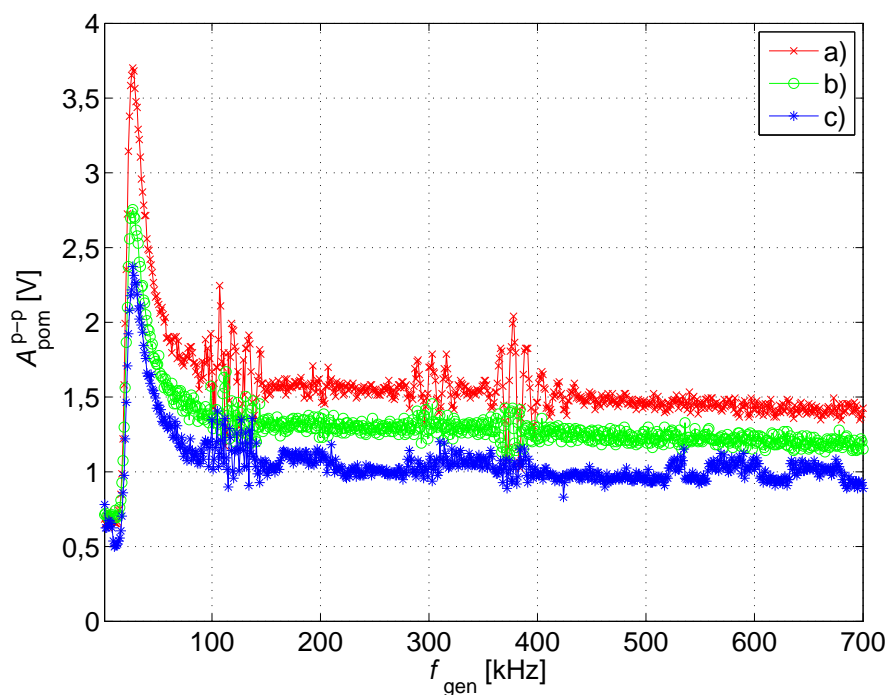
Ponadto, na podstawie wykreślonych zależności można stwierdzić, że międzyszczytowa wartość sygnałów generowanych jest relatywnie stała w całym analizowanym paśmie, tj. (1-700) kHz i przyjmuje wartości w zakresie (5,85-6,14) V. Niewielkie spadki amplitudy (0,5-1) V występują przy częstotliwościach rezonansowych zastosowanego przetwornika, tj. dla częstotliwości sygnałów generowanych odpowiednio:  $f_{\text{gen}} = \{110, 200, 300, 380\}$  kHz. Wartość międzyszczytowa sygnałów generowanych fluktuuje w pobliżu częstotliwości rezonansowych. Natomiast dla sygnałów generowanych z częstotliwością powyżej 400 kHz wartość międzyszczytowa sygnału maleje wraz ze zwiększającą się częstotliwością sygnału i równa jest około 9 V dla  $f_{\text{gen}} = 700$  kHz.



Rysunek 8.26: Międzyszczytowe wartości sygnałów generowanych przetwornikiem PIC155 umieszczonym w położeniu O (rys. 7.7) w funkcji częstotliwości sygnału generowanego  $f_{\text{gen}}$

Na rys. 8.27 przedstawiono międzyszczytowe wartości sygnałów EA rejestrowanej przez przetwornik PIC155, który umieszczano w trzech

rozpatrywanych położeniach, tj.: A, B i C (rys. 7.7), w funkcji częstotliwości sygnału generowanego ze stałą amplitudą równą 3 V. Na wykresach można zaobserwować fluktuacje wartości międzyszczytowej sygnałów rejestrowanych przy częstotliwościach rezonansowych. Ponadto zaobserwowano spadek amplitudy wraz ze wzrostem częstotliwości generowanego sygnału o około (0,1-0,2) V, który prawdopodobnie związany jest z malejącą wartością amplitudy sygnału generowanego w funkcji częstotliwości.



Rysunek 8.27: Międzyszczytowe wartości sygnałów EA, które zarejestrowano przetwornikiem PIC155 umieszczonym w położeniach A (a), B (b) i C (c) w funkcji częstotliwości sygnału generowanego  $f_{\text{gen}}$

## Rozdział 9

---

# Weryfikacja symulacji numerycznych z wynikami pomiarów laboratoryjnych

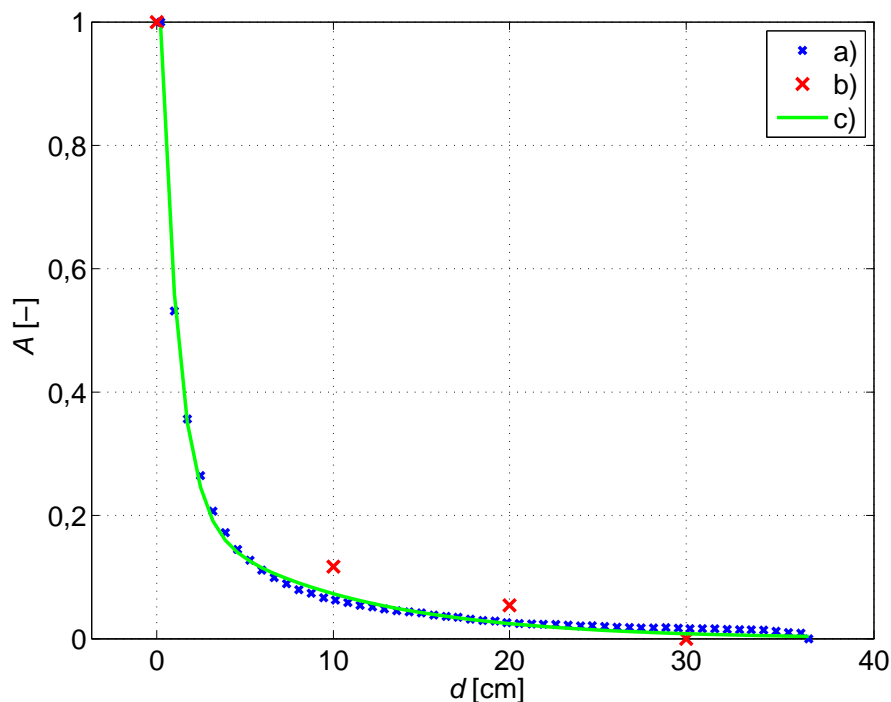
---

Wyniki obliczeń numerycznych uzyskane dla symulacji opisanych w rozdz. 6.3 zweryfikowano z rezultatami obliczeniowymi dla pomiarów laboratoryjnych, które przedstawiono w rozdz. 8.3. Wyniki weryfikacji, które zostaną omówione w niniejszym rozdz. opublikowano w pracach [127, 128].

Na rys. 9.1 przedstawiono wykres ilustrujący wyniki obliczeń numerycznych i międzyszczytowe wartości amplitudy fal EA zarejestrowanej umieszczonym wewnątrz kadzi przetwornikiem PIC155 dla trzech odległości od źródła, czyli w położeniach: A, B i C (rys.7.7) i krzywą funkcji regresji, której procedurę wyznaczenia opisano w dalszej części rozdziału. Na osi rzędnych podana jest odległość od źródła. Natomiast na osi odciętych zawarto znormalizowane względem wartości maksymalnej: amplitudy ciśnienia akustycznego  $p$  [Pa] (a) uzyskanego w symulacji i amplitudy sygnałów mierzonych  $A_{pom}$  [V] (b) uzyskane w pomiarach laboratoryjnych. Zaprezentowane wyniki symulacji dotyczą wartości ciśnienia akustycznego obliczonych na odcinku<sup>1</sup>  $\overline{AB}$ , gdzie  $A=(0 ; 0,3)$  m,  $B=(0,05 ; 0,3)$  m w dwuwymiarowym modelu kadzi przedstawionym na rys. 6.6.

---

<sup>1</sup>Odcinek  $\overline{AB}$  odpowiada prostej, na której w fizycznym modelu kadzi umieszczano na trzech analizowanych odległościach od źródła przetwornik piezoelektryczny rejestrujący sygnały EA.



Rysunek 9.1: Zależność znormalizowanej względem wartości maksymalnej amplitudy fal EA w funkcji odległości od źródła generacji fal EA: a) dane symulacyjne, b) dane empiryczne, c) model matematyczny dla danych symulacyjnych

Wyniki pomiarów laboratoryjnych i wyniki obliczeń symulacji i znormalizowane względem wartości maksymalnej amplitudy zestawiono w tab. 9.1. Należy zwrócić uwagę, że wyznaczone zależności w funkcji odległości zależą od częstotliwości generowanych fal. Oznacza to, że ich liczbowe wartości będą ulegały zmianie w zależności od długości emitowanych fal EA.

Tablica 9.1: Wartości amplitudy sygnałów EA zmierzonej dla trzech odległości

Odległość [cm]	Znormalizowane wartości		Oryginalne wartości	
	Symulacja [-]	Pomiar [-]	Symulacja [kPa]	Pomiar [V]
0	1,00	1,00	3,09	6,01
10	0,06	0,12	0,21	1,71
20	0,03	0,05	0,10	1,40
30	0,00	0,00	0,07	1,14

Dodatkowo wyznaczono model matematyczny w postaci funkcji regresji, za pomocą której można aproksymować zmiany amplitudy symulowanych sygnałów EA w zależności od odległości między źródłem, a odbiornikiem fal. W procesie



estymacji wykorzystano wykładniczy model funkcji regresji. Postać estymaty funkcji regresji  $\hat{y}(t)$  opisano równaniem (9.1).

$$\hat{y}(t) = ae^{bt} + ce^{dt} \quad (9.1)$$

gdzie:  $\hat{y}$  - aproksymata funkcji regresji,

$a, b, c, d$  - estymaty parametrów strukturalnych,

$t$  - zmienna niezależna, czas.

Parametry strukturalne funkcji regresji  $a - d$  oszacowano przy zastosowaniu metody MNK. Wartości parametrów  $a - d$ , które obliczono dla 95% poziomu ufności i wartości granic górnej i dolnej dla przedziałów ufności zestawiono w tab. 9.2.

Tablica 9.2: Wartości estymat parametrów strukturalnych funkcji regresji i granice przedziałów dla poziomu ufności 95 %

Estymaty parametrów strukturalnych funkcji regresji				
Parametr	a	b	c	d
Estymata	1,67	-0,76	0,22	$-7,54e^{-2}$
Górna granica	1,75	-0,71	0,25	$-8,26e^{-2}$
Dolna granica	1,59	-0,81	0,20	$-6,82e^{-2}$

Określono następujące parametry, których wartości mogą posłużyć jako wskaźniki dopasowania estymaty funkcji regresji do danych empirycznych:

- współczynnik zmienności nie wyjaśnionej przez regresję określony zależnością (8.3),
- współczynnik determinacji określony zależnością (8.4).

Wartości wskaźników dopasowania estymaty funkcji regresji do wartości wyznaczonych symulacyjnie zestawiono w tab. 9.3.

Tablica 9.3: Wartości wskaźników dopasowania estymaty funkcji regresji do wartości wyznaczonych symulacyjnie

Wartości wskaźników dopasowania		
Parametr	SSE	$R_2$
Wartość	$3,62e^{-3}$	0,997

Ponadto określono liczbową współzależność między danymi empirycznymi  $y_i = A_{\text{pom}}(i)$  (9.1), a estymatami modelu  $\hat{y}(i)$  obliczonymi dla wyników symulacji. Wyznaczono współczynnik korelacji  $r$  określonej równaniem (5.25). Wartość współczynnika korelacji wynosi  $r = 0,99$ . Na podstawie wyników testu t-Studenta potwierdzono istotność tego współczynnika z prawdopodobieństwem  $p = 1,1e^{-3}$ .

Na podstawie przedstawionych wykresów i obliczonej wartości współczynnika korelacji  $r$  można stwierdzić, że wyniki symulacji numerycznej zostały pozytywnie zweryfikowane za pomocą danych empirycznych uzyskanych w pomiarach laboratoryjnych. Autorzy pracy [53] otrzymali podobne wyniki analiz.

## Rozdział 10

---

# Wnioski

---

Na podstawie przeprowadzonych badań i analiz, których wyniki przedstawiono w niniejszej rozprawie można sformułować następujące wnioski:

- możliwe jest opracowanie modeli matematycznych opisujących obwiednie sygnałów EA generowanej przez podstawowe formy WNZ, jakie mogą występować w izolacji papierowo-olejowej. Przy czym bazując na wynikach analizy porównawczej wyznaczonych wartości współczynników determinacji, stwierdzono, że model typu sigmoidalno-wykładniczego (SW) osiąga średnio najwyższy wskaźnik dopasowania wartości estymowanych do wartości empirycznych,
- możliwe jest zdefiniowanie modelu matematycznego źródła fal EA generowanej przez wybrane klasy WNZ i określenie jego parametrów w taki sposób, aby odpowiadał on rzeczywistym sygnałom EA od WNZ zarejestrowanym w pomiarach laboratoryjnych,
- wielkość pojedynczego elementu siatki dyskretyzującej ma istotny wpływ na uzyskiwane wyniki obliczeń numerycznych. Zastosowanie pięciu elementów na jedną długość fali powoduje optymalizację czasu trwania symulacji i uzyskanie względnie dokładnych wyników,
- możliwe jest określenie czasoprzestrzennych rozkładów ciśnienia akustycznego w modelu numerycznym kadzi wypełnionej olejem

elektroizolacyjnym, wewnątrz której umieszczono jedno lub kilka zamodelowanych źródeł fal EA,

- możliwe jest zastosowanie przetwornika piezoelektrycznego PIC155 do generacji fal EA o zadanych parametrach w modelu kadzi wypełnionej olejem elektroizolacyjnym i jego wykorzystanie do badań zjawisk towarzyszących propagacji sygnałów EA w różnych dielektrykach i układach izolacyjnych,
- przy wymuszeniu impulsowym zachodzi liniowa zależność między amplitudami sygnałów rejestrowanego i generowanego. Opracowane modele liniowe opisują zdecydowaną większość zależności zmiennej zależnej, którą jest amplituda sygnałów rejestrowanych. W przypadku jednego okresu sinusoidy amplituda wzrasta z gradientem równym 0,44 V/V, natomiast dla skoku jednostkowego z gradientem równym odpowiednio 0,16 V/V,
- kształty pierwszej serii fal EA docierających bezpośrednio od źródła do odbiornika są takie same niezależnie od rodzaju rozpatrywanego wymuszenia impulsowego. Możliwe jest opracowanie modelu matematycznego w postaci sumy funkcji Gaussowskich, który jednoznacznie opisuje te sygnały. Wyznaczone średnie wartości współczynnika korelacji obliczone dla dziesięciu analizowanych przebiegów sygnałów zarejestrowanych zarówno dla wymuszeń jednym okresem sinusoidy jak również skokiem jednostkowym, które są równe odpowiednio  $r_{okres} = 0,99$  i  $r_{skok} = 0,93$ , wskazują na bardzo dużą współzależność, a tym samym dobre dopasowanie estymat funkcji regresji do danych empirycznych, co jest spełnione niezależnie od wartości amplitudy sygnału generowanego,
- na podstawie analizy porównawczej struktur czasowo-częstotliwościowych obliczonych dla sygnałów EA rejestrowanej przy wymuszeniu jednym okresem sinusoidy i skokiem jednostkowym stwierdzono, że:
  - dla wymuszenia sinusoidalnego uzyskuje się obrazy czasowo-częstotliwościowe o dłuższym czasie trwania w porównaniu do wymuszenia skokiem jednostkowym, które dodatkowo nie zawierają struktur wysokoczęstotliwościowych

- niezależnie od typu wymuszenia dla amplitudy sygnałów generowanych powyżej 9 V widoczne jest, w postaci szerokopasmowego impulsu, przesterowanie zastosowanego podczas pomiarów wzmacniacza. Impuls ten występuje w pierwszej serii fal EA, które dochodzą do przetwornika bezpośrednio od generatora i nie zawierają sygnałów odbitych od ścian kadzi,
- na podstawie rezultatów uzyskanych przy generacji sygnałów sinusoidalnych w zakresie częstotliwości od 1 kHz do 1 MHz, możliwe było określenie częstotliwości rezonansowych zastosowanego przetwornika PIC155. Odpowiadają one wartościom uzyskanym na podstawie pomiaru impedancji metodą oscyloskopową. Możliwe było także wykazanie różnic w widmach amplitudowych sygnałów zarejestrowanych przez dwa typy przetworników piezoelektrycznych dla takich samych generowanych sygnałów EA i mierzonych w takich samych warunkach metrologicznych,
- analizując przebiegi czasowe i widma amplitudowe sygnałów EA rejestrowanych w różnych miejscach wewnątrz i na powierzchni kadzi stwierdzono, że sygnały zmierzone na powierzchni kadzi (powyżej linii oleju) mają najmniejszą amplitudę w porównaniu z sygnałami odbieranymi w innych miejscach kadzi. Ponadto stwierdzono, że sygnały wysokoczęstotliwościowe o niskiej amplitudzie ulegają prawie całkowitemu wytłumieniu w oleju izolacyjnym i praktycznie nie dochodzą do ścian kadzi,
- miejsce umieszczenia przetwornika pomiarowego na powierzchni kadzi ma istotny wpływ na wartość amplitudy rejestrowanych sygnałów EA, nie ma natomiast wpływu na kształt przebiegów ich widm częstotliwościowych i zakresów dominujących częstotliwości,
- poddając weryfikacji rezultaty obliczeń numerycznych z wynikami uzyskanymi podczas pomiarów laboratoryjnych opracowano model matematyczny opisujący zjawisko tłumienia fal EA w funkcji odległości między źródłem emisji, a miejscem rejestracji, dla izolacji olejowej. Ponadto wykazano dużą współzależność porównywanych sygnałów.

Przedstawione wyniki pomiarów i symulacji potwierdzają tezę, że zaproponowany model matematyczny i koncepcja wykorzystania układu z przetwornikiem piezoelektrycznym umożliwiają symulację sygnałów EA generowanej przez wybrane klasy WNZ, jakie mogą występować w izolacji olejowej urządzeń elektroenergetycznych oraz badanie mechanizmów propagacji emitowanych fal EA.

## Rozdział 11

---

# Podsumowanie

---

Na podstawie wyników prac naukowo - badawczych uzyskanych podczas realizacji niniejszej rozprawy wykazano, że opracowany model matematyczny i zaproponowany układ z przetwornikiem piezoelektrycznym umożliwiają symulację sygnałów EA generowanej przez wybrane klasy WNZ, które mogą występować w izolacji olejowej urządzeń elektroenergetycznych i w konsekwencji badanie zjawisk związanych z propagacją fal EA bez konieczności wykorzystywania układów probierczych wysokiego napięcia.

Zaprojektowany i wykonany w sposób praktyczny układ pozwala na generację fal EA o dowolnym kształcie, amplitudzie do 12 V i częstotliwości w przedziale od 1 kHz do 1 MHz. Natomiast opracowany numeryczny model kadzi umożliwia wykonanie szczegółowej oceny wpływu poszczególnych parametrów drogi propagacji sygnałów EA na uzyskiwane wyniki pomiarów.

W trakcie wykonywania badań i analiz w ramach realizacji niniejszej rozprawy stwierdzono kilka problemów, których rozwiązanie wykracza poza jej zakres, a które zadaniem autora wymagają w przyszłości ich szczegółowego rozpatrzenia. Poniżej przedstawiono możliwe kierunki prowadzenia dalszych prac badawczych, które związane są z tematyką podjętą w rozprawie.

Podstawowym celem rozprawy było zdefiniowanie modelu matematycznego fali EA, która odpowiada sygnałom EA generowanej przez podstawowe formy

WNZ, które występują w układach izolacyjnych urządzeń elektroenergetycznych. W pracy zaproponowano model matematyczny dla źródła sygnału EA od WNZ i określono model matematyczny obwiedni sygnałów EA od WNZ dla wybranych klas. W dalszym kroku należy zoptymalizować parametry wykorzystanych funkcji matematycznych w układzie regulacyjnym, który można zaimplementować np. w środowisku MATLAB/SIMULINK, w taki sposób aby emitowana przez przetwornik piezoelektryczny fala EA możliwie najdokładniej odzwierciedlała rzeczywistą falę EA od WNZ. W proponowanym układzie regulacji funkcję celu może stanowić minimalna wariancja lub największy współczynnik korelacji dwóch sygnałów, przy czym jednym z nich będzie wynik pomiaru obwiedni sygnału EA od WNZ zarejestrowanego w układzie modelującym WNZ zasilanym wysokim napięciem. Natomiast drugi z sygnałów będzie obwiednią akustycznej odpowiedzi dla optymalizowanego modelu fali EA.

Proponowanym kierunkiem prowadzenia dalszych badań jest również wyznaczenie wartości parametrów opracowanego modelu źródła fal EA i określenie współzależności między nimi dla sygnałów EA generowanej przez pozostałe klasy WNZ.

Zakres pracy doktorskiej obejmował opracowanie modelu numerycznego kadzi, która została wypełniona olejem izolacyjnym. Jednak zaproponowany model zawiera wiele ograniczeń. Dlatego w ramach kierunków dalszych badań proponuje się rozbudowanie modelu kadzi transformatora o dodatkowe elementy, które występują w rzeczywistych obiektach i uwzględnienie w prowadzonych symulacjach komputerowych dodatkowych zjawisk, np. wpływu temperatury i tłumienia wynikającego z lepkości oleju. W tym celu niezbędne jest wykorzystanie sprzętu komputerowego o odpowiednio dużej mocy obliczeniowej i wielkości pamięci. Można do tego celu wykorzystać np. klastry komputerowe.

Na podstawie analizy uzyskanych wyników stwierdzono, że amplituda serii fal EA docierających bezpośrednio do przetwornika umieszczonego wewnątrz kadzi wypełnionej olejem i rejestrującego te sygnały zależy w sposób liniowy od wartości napięcia generowanego, niezależnie od rodzaju badanego wymuszenia



impulsowego. Dlatego można podjąć próbę zidentyfikowania układu jako całości z wykorzystaniem liniowego modelu typu Output Error (OE). Jako układ można potraktować model kadzi wypełnionej olejem elektroizolacyjnym wraz z przetwornikami i pozostałymi elementami stanowiska pomiarowego.

W ramach badań podjęto próbę określenia funkcji przejścia opisanego wyżej układu przy pomocy liniowego modelu typu OE. Wyniki tych badań opublikowano w pracy [148]. Wyznaczona funkcja przejścia została zweryfikowana dla obu badanych typów wymuszeń impulsowych, nie znalazła jednak potwierdzenia dla wymuszeń o kształcie sinusoidalnym. Taki wynik pozwolił na stwierdzenie, że cały układ należy traktować jako nieliniowy i dlatego w procesie identyfikacji należy zastosować nieliniowy model, np. model nieliniowy Hammerstein-Wienera.

Badania, podczas których generowano sygnały EA o charakterze impulsowym można rozszerzyć o dodatkowe typy wymuszeń, np. sygnał prostokątny lub trójkątny, a w przypadku jednego okresu sinusoidy o inną wartość generowanej częstotliwości.

Na podstawie analizy sygnałów EA zarejestrowanej przez dwa typy przetworników piezoelektrycznych wykazano różnice w obliczonych przebiegach widm częstotliwościowych, które uzyskano przy tym samym wymuszeniu. Ciekawym z punktu widzenia poznawczego może okazać się określenie wpływu rodzaju przetwornika rejestrującego na uzyskiwane wyniki pomiarów.

W ramach wykonywanych badań nie przeprowadzono analizy powtarzalności uzyskiwanych wyników badań. Dlatego w ramach dalszych prac należy przeprowadzić pomiary zmierzające do określenia powtarzalności i odtwarzalności uzyskiwanych wyników.

---

# Spis literatury

---

- [1] A. A. Pollock. Acoustic emission. A review of recent progress and technical aspects. *Acoustics and vibration progress*, vol. 1, chap. 2, pp. 51–84. 1974.
- [2] I. Malecki. Rozwój historyczny badań emisji akustycznej. J. Ranachowski I. Malecki, edytor, *Emisja akustyczna. Źródła, metody, zastosowania*. IPPT-PAN, 1994.
- [3] F. Witos. *Badania wyladowań niezpełnych metodą emisji akustycznej i metodą elektryczną*. Wyd. Pol. Śl., 2008.
- [4] K. Abus-Nawrat, J. Skubis. Emisja akustyczna w urządzeniach elektroenergetycznych. J. Ranachowski, I. Malecki, edytor, *Emisja akustyczna. Źródła, metody, zastosowania*. IPPT-PAN, 1994.
- [5] T. Boczar, S. Borucki, A. Cichoń. *Dobór parametrów sygnałów emisji akustycznej od wyladowań niezpełnych dla potrzeb systemu eksperckiego*. Of. Wyd. PO, 2009.
- [6] R. W. B. Stephens, A. A. Pollock. Waveform and frequency spectra of acoustic emissions. *J. Acoust. Soc. Am.*, 49(1A):110–110, 1971.
- [7] L. Bolin. A model for estimating the signal from an acoustic emission source. *Ultrason.*, 17(2):67–70, 1979.
- [8] J. Skubis. *Emisja akustyczna w badaniach izolacji urządzeń elektroenergetycznych*. IPPT-PAN, 1993.
- [9] T. Boczar, S. Boruski, A. Cichoń, M. Lorenc. The analysis of the influence of physicochemical parameters of insulation oils and the speed of oil flow on the interpretation of the measurement results of PD by the AE method. *Mol. Qua. Acou.*, 26:45–54, 2005.

- [10] T. Boczar. Identification of a specific type of PDs form AE frequency spectra. *IEEE Trans. on Dielect. and El. Ins.*, 8(4):598–606, 2001.
- [11] T. Boczar. Identification on fundamental forms of PDs based of the results of frequency analysis of their AE. *J. of AE*, 17(3):S7–S12, 1999.
- [12] T. Boczar. *Możliwości zastosowania do opisu sygnałów emisji akustycznej od wylądowań niezupełnych analizy statystycznej i cyfrowych metod przetwarzania sygnałów*. Of. Wyd. PO, 2003.
- [13] T. Boczar. *Obiektywizacja wyników akustycznej metody oceny wylądowań niezupełnych przy zastosowaniu do opisu sygnałów analizy statystycznej i cyfrowych metod przetwarzania*. Of. Wyd. PO, 2003.
- [14] T. Boczar. *Widma emisji akustycznej generowanej przez wylądowania niezupełne w izolacji olejowej*. Of. Wyd. PO, 2000.
- [15] T. Boczar, S. Borucki. The influence of the temperature of insulation oil on the results of measurements of the acoustic emission signals generated by partial discharges. *J. de Phys. IV Proces.*, pp. 89–93, 2005.
- [16] A. Cichoń, S. Borucki. Determining the influence of the kind of transformer oil on the measurement results of partial discharges obtained by using the acoustic emission method. *Proces. of IV Int. Conf. NEET*, pp. 30–32, 2005.
- [17] A. Cichoń, S. Borucki. The influence of propagation layers on the measurement results of electrical discharges measured by the acoustic emission method. *Proces. of IV Int. Conf. NEET*, pp. 23–26, 2005.
- [18] T. Boczar, A. Cichoń. Comparative analysis of acoustic emission signals generated by electrical discharges measured by the hydrophone and the wideband contact transducer. *J. de Phys. IV Proces.*, pp. 93–97, 2005.
- [19] S. Borucki, A. Cichoń. The influence of a multilayer paper-oil insulation of power transformers on the measurement results of PDs measured by the AE method. *Phy. and Chem. of Sol. State*, 7(1):160–166, 2006.
- [20] S. Borucki, A. Cichoń. The influence of physicochemical parameters of transformer oil on the time-frequency analysis results of the acoustic emission signals generated by partial discharges. *Phy. and Chem. of Sol. State*, 7(3):589–592, 2006.

- [21] A. Cichoń. Wpływ przegród izolacyjnych transformatora na wyniki pomiarów emisji akustycznej generowanej przez wyładowania niezupełne. *Energetyka - ZT nr VI Konf. Nauk. - Tech. Transf. w ekspl.*, str. 107–109, 2005.
- [22] B. Kucharska. Akustyczne deskryptory sygnałów emitowanych przez wyładowania niezupełne powierzchniowe. *ZN PO, Elektryka*, 219(44):107–124, 1996.
- [23] B. Kucharska. Parametry emisji akustycznej emitowanej przez wyładowania niezupełne. Rozprawa doktorska, Pol. Śl., Gliwice, 2005.
- [24] M. Lorenc. Określenie deskryptorów EA generowanej przez wzorcowe impulsy mechaniczne. *ZN PO*, 219(96):125–136.
- [25] A. Cichoń, M. Lorenc. Określenie wpływu wielkości przepływu oleju elektroizolacyjnego w modelu kadzi transformatora na wybrane deskryptory emisji akustycznej generowanej przez wyładowania niezupełne. *Energetyka - ZT nr VI Konf. Nauk. - Tech. Transf. w ekspl.*, str. 109–112, 2005.
- [26] H. Ziegler, J. Skubis, A. Włóczyk. Analiza zakłóceń towarzyszących detekcji WNZ metodą EA. *ZN, Elektryka, Of. Wyd. PO*, 39(201):195–225, 1995.
- [27] J. Skubis. *Nowoczesne metody diagnostyczne układów izolacyjnych transformatorów energetycznych*. IPPT-PAN, 1998.
- [28] T. Boczar, J. Skubis. Spectrum of acoustic emission pulses generated by electric sidle surface discharges in oil. *Arch. El. Eng.*, XLVII(1):25–38, 1998.
- [29] Z. Gacek. *Wysokonapięciowa technika izolacyjna*. Of. Wyd. Pol. Śl., 1996.
- [30] J. Goliński. Powstawanie i rozwój WNZ powierzchniowych. *IV Sym. Pr. WNZ w ukl. elektroizol.*, str. 101–108, 1983.
- [31] A. Krivda, F. H. Hreuger, H. Gulski. Classification of PD. *IEEE-El*, 28(6):917–931, 1993.
- [32] W. Lidmanowski. *Zarys teorii wyładowań w dielektrykach*. WNT, 1998.
- [33] H. Mościcka-Grzesiak. *Inżynieria wysokich napięć w elektroenergetyce*, Vol. 1. Wyd. PP, 1996.
- [34] Z. Szczepański. *Wyładowania niezupełne w izolacji urządzeń elektrycznych*. WNT, 1973.

- [35] Z. Gacek, F. Witos. Application of the joint electro-acoustic method for partial discharge investigations within a power transformer. *The Euro. Phy. J. Spetial Topics.*, 154:239–247, 2008.
- [36] F. Witos, Z. Gacek, E. Siwy, H. Kaźmierczak. Analiza sygnałów emisji akustycznej generowanych przez zamodelowane źródła wyładowań niezupełnych. *Mat. konf. VII Sym. Probl. Eksploa. ukl. izol. WN*, str. 459–465, 2001.
- [37] R. Włodek. *Mechanizmy działania wnz w dielektrykach*. PWN, 1992.
- [38] B. Gronowski, J. Ranachowski, J. Skubis, J. Zalewski. *Pomiary tłumienia emisji akustycznej od wyładowań elektrycznych w materiałach elektroizolacyjnych*. PAN-IPPT, 1986.
- [39] B. Gronowski. Badania widm częstotliwościowych sygnałów EA od WNZ w układach izolacyjnych urządzeń elektroenergetycznych. *Grant KBN nr 903359101, PB-486/9/91*, 1991-2.
- [40] F. Witos, Z. Gacek, A. Opilski, H. Otręba, M. Urbańczyk. Investigations of PD generated by modelled source with a bushing by means of electric and acoustic method. *Mol. Qua. Acou.*, 21:313–317, 2000.
- [41] A. Opilski, F. Witos, Z. Gacek. The new AE descriptor for modeled sources of PDs. *Arch. of Acou.*, 27(1):65–77, 2002.
- [42] Z. Gacek, F. Witos. Application of the calibrated AE to investigative properties of AE signals coming from PD sources modelled in laminar systems. *J. de Phy. IV*, 129:173–177, 2005.
- [43] G. Kil, D. Park, I. Kim, S. Choi. Analysis of PD in insulation oil using acoustic signal detection method. *WSEAS Trans. on Pow. Sys.*, 3(3):90–94, 2008.
- [44] G. Kil, I. Kim, D. Park, S. Choi, C. Park. Measurements and analysis of the acoustic signal produced by PDs in insulation oil. *Cur. Appl. Phys.*, 9:296–300, 2009.
- [45] B. Schechinger, F. Schubert. Numerical modeling of acoustic AE and wave propagation in concrete. *NDTnet, the el-J. of NDT*, 7(9), 2002.

- [46] F. Schubert. Numerical time-domain modeling of linear and nonlinear ultrasonic wave propagation using finite integration techniques—theory and applications. *Ultrason.*, 42(1-9):221–229, 2004.
- [47] B. Lamek, F. Schubert. 3-D ultrasonic transducer modeling using the elastodynamic finite integration technique in combination with point-source-synthesis. *Proces. of 4th Int. WS NDT in Progresspp.*, pp. A1–A10, 2007.
- [48] W. H. Prosser, M. A. Hamstad, J. Gary, A. O’Gallagher. Reflections of AE waves in finite plates: Finite element modeling and experimental measurements. *J. AE*, 17(1-2):37–47, 1999.
- [49] P. Maceyb, R. Hilla, S. A. Forsytha. Finite element modelling of ultrasound, with reference to transducers and AE waves. *Ultrason.*, 42(1-9):253–258, 2004.
- [50] P. Fellingner, R. Marklein, K. Langenberg, S. Klaholz. Numerical modelling of elastic wave propagation and scattering with efit – elastodynamic finite integration technique. *Wave Mot.*, 21:47–66, 1995.
- [51] T. Vogel, B. Schechinger. A deeper understanding of AE wave propagation in reinforced concrete. *Proceds. of Int. Symp. NDT-CE*, 2003.
- [52] D. Kao, D. Graham, B. Knight, K. Pericleous. A mathematical description of the acoustic coupling of the mass/spring model. *Appl. Math. Mod.*, 31:2684–2695, 2007.
- [53] R. Meunier, G. H. Vaillancourt. Propagation behavior of acoustic partial discharge signals in oil-filled transformers. *12th Int. Conf. on Cond. and Breakdown in Diele. Liq.*, pp. 401–404, 1996.
- [54] M. Rausch, M. Kaltenbacher, H. Landes, R. Lerch. Numerical computation of the emitted noise of power transformers. *Int. J Comp. Math. El. Eng.*, 20(2):636–648, 2001.
- [55] M. Rausch, M. Kaltenbacher, H. Landes, R. Lerch, J. Anger, J. Gerth, P. Boss. Combination of finite and boundary element methods in investigation and prediction of load-controlled noise of power transformers. *J. Sound Vib*, 250(2): 323–338, 2002.

- [56] W. M. Zawieska. Modelowanie transformatora energetycznego jako źródła hałasu. *Przeł. Mech.*, (11):40–42, 2007.
- [57] G. Makarewicz, L. Morzyński, G. Matuszewski, W. Zawieska. Metody redukcji hałasu transformatorów energetycznych. *Bezp. Pracy*, (12), 1999.
- [58] W. M. Zawieska, P. Górski. System aktywnej redukcji dla hałasu o przebiegu okresowym. *OSA*, 2002.
- [59] Y. G. Kim, W. Moon. An acoustic transformer composed of horns and its application. *J. Sound Vib*, 259(4):779–796, 2003.
- [60] R. S. Ming, J. Pan, M. P. Norton, S. Wende, H. Huang. The sound-field characterization of a power transformer. *Appl. Acou*, 56:257–272, 1999.
- [61] N. Hesselmann. Investigation of noise reduction on a 100 kVA transformer tank by means of active methods. *Appl. Acous.*, 11(1):27–34, 1978.
- [62] R. Codina, O. Guasch. An algebraic subgrid scale finite element method for the convected helmholtz equation in two dimentions with applications in aeroacoustics. *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*, 196:4672–4689, 2007.
- [63] R. Olszewski. Zastosowanie metody elementów skończonych i brzegowych do analizy pola akustycznego. Rozprawa doktorska, AGH, 2005.
- [64] M. N. Guddati, B. Yue. Dispersion-reducing finite elements for transient acoustics. *J. Acoust. Soc. Am.*, 118(4), 2005.
- [65] T. S. Ramu, N. Gupta. Estimation of PD parameters in GIS using AE techniques. *J. Sound Vib*, 247(2):243–260, 2001.
- [66] A. S. Bhangaonkar, S. V. Kulkarni. Approaches for numerical simulation of PD. *Proc. of IEEE Int. Pow. Modulat. HV Conf.*, pp. 572–575, 2008.
- [67] F. Teuma Tsafack, K. Kochan, T. Kletschkowski, D. Sachau. Validation of the acoustic finite element model of a very light jet cavity mock-up. *Proc. of the COMSOL Conf.*, 2008.
- [68] K. Ito, Z. Qiao, J. Toivanen. Finite-element modeling of 3-D time-harmonic structural acoustic target scattering with near-feld and far-feld codes. [http://www4.ncsu.edu/~kito/annual\\_report\\_07.pdf](http://www4.ncsu.edu/~kito/annual_report_07.pdf), 2010.

- [69] S. A. Ashraf, B. G. Stewart, C. Zhou, D. Hepburn, J. M. Jahabar. Numerical simulation of PA acoustic signals. *Proc. of IEEE Int. Conf. on HV Eng. and App.*, 2008.
- [70] D. Hepburn, S. A. Ashraf, B. G. Stewart. Simulation of shock wave due to PD using finite element method. *Proc. of Conf. on El. Insul. Diel. Phenom.*, pp. 120–123, 2007.
- [71] S. A. Ashraf, B. G. Stewart, C. Zhou, J. M. Jahabar. 3-D simulation and modelling of acoustic signals from PD activity. *Proc. of IEEE Int. Symp. on El. Insul. Diel. Phenom.*, pp. 619–622, 2006.
- [72] S. A. Ashraf, B. G. Stewart, A. Ahmad, J. M. Jahabar. 3-D propagation of PD acoustic wave. *Proc. of Int. Conf. on Comm. Comp. Pow.*, pp. 214–116, 2007.
- [73] S. A. Ashraf, B. G. Stewart, D. M. Hepburn, Chengke Zhou. Study of propagation behaviour of PD acoustic signals in a 3-D model tank. *Proc. of the 44th Int. Conf. Univ. Pow. Eng.*, pp. 1–5, 2010.
- [74] A. O. Akumu, H. Masai, F. Adachi, R. Ozaki, H. Ihuri, M. Fujii, K. Arii. Analysis of PD acoustic wave propagation in a model transformer. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 42: 3686–3689, 2003.
- [75] A. O. Akumu, N. Kawaguchi, R. Ozaki, H. Ihuri, M. Fujii, K. Arii. A study of PD acoustic signal propagation in a model transformer. *Proc. of IEEE Int. Symp. on El. Insul. Mat.*, pp. 583–586, 2001.
- [76] A. O. Akumu, F. Adachi, N. Kawaguchi, R. Ozaki, H. Ihuri, M. Fujii, K. Arii. A 3-D numerical simulation of PD acoustic wave propagation in a model transformer. *IEEE Int. Symp. on El. Insul.*, pp. 183–186, 2002.
- [77] R. Ozaki, A. O. Akumu, H. Ihuri, M. Fujii, K. Arii. Simulation of ultrasonic wave propagation of PD in transformer oil. *Proc. of IEEE Int. Symp. on El. Insul. Mat.*, pp. 880–883, 2001.
- [78] B. Jönsson, T. Bengtsson, K. Häkan. Transformer PD diagnosis using AE technique. *Proc. of 10th Int. Symp. On High Vol. Eng.*, pp. 73–79, 1997.
- [79] B. Florkowska. *Mechanizmy, pomiary i analiza wyladowań niezupełnych w diagnostyce układów izolacyjnych wysokiego napięcia*. PAN, 2001.



- [80] K. Feser, E. Grossman. Online PD-monitoring on transformers using AE techniques *Proc. of Int. Conf. APTADM'2001*, pp. 264–268, 2001.
- [81] E. Gulski. *Diagnozowanie wyladowań niezupełnych w urządzeniach wysokiego napięcia w eksploatacji*. Of. Wyd. PW, 2003.
- [82] J. Skubis. *Wybrane zagadnienia z techniki i diagnostyki wysokonapięciowej*. Of. Wyd. PO, 1998.
- [83] Z. Ranachowski. *Pomiary i analiza sygnału EA*, Vol. 1. IPPT-PAN, 1996.
- [84] Z. Ranachowski. *Metody pomiarowe i analiza sygnału EA*, Vol. 1. IPPT-PAN, 1997.
- [85] J. Jing-Pin, H. Cun-Fu, W. Bin, F. Ren-Yuan, W. Xiu-Yan. A new AE source location technique based on wavelet transform and mode analysis. *Front. Mech. Eng.*, pp. 341–345, 2006.
- [86] I. Malecki. Analiza porównawcza teorii i metod pomiarowych EA. Akustyka w technice, medycynie i kulturze. Granty KBN realizowane w latach 1991-1992, 1993. str. 41-45.
- [87] I. Malecki. Analiza rozwoju i możliwości zastosowań metody EA. *IPPT-PAN*, 1 (23), 1993.
- [88] Z. Witos, I. Malecki. Deskrytory emisji akustycznej. *IPPT-PAN*, 1(39), 1993.
- [89] A. Opilski, I. Malecki, F. Witos. Ae source parameters in coal samples. *Acustica*, 79(2):112–116, 1993.
- [90] A. Dąbrowski. Analiza zakłóceń występujących przy pomiarach wyladowań niezupełnych metodą EA - ujęcie syntetyczne. *Energetyka - ZT nr VI*, pp. 113–114, 2005.
- [91] M. G. Danikas, R. Sarathi, P. D. Singh. Characterization of PDs in transformer oil insulation under AC and DC voltage using AE technique. *J. of El. Eng.*, 58(2): 91–97, 2007.
- [92] H. Nieda, T. Sakoda, T. Arita. Studies of elastic waves caused by corona discharges in oil. *Trans. on IEEE Trans. on Dielect. and El. Ins.*, 8(6):825–230, 1999.

- [93] H. Nieda, T. Sakoda. Characteristic of elastic waves caused by corona discharges in an oil-immersed pole transformer. *Trans. on IEEE Trans. on Diel. and El. Ins.*, 8(2):276–283, 2001.
- [94] S. N. Hettiwatte, P. A. Crossley, Z. D. Wang, A. Darwin, G. Edwards. Simulation of a transformer winding for PD propagation studies. *Trans. on IEEE Pow. Eng.*, pp. 1394–1398, 2002.
- [95] J. Ramírez-Nino, A. Pascacio. Acoustic measuring of PD in power transformers. *Meas. Sci. Technol.*, 20, 2009.
- [96] L. Niemeyer. A generalized approach to partial discharge modeling. *Trans. on IEEE Trans. on Diele. and El. Insul.*, 2(4):510–528, 2002.
- [97] W. Opydo. Study of elastic waves of acoustic frequencies generated by surface partial discharges of solid insulators in vacuum. *Vacuum*, 74:85–92, 2004.
- [98] A. Opilski, I. Malecki. Charakterystyka i klasyfikacja sygnałów EA. J. Ranachowski I. Malecki, edytor, *Emisja akustyczna. Źródła, metody, zastosowania*, IPPT-PAN, 1994.
- [99] L. E. Lundgaard. Partial discharge - part XIII: Acoustic PD detection - fundamental considerations. *IEEE El. Insul. Mag.*, 8(4):25–31, 1992.
- [100] S. Borucki, A. Cichoń, M. Lorenc, T. Boczar. Rozpoznawanie wyładowań elektrycznych rejestrowanych metodą EA przy wykorzystaniu sieci neuronowych. *Przeg. Elektrotech. Jubil. X Symp. Probl. eksploa. ukl. izol. WN*, str. 30–33, 2005.
- [101] R. J. Van Brut. Stochastic properties of partial discharges phenomena. *IEEE El. Insul. Mag.*, 26(5):642–665, 1990.
- [102] T. Boczar. Analiza widm impulsów akustycznych emitowanych przez niezupełne wyładowania powierzchniowe. *ZN PO Elektryka*, 219(44):125–136, 1996.
- [103] T. Boczar. Identyfikacja formy wyładowania niezupełnego na podstawie jego widm częstotliwościowych emisji akustycznej. Rozprawa doktorska, Pol. Śl. 1998.
- [104] M. Lorenc, T. Boczar. Analiza porównawcza sygnałów emisji akustycznej generowanej przez podstawowe formy wyładowań niezupełnych oraz źródła wzorcowe. *II Konf. Tech. Wysokonap.*, str. 117–129, 1999.

- [105] M. Lorenc, T. Boczar. Metody pomiaru i analizy sygnałów akustycznych od wyładowań niezupełnych od źródeł wzorcowych. *Mat. konf. PPM*, str. 320–331, 1998.
- [106] K. P. Bateman, P. D. Wentzell, S. T. Vanslyke. Evaluation of AE as a mean quantitative chemical analysis. *Anal. Ch. Act.*, 246:43–53, 1991.
- [107] Z. Flisowski. *Technika wysokich napięć*. WNT, 1992.
- [108] L. E. Lundgaard. Partial discharge - part XIV: Acoustic PD detection - practical application. *IEEE El. Insul. Mag.*, 8(5):34–43, 1992.
- [109] W. Reichard. *Grundlagen der Elektroakustik*. Akadem. Verlagsgesell., 1954.
- [110] E. M. Lifszic, L. D. Landau. *Elektrodynamika ośrodków ciągłych*. PWN, 1960.
- [111] E. Lifszic, L. D. Landau. *Hydrodynamika*. PWN, 1994.
- [112] S. D. Poisson. Memoir on theory on sound. *J. Ec. Polytech.*, 7:364–370, 1808.
- [113] B.L. Rozhdestvenskii. *Hyperbolic partial differential equation. Encyclopaedia of Mathematics*. Springer-Verl., 2001.
- [114] N.S. Trudinger, D. Gilbarg. *Partial Differential Equations of Second Order*. Springer-Verl., 1998.
- [115] S. Coles. *An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values*. Springer-Verl., 2001.
- [116] M. Abbt, E. Limpert, W. Stahel. Log-normal distributions across the sciences: Keys and clues. *BioScience*, 51(5):341–352, 2001.
- [117] K. Ye, R. Walpole, R. Myers. *Probability and Statistics for Engineers and Scientists*. Pearson Edu., 2002.
- [118] J. C. Lagarias, J. A. Reeds, M. H. Wright, P. E. Wright. Convergence properties of the nelder-mead simplex method in low dimensions. *SIAM J. Optim.*, 9(1): 112–147, 1998.
- [119] A. M. Ostrowski. *Solution of equations in Euclidean and Banach spaces*. Academic Press, 1973.

- [120] M. Shibata. A theoretical evaluation of AE signals - the rise time effect of dynamic forces. *Mat. Eval.*, 42(1):107–115, 1984.
- [121] S. Nunomura, T. Takashima, Y. Higo. Determination of the duration of transient phenomena by frequency-domain analysis of AE. *Philosoph. Mag. A*, 49(2):221–229, 1984.
- [122] R.W. Schafer, A.V. Oppenheim. *Discrete-Time Signal Processing*. Prentice-Hall, 1989.
- [123] C.W. Therrien. *Discrete random signals and statistical signal processing*. Prentice-Hall, 1992.
- [124] D. Wotzka. Application of comsol multiphysics for acoustic emission signals simulation. *Proc. of XV Conf. on Com. appl. in el. eng.*, 2010.
- [125] D. Wotzka. Partial discharge simulation in an acoustic model of a power transformer. *IEEE Trans. on Electrodyn. and Mechatr.*, 2009.
- [126] D. Wotzka. Numerical modeling of acoustic propagation in power transformers. *Proc. of 38th WS on Wave and Qua. Acou.*, 2009.
- [127] D. Wotzka, T. Boczar . Modeling of ultrasound transmission in electro insulation oil. *Proc. of 57. OSA*, pp. 213–215, 2010.
- [128] D. Wotzka, A. Cichoń, T. Boczar. Analysis of changes in the frequency spectrum of acoustic emission signals in transformer oil. *Proc. of 57. OSA*, pp. 217–220, 2010.
- [129] D. Wotzka, T. Boczar, D. Zmarzły. Numerical simulation of acoustic wave propagating in a spherical object filled with insulating oil. *w druku do Act. Phy. Pol. A*, 2010.
- [130] D. Wotzka, T. Boczar D. Zmarzły. Analysis of acoustic wave propagation in a power transformer model. *Act. Phys. Pol. A*, 2009.
- [131] K. H. Huebner. *The finite element method for engineers*. Wiley-IEEE, 2001.
- [132] Inc. COMSOL. Comsol multiphysics modelling guide. Technical report, COMSOL, Inc., 2006.

- [133] P. Canale, S. Chapra. *Numerical methods for engineers*. McGraw-Hill Com., 1984.
- [134] E. Zhelezina. Adaptive finite-elemente-methode fuer die numerische simulation elektischer, magnetischer und akustischer felder. *PhD thesis. TU Erlangen-Nuernberg*, 2005.
- [135] Praca zbiorowa. *Materiały pomocnicze do nauki akustyki. Część III*. Inst. Tech. Bud., 1977.
- [136] J. Parchański. *Miernictwo elektryczne i elektroniczne*. WSiP, 2008.
- [137] C. Capps. Near field or far field? *EDN Magazine*, (8):95–102, 2001.
- [138] PI Ceramic GmbH. Strona www. <http://piceramic.de/deutsch/index.html>, 4 2010.
- [139] L. Grabowski. *Pracowania elektroniczna. Układy elektroniczne*. WSiP, 2007.
- [140] PI Ceramic GmbH. Piezoceramic materials. <http://piceramic.com/datasheet.html>, 4 2010.
- [141] Physical Acoustic Corporation. Strona www. <http://www.pacndt.com/index.aspx?go=company>, 4 2010.
- [142] EA System. EA signal conditioner – instrukcja obsługi. Technical report, 2001.
- [143] D. Wotzka. Experimental setup for digital acoustic emission wave generation. *ZN PO Elektryka*, (63), 2010.
- [144] TiePie engineering. Strona www. <http://www.tiepie.com/uk/home/>, 4 2010.
- [145] TiePie engineering. *Programmer's manual*, 2010.
- [146] Z. Hellwig. *Regresja liniowa i jej zastosowanie w ekonomii*. PWE, 1967.
- [147] F. S. Wood, C. Daniel. *Fitting Equations to Data*. John Wiley & Sons, 1980.
- [148] T. Boczar, D. Wotzka. Analiza sygnałów EA generowanej przez przetwornik piezoelektryczny w modelu kadzi transformatorowej. *w druku do PAR*, 2010.

# Załączniki

# Załącznik A

---

**Przebiegi czasowe sygnałów EA generowanej przez różne klasy WNZ z zaznaczoną obwiednią sygnału rejestrowanego przy dodatnim półokresie napięcia zasilającego: a) przebieg czasowy rejestrowanego sygnału EA, b) obwiednia początkowego fragmentu sygnału**

---

**Rysunek A.1.** Przebieg czasowy sygnałów EA generowanej przez WNZ klasy 1 z zaznaczoną obwiednią sygnału rejestrowanego

**Rysunek A.2.** Przebieg czasowy sygnałów EA generowanej przez WNZ klasy 2 z zaznaczoną obwiednią sygnału rejestrowanego

**Rysunek A.3.** Przebieg czasowy sygnałów EA generowanej przez WNZ klasy 3 z zaznaczoną obwiednią sygnału rejestrowanego

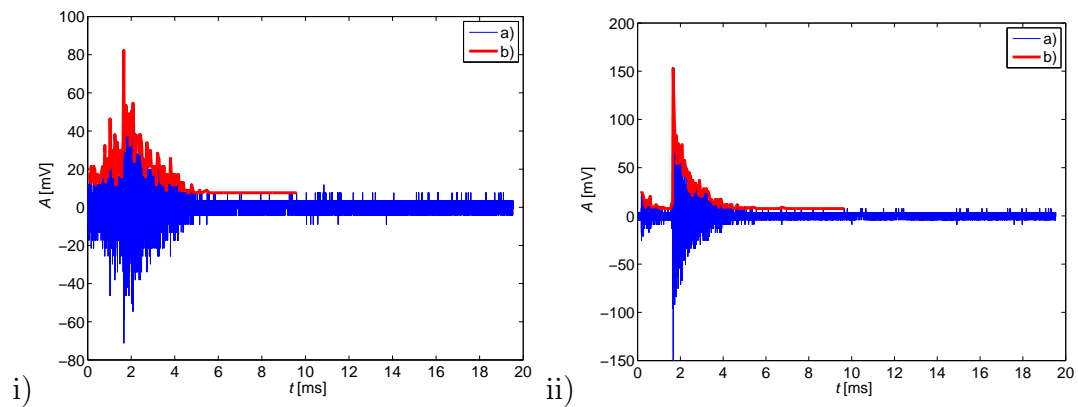
**Rysunek A.4.** Przebieg czasowy sygnałów EA generowanej przez WNZ klasy 4 z zaznaczoną obwiednią sygnału rejestrowanego

**Rysunek A.5.** Przebieg czasowy sygnałów EA generowanej przez WNZ klasy 5 z zaznaczoną obwiednią sygnału rejestrowanego

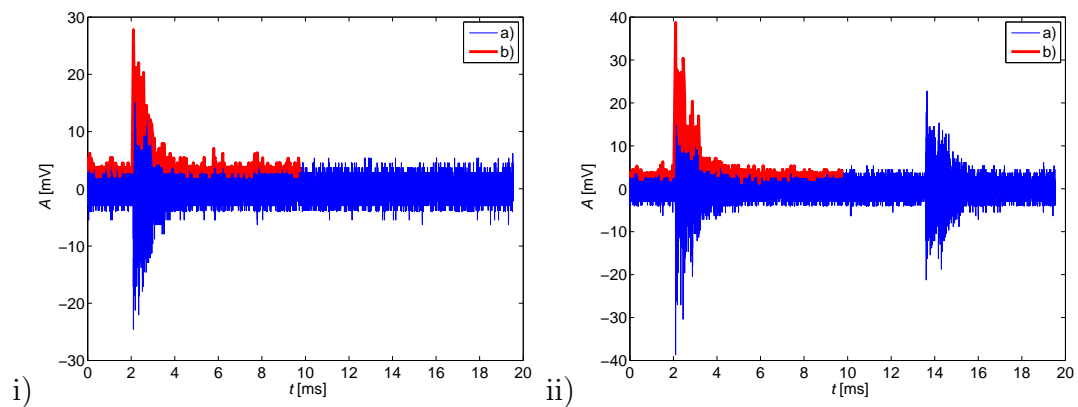
**Rysunek A.6.** Przebieg czasowy sygnałów EA generowanej przez WNZ klasy 6 z zaznaczoną obwiednią sygnału rejestrowanego

**Rysunek A.7.** Przebieg czasowy sygnałów EA generowanej przez WNZ klasy 7 z zaznaczoną obwiednią sygnału rejestrowanego

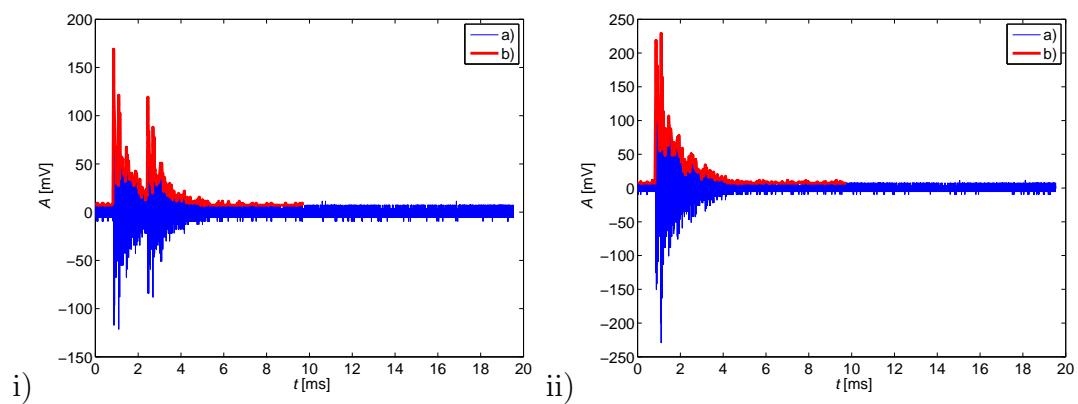
**Rysunek A.8.** Przebieg czasowy sygnałów EA generowanej przez WNZ klasy 8 z zaznaczoną obwiednią sygnału rejestrowanego



Rysunek A.1: Przebieg czasowy sygnałów EA generowanej przez WNZ klasy 1 z zaznaczoną obwiednią sygnału rejestrowanego: i) przebieg nr 1, ii) przebieg nr 2

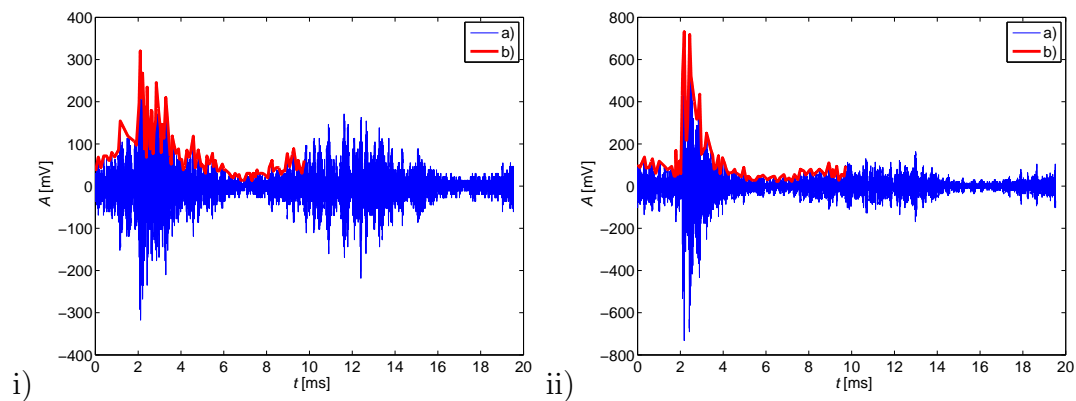


Rysunek A.2: Przebieg czasowy sygnałów EA generowanej przez WNZ klasy 2 z zaznaczoną obwiednią sygnału rejestrowanego: i) przebieg nr 1, ii) przebieg nr 2

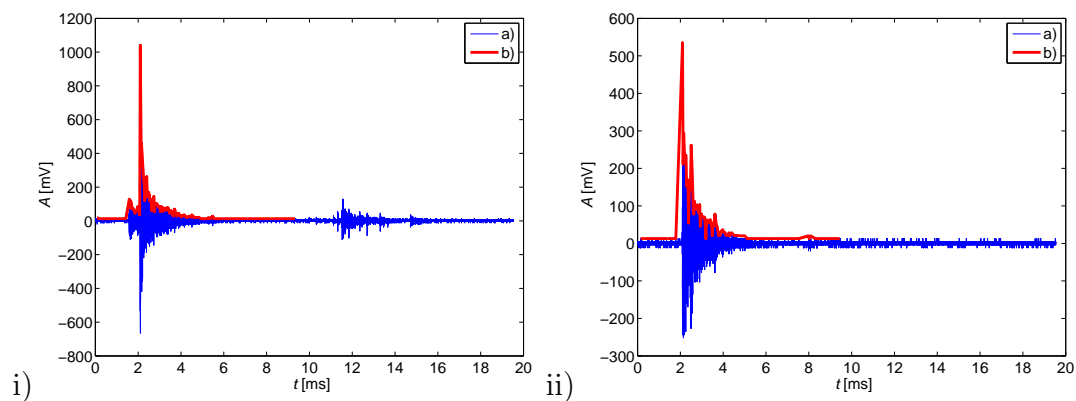


Rysunek A.3: Przebieg czasowy sygnałów EA generowanej przez WNZ klasy 3 z zaznaczoną obwiednią sygnału rejestrowanego: i) przebieg nr 1, ii) przebieg nr 2

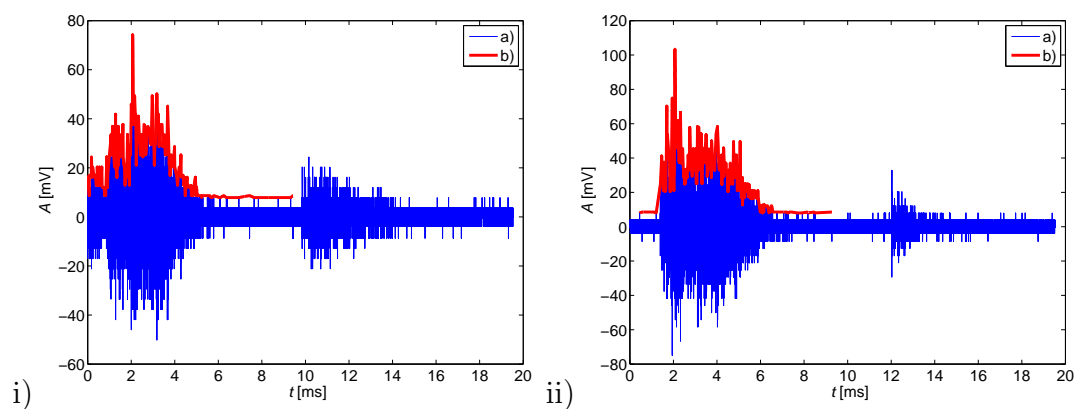




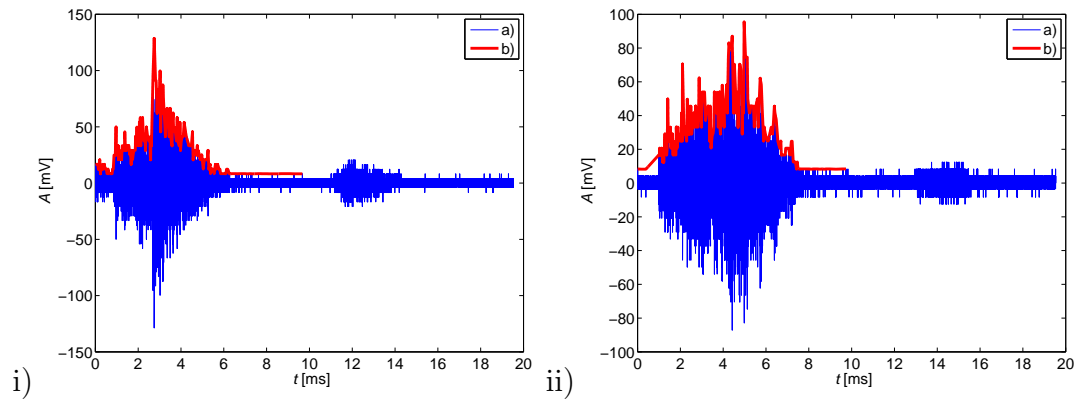
Rysunek A.4: Przebieg czasowy sygnałów EA generowanej przez WNZ klasy 4 z zaznaczoną obwiednią sygnału rejestrowanego: i) przebieg nr 1, ii) przebieg nr 2



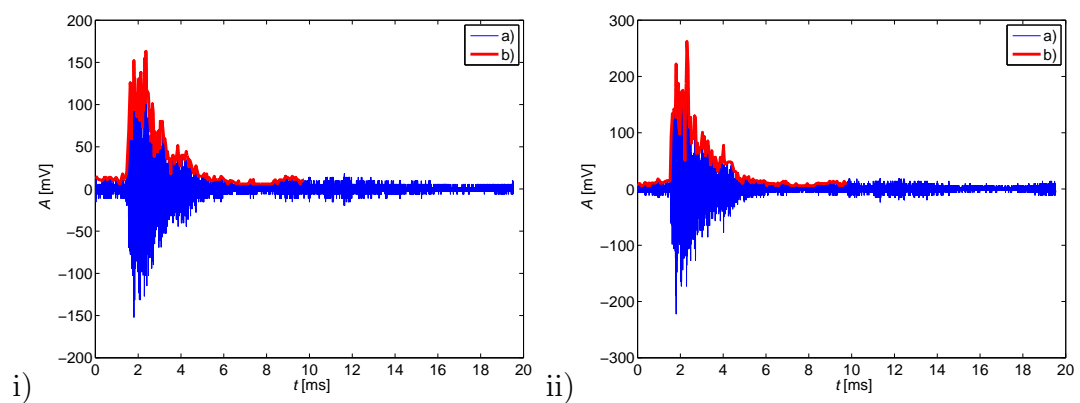
Rysunek A.5: Przebieg czasowy sygnałów EA generowanej przez WNZ klasy 5 z zaznaczoną obwiednią sygnału rejestrowanego: i) przebieg nr 1, ii) przebieg nr 2



Rysunek A.6: Przebieg czasowy sygnałów EA generowanej przez WNZ klasy 6 z zaznaczoną obwiednią sygnału rejestrowanego: i) przebieg nr 1, ii) przebieg nr 2



Rysunek A.7: Przebieg czasowy sygnałów EA generowanej przez WNZ klasy 27 z zaznaczoną obwiednią sygnału rejestrowanego: i) przebieg nr 1, ii) przebieg nr 2



Rysunek A.8: Przebieg czasowy sygnałów EA generowanej przez WNZ klasy 8 z zaznaczoną obwiednią sygnału rejestrowanego: i) przebieg nr 1, ii) przebieg nr 2

## Załącznik B

---

**Przebiegi czasowe obwiedni sygnałów EA generowanej przez różne klasy WNZ: a) cykl pierwszy, b) cykl drugi, c) cykl trzeci, d) cykl czwarty**

---

**Rysunek B.1.** Przebiegi czasowe obwiedni sygnałów EA generowanej przez WNZ klasy 1

**Rysunek B.2.** Przebiegi czasowe obwiedni sygnałów EA generowanej przez WNZ klasy 2

**Rysunek B.3.** Przebiegi czasowe obwiedni sygnałów EA generowanej przez WNZ klasy 3

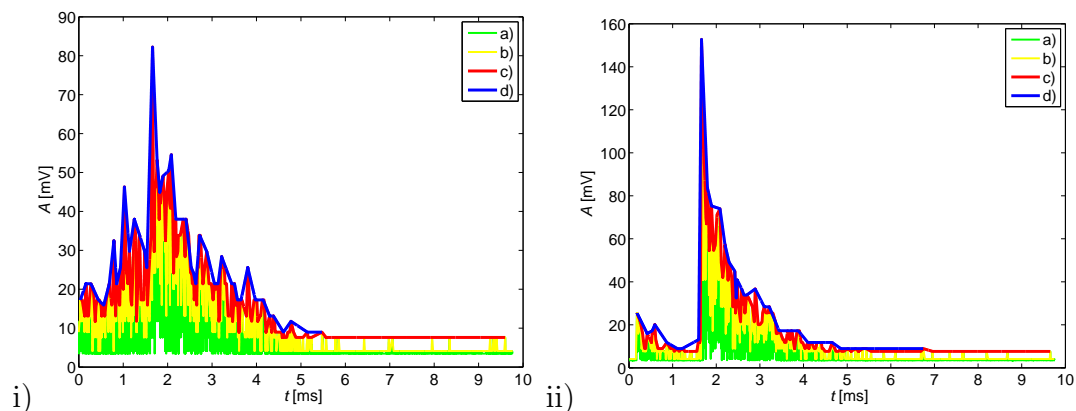
**Rysunek B.4.** Przebiegi czasowe obwiedni sygnałów EA generowanej przez WNZ klasy 4

**Rysunek B.5.** Przebiegi czasowe obwiedni sygnałów EA generowanej przez WNZ klasy 5

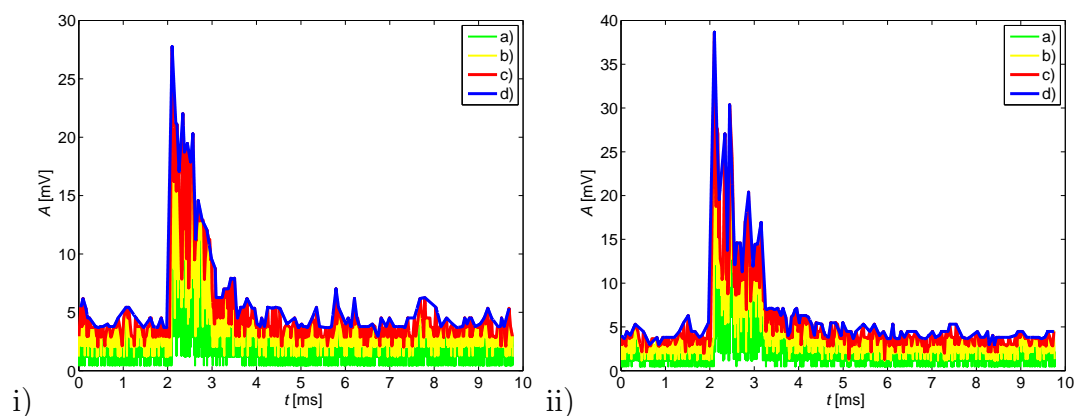
**Rysunek B.6.** Przebiegi czasowe obwiedni sygnałów EA generowanej przez WNZ klasy 6

**Rysunek B.7.** Przebiegi czasowe obwiedni sygnałów EA generowanej przez WNZ klasy 7

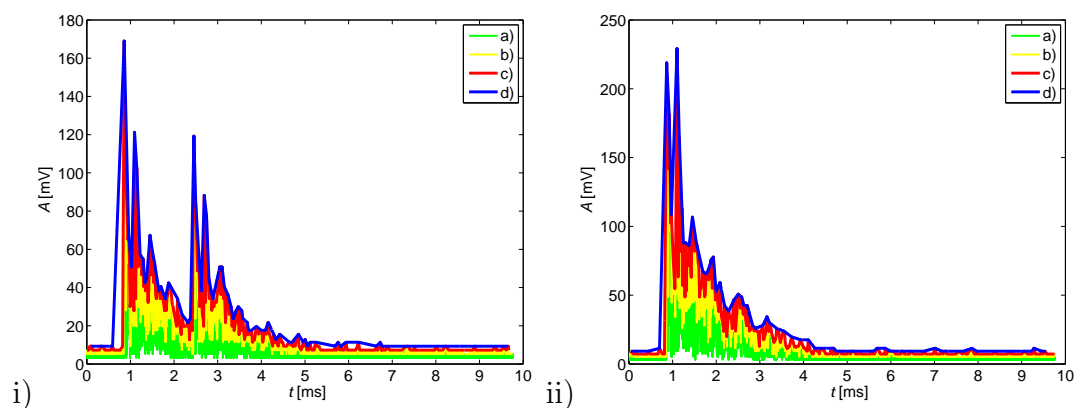
**Rysunek B.8.** Przebiegi czasowe obwiedni sygnałów EA generowanej przez WNZ klasy 8



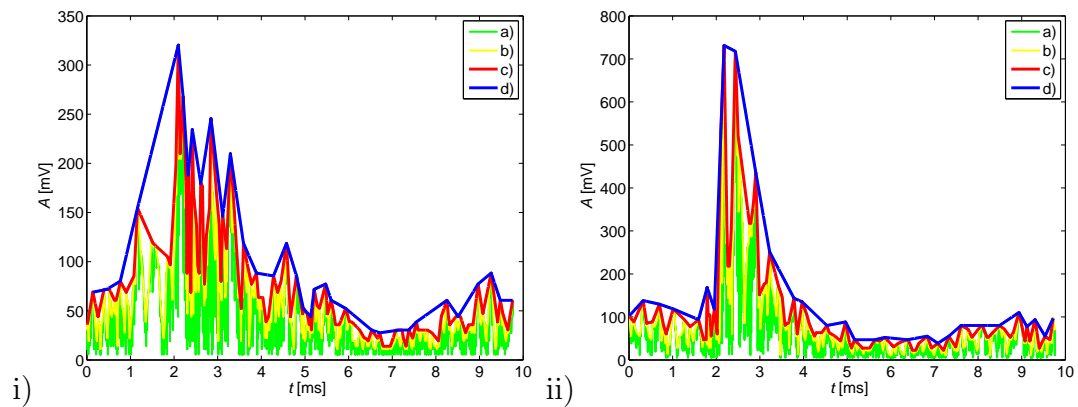
Rysunek B.1: Przebiegi czasowe obwiedni sygnałów EA generowanej przez WNZ klasy 1: i) przebieg nr 1, ii) przebieg nr 2



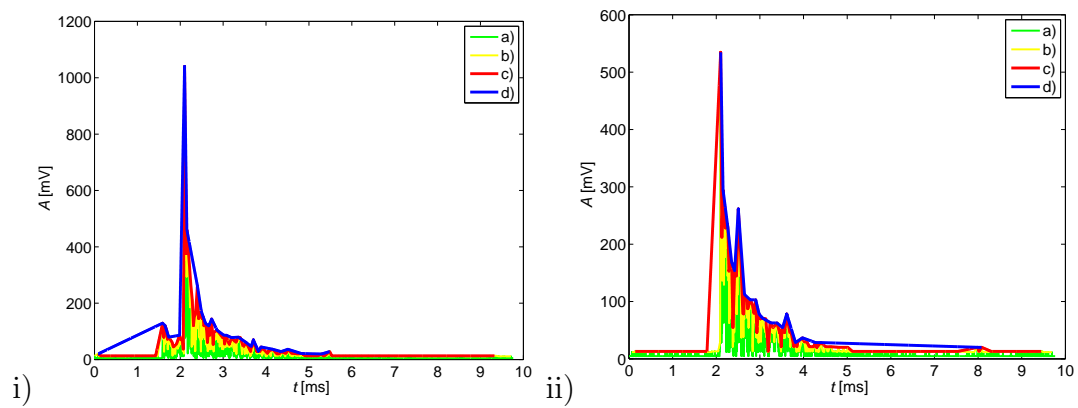
Rysunek B.2: Przebiegi czasowe obwiedni sygnałów EA generowanej przez WNZ klasy 2: i) przebieg nr 1, ii) przebieg nr 2



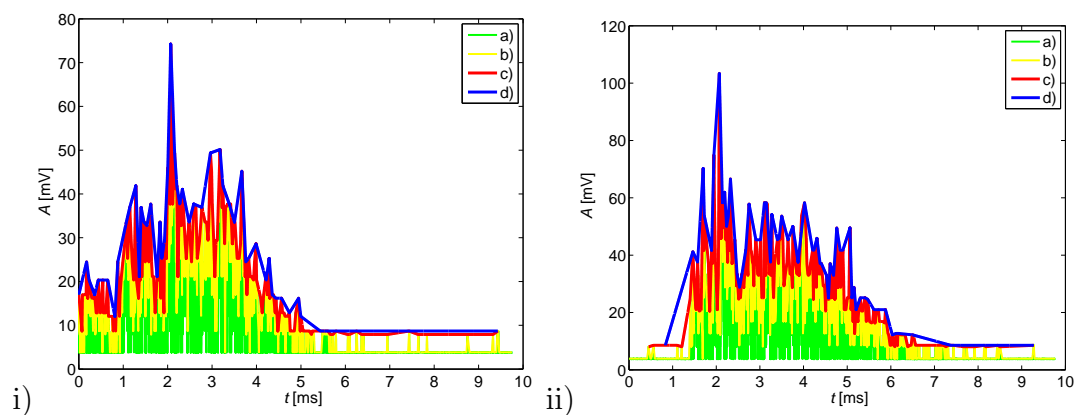
Rysunek B.3: Przebiegi czasowe obwiedni sygnałów EA generowanej przez WNZ klasy 3: i) przebieg nr 1, ii) przebieg nr 2



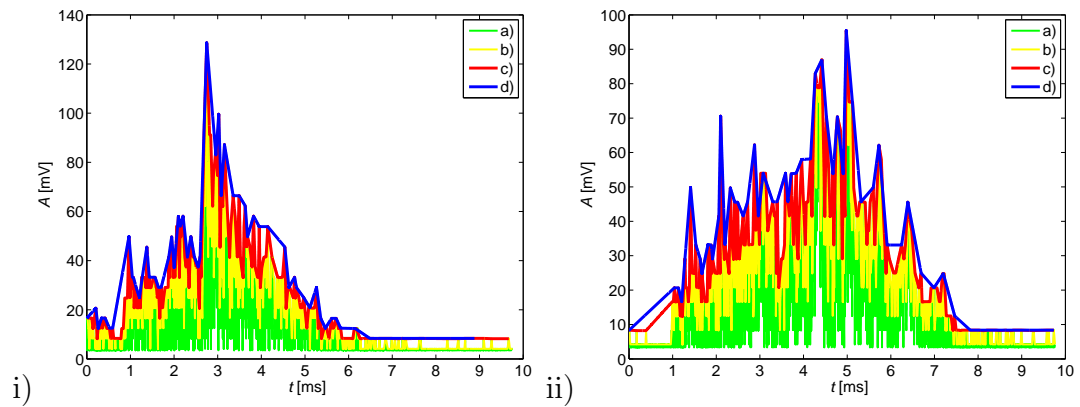
Rysunek B.4: Przebiegi czasowe obwiedni sygnałów EA generowanej przez WNZ klasy 4: i) przebieg nr 1, ii) przebieg nr 2



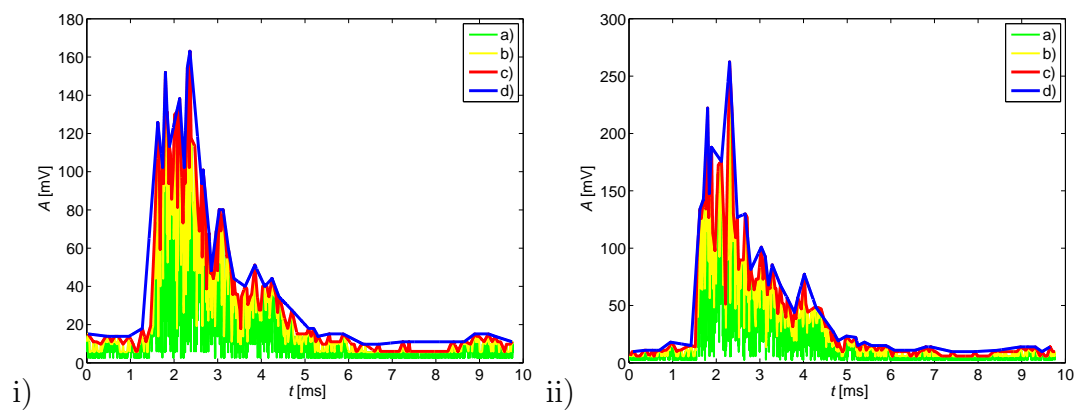
Rysunek B.5: Przebiegi czasowe obwiedni sygnałów EA generowanej przez WNZ klasy 5: i) przebieg nr 1, ii) przebieg nr 2



Rysunek B.6: Przebiegi czasowe obwiedni sygnałów EA generowanej przez WNZ klasy 6: i) przebieg nr 1, ii) przebieg nr 2



Rysunek B.7: Przebiegi czasowe obwiedni sygnałów EA generowanej przez WNZ klasy 7: i) przebieg nr 1, ii) przebieg nr 2



Rysunek B.8: Przebiegi czasowe obwiedni sygnałów EA generowanej przez WNZ klasy 8: i) przebieg nr 1, ii) przebieg nr 2

## Załącznik C

---

**Przebiegi czasowe obwiedni sygnałów EA generowanej przez wybrane klasy WNZ dla rozpatrywanych modeli matematycznych: a) obwiednia rejestrowanego sygnału EA, b) przebieg estymaty krzywej regresji**

---

**Rysunek C.1.** Przebieg czasowy obwiedni sygnałów EA generowanej przez WNZ klasy 1 i przebieg estymowanej funkcji regresji wg modelu TH

**Rysunek C.2.** Przebieg czasowy obwiedni sygnałów EA generowanej przez WNZ klasy 1 i przebieg estymowanej funkcji regresji wg modelu TL

**Rysunek C.3.** Przebieg czasowy obwiedni sygnałów EA generowanej przez WNZ klasy 1 i przebieg estymowanej funkcji regresji wg modelu LN

**Rysunek C.4.** Przebieg czasowy obwiedni sygnałów EA generowanej przez WNZ klasy 1 i przebieg estymowanej funkcji regresji wg modelu GEV

**Rysunek C.5.** Przebieg czasowy obwiedni sygnałów EA generowanej przez WNZ klasy 1 i przebieg estymowanej funkcji regresji wg modelu SW

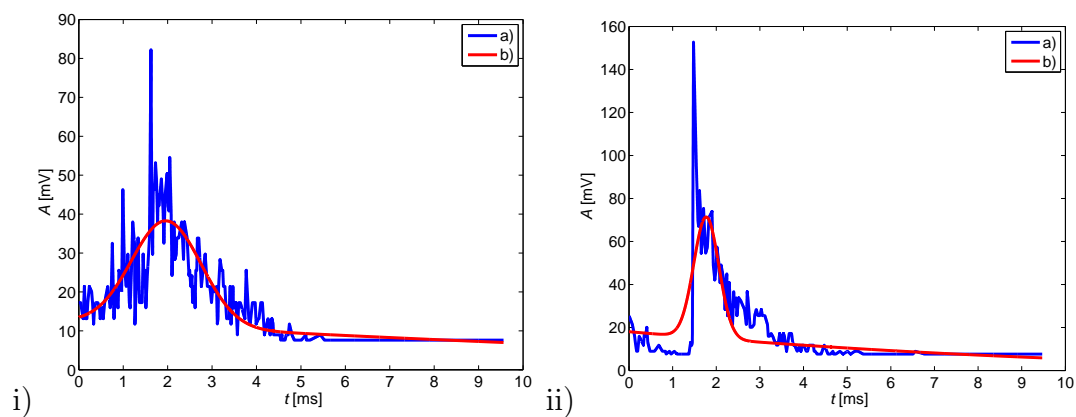
**Rysunek C.6.** Przebieg czasowy obwiedni sygnałów EA generowanej przez WNZ klasy 2 i przebieg estymowanej funkcji regresji wg modelu TH

**Rysunek C.7.** Przebieg czasowy obwiedni sygnałów EA generowanej przez WNZ klasy 2 i przebieg estymowanej funkcji regresji wg modelu TL

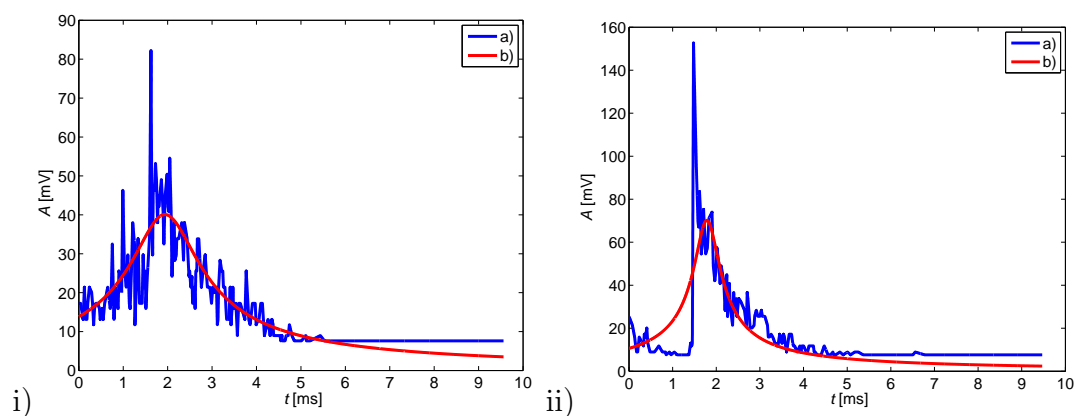
**Rysunek C.8.** Przebieg czasowy obwiedni sygnałów EA generowanej przez WNZ klasy 2 i przebieg estymowanej funkcji regresji wg modelu LN

**Rysunek C.9.** Przebieg czasowy obwiedni sygnałów EA generowanej przez WNZ klasy 2 i przebieg estymowanej funkcji regresji wg modelu GEV

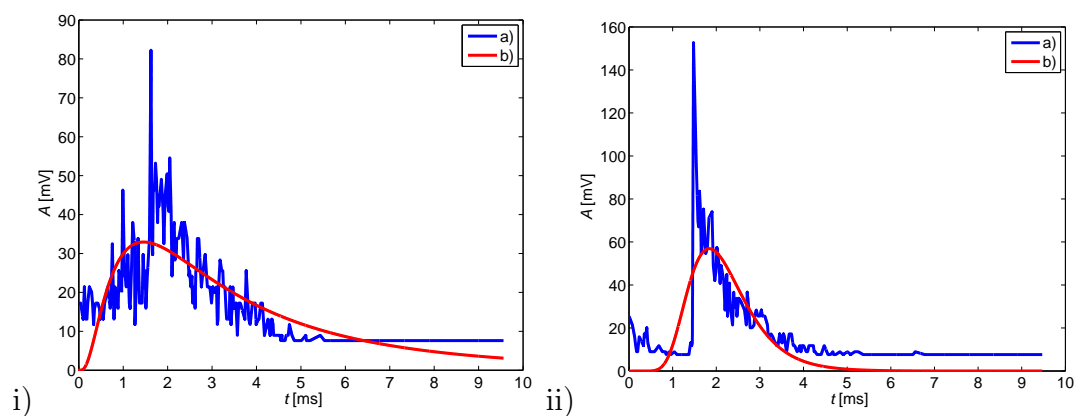
**Rysunek C.10.** Przebieg czasowy obwiedni sygnałów EA generowanej przez WNZ klasy 2 i przebieg estymowanej funkcji regresji wg modelu SW



Rysunek C.1: Przebieg czasowy obwiedni sygnałów EA generowanej przez WNZ klasy 1 i przebieg estymowanej funkcji regresji wg modelu TH: i) przebieg nr 1, ii) przebieg nr 2

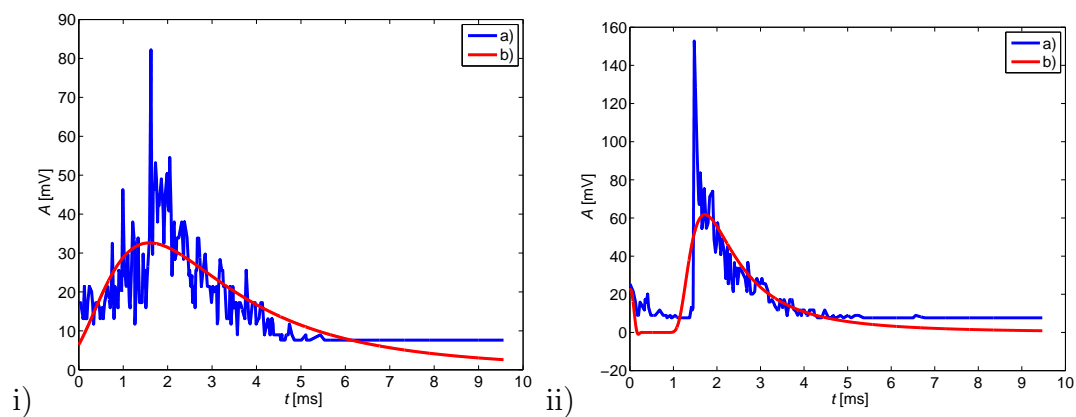


Rysunek C.2: Przebieg czasowy obwiedni sygnałów EA generowanej przez WNZ klasy 1 i przebieg estymowanej funkcji regresji wg modelu TL: i) przebieg nr 1, ii) przebieg nr 2

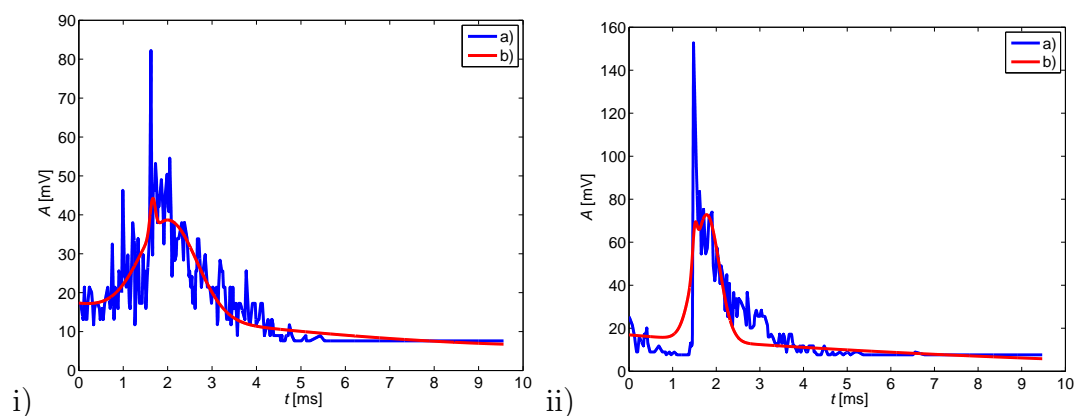


Rysunek C.3: Przebieg czasowy obwiedni sygnałów EA generowanej przez WNZ klasy 1 i przebieg estymowanej funkcji regresji wg modelu LN: i) przebieg nr 1, ii) przebieg nr 2

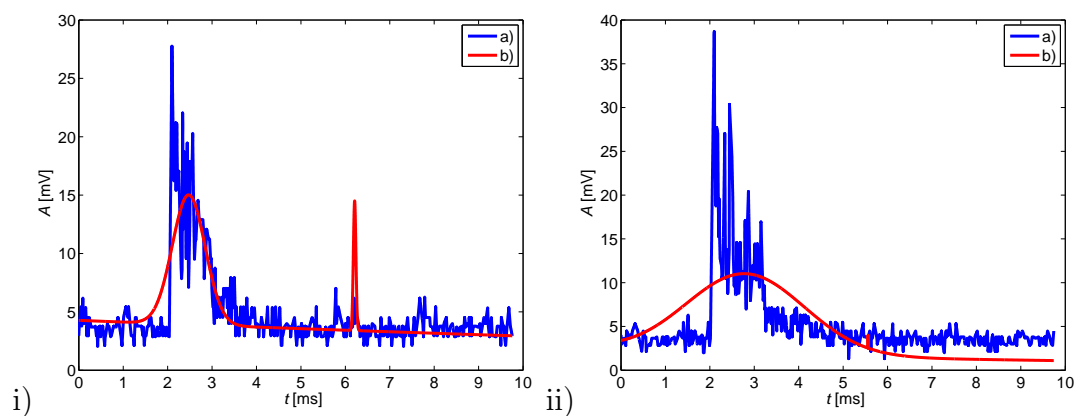




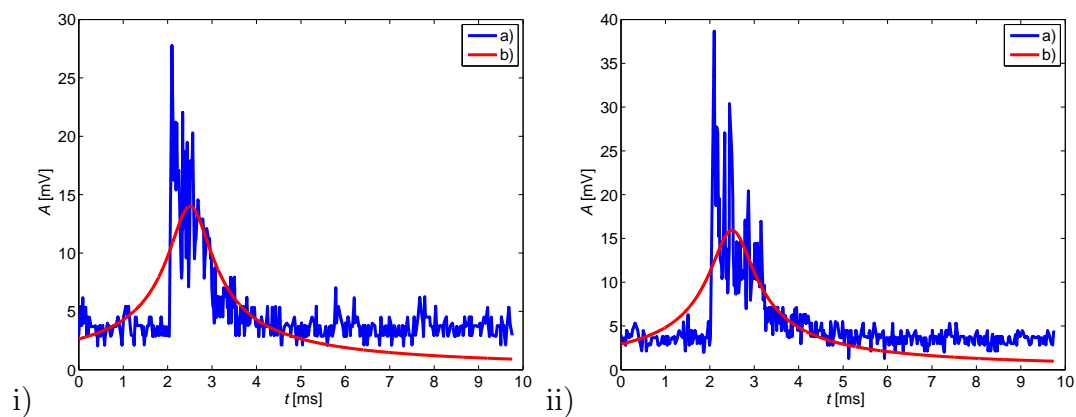
Rysunek C.4: Przebieg czasowy obwiedni sygnałów EA generowanej przez WNZ klasy 1 i przebieg estymowanej funkcji regresji wg modelu GEV: i) przebieg nr 1, ii) przebieg nr 2



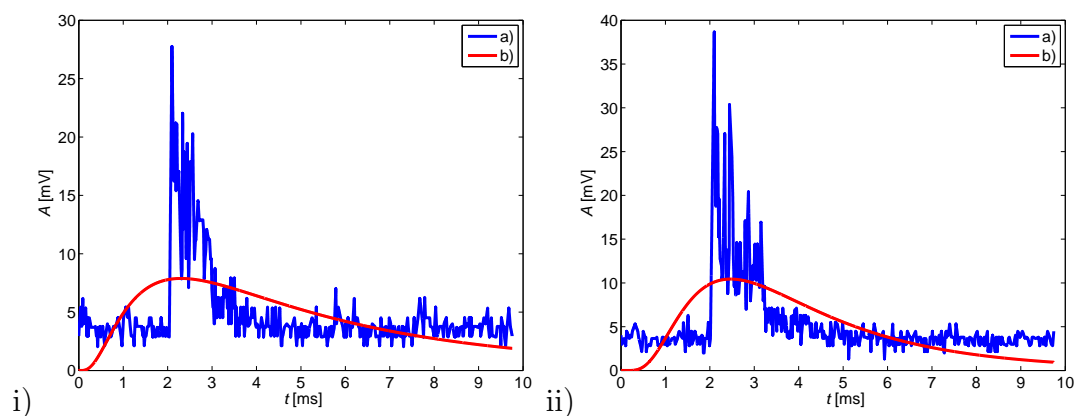
Rysunek C.5: Przebieg czasowy obwiedni sygnałów EA generowanej przez WNZ klasy 1 i przebieg estymowanej funkcji regresji wg modelu SW: i) przebieg nr 1, ii) przebieg nr 2



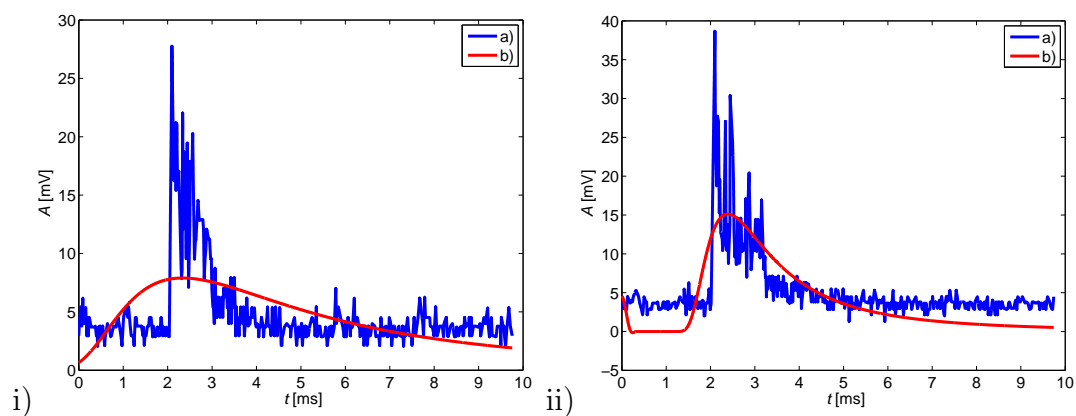
Rysunek C.6: Przebieg czasowy obwiedni sygnałów EA generowanej przez WNZ klasy 2 i przebieg estymowanej funkcji regresji wg modelu TH: i) przebieg nr 1, ii) przebieg nr 2



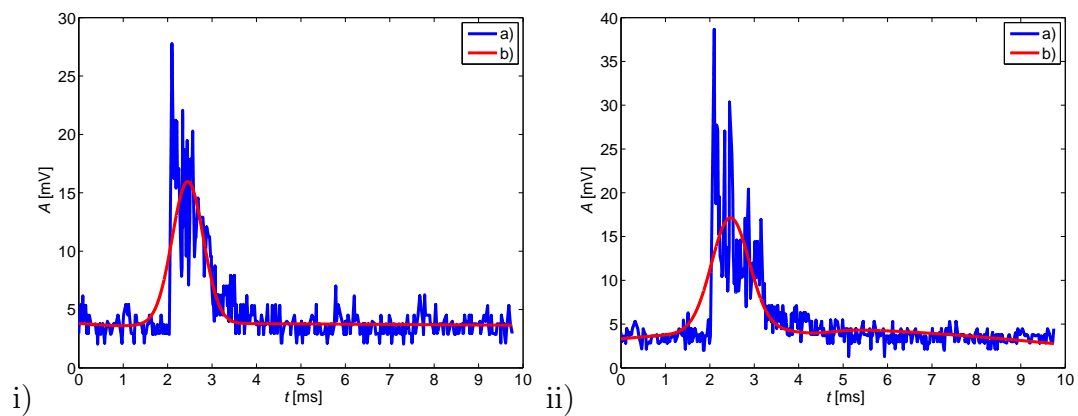
Rysunek C.7: Przebieg czasowy obwiedni sygnałów EA generowanej przez WNZ klasy 2 i przebieg estymowanej funkcji regresji wg modelu TL: i) przebieg nr 1, ii) przebieg nr 2



Rysunek C.8: Przebieg czasowy obwiedni sygnałów EA generowanej przez WNZ klasy 2 i przebieg estymowanej funkcji regresji wg modelu LN: i) przebieg nr 1, ii) przebieg nr 2



Rysunek C.9: Przebieg czasowy obwiedni sygnałów EA generowanej przez WNZ klasy 2 i przebieg estymowanej funkcji regresji wg modelu GEV: i) przebieg nr 1, ii) przebieg nr 2



Rysunek C.10: Przebieg czasowy obwiedni sygnałów EA generowanej przez WNZ klasy 2 i przebieg estymowanej funkcji regresji wg modelu SW: i) przebieg nr 1, ii) przebieg nr 2

## Załącznik D

---

Przebiegi czasowe sygnałów EA rejestrowanej przy wymuszeniu skokiem jednostkowym o amplitudzie  $A_{\text{gen}}$  w zakresie (3-12) V, przetwornikiem PIC155 umieszczonym wewnątrz kadzi w położeniu oznaczonym literą B na rys. 7.7. a) przebieg czasowy rozpatrywanego wymuszenia, b) przebieg czasowy sygnału rejestrowanego, c) wybrany przedział czasowy sygnału rejestrowanego dla przedziału czasu  $t \in (0 - 0,7)$  ms, d) wybrany przedział czasowy sygnału zarejestrowanego dla przedziału czasu  $t \in (0 - 0,7)$  ms

---

**Rysunek D.1.** Przebiegi czasowe sygnałów EA rejestrowanej przy wymuszeniu skokiem jednostkowym o amplitudzie  $A_{\text{gen}} = 3$  V

**Rysunek D.2.** Przebiegi czasowe sygnałów EA rejestrowanej przy wymuszeniu skokiem jednostkowym o amplitudzie  $A_{\text{gen}} = 4$  V

**Rysunek D.3.** Przebiegi czasowe sygnałów EA rejestrowanej przy wymuszeniu skokiem jednostkowym o amplitudzie  $A_{\text{gen}} = 5$  V

**Rysunek D.4.** Przebiegi czasowe sygnałów EA rejestrowanej przy wymuszeniu skokiem jednostkowym o amplitudzie  $A_{\text{gen}} = 6$  V

**Rysunek D.5.** Przebiegi czasowe sygnałów EA rejestrowanej przy wymuszeniu skokiem jednostkowym o amplitudzie  $A_{\text{gen}} = 7$  V

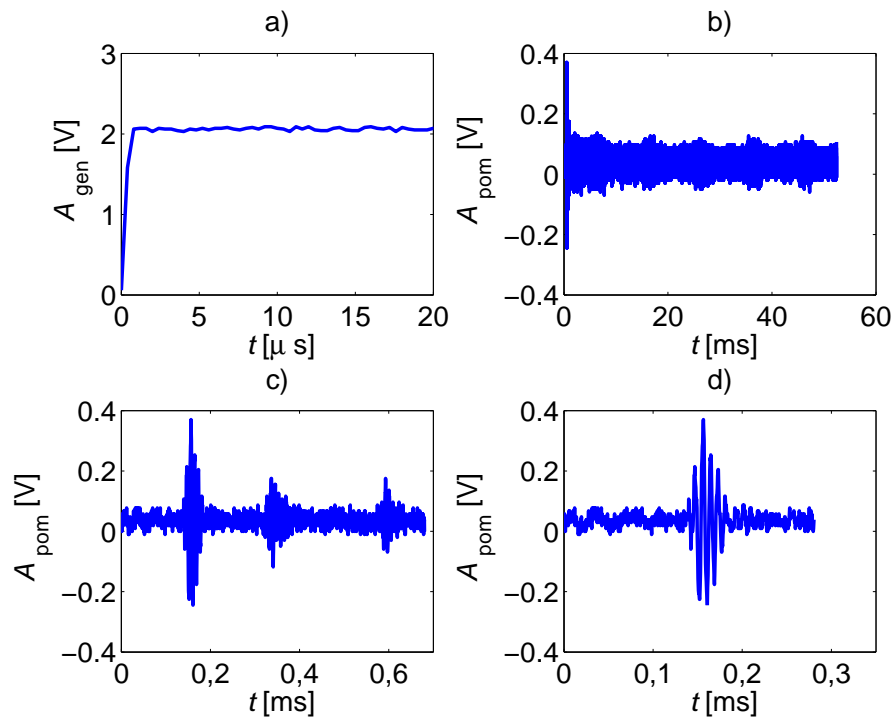
**Rysunek D.6.** Przebiegi czasowe sygnałów EA rejestrowanej przy wymuszeniu skokiem jednostkowym o amplitudzie  $A_{\text{gen}} = 8$  V

**Rysunek D.7.** Przebiegi czasowe sygnałów EA rejestrowanej przy wymuszeniu skokiem jednostkowym o amplitudzie  $A_{\text{gen}} = 9$  V

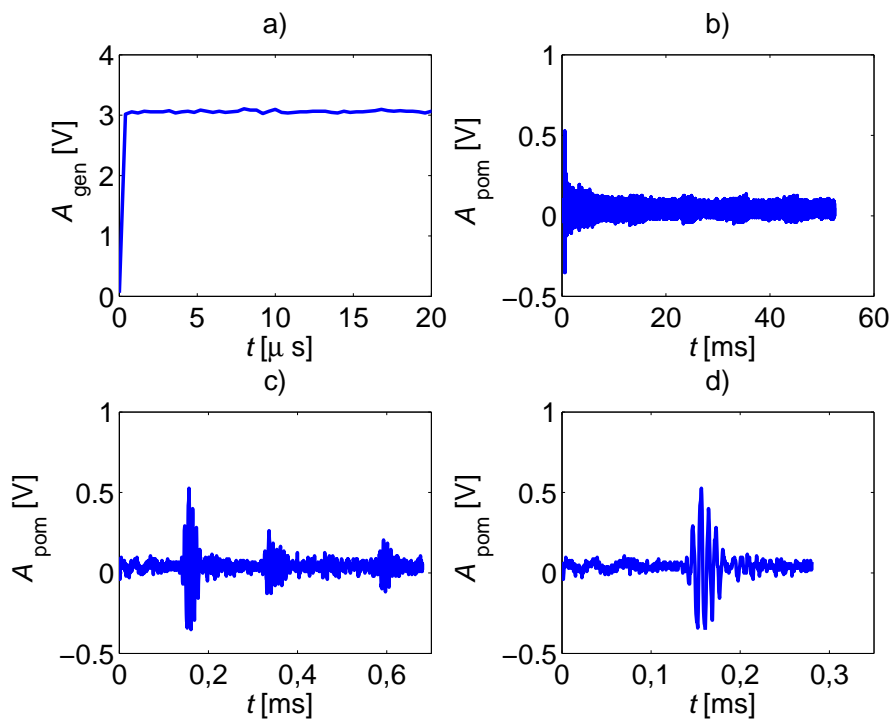
**Rysunek D.8.** Przebiegi czasowe sygnałów EA rejestrowanej przy wymuszeniu skokiem jednostkowym o amplitudzie  $A_{\text{gen}} = 10$  V

**Rysunek D.9.** Przebiegi czasowe sygnałów EA rejestrowanej przy wymuszeniu skokiem jednostkowym o amplitudzie  $A_{\text{gen}} = 11 \text{ V}$

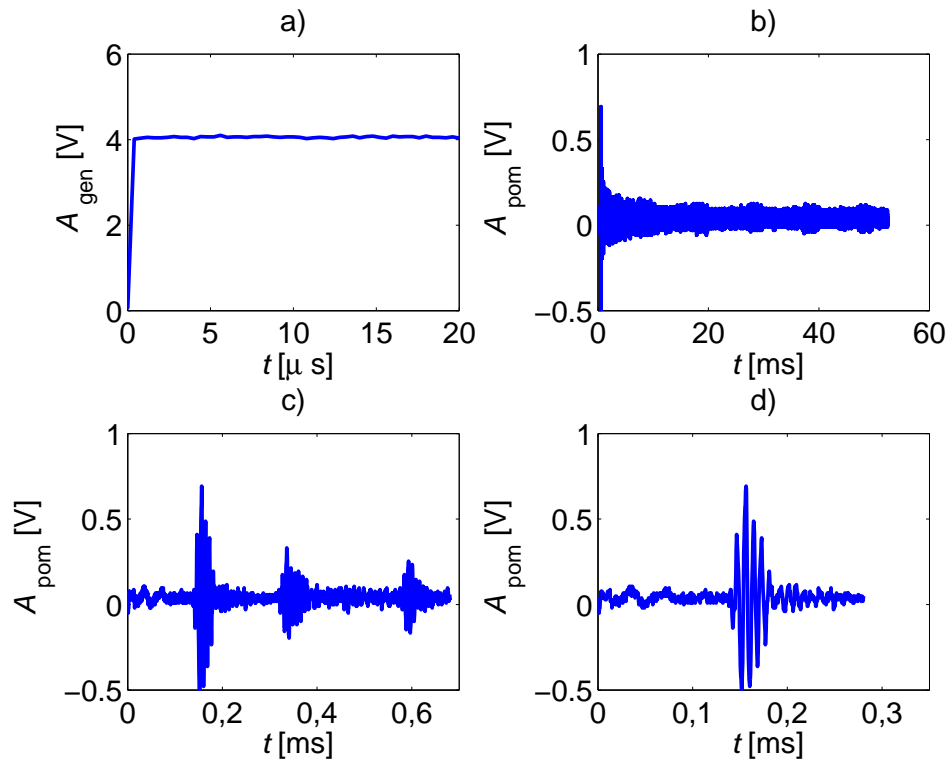
**Rysunek D.10.** Przebiegi czasowe sygnałów EA rejestrowanej przy wymuszeniu skokiem jednostkowym o amplitudzie  $A_{\text{gen}} = 12 \text{ V}$



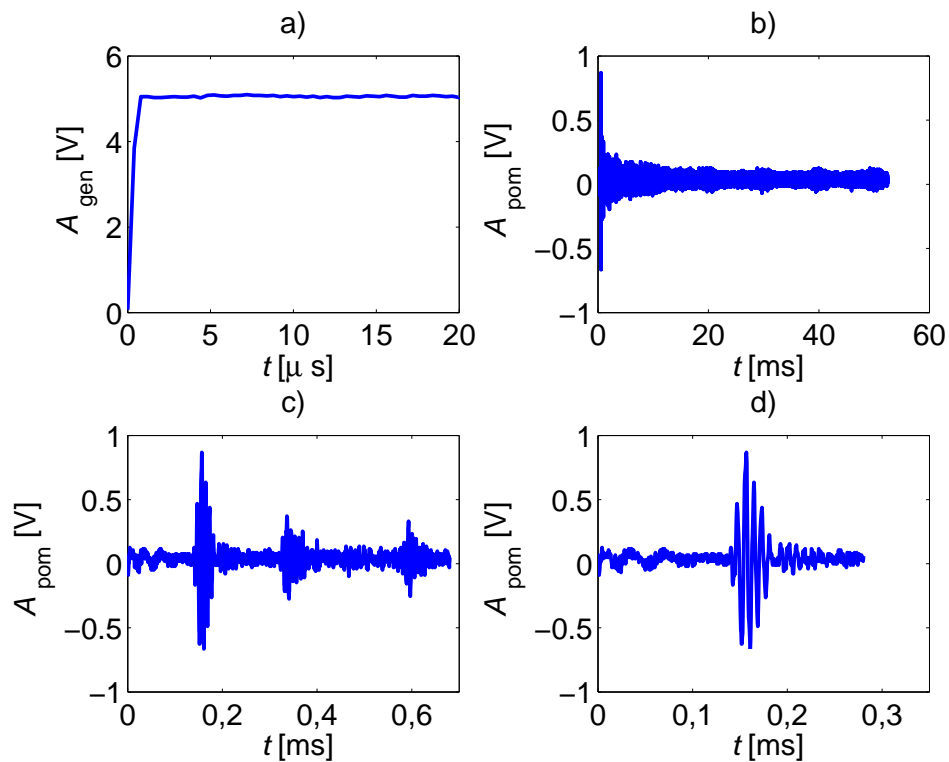
Rysunek D.1: Przebiegi czasowe sygnałów EA rejestrowanej przy wymuszeniu skokiem jednostkowym o amplitudzie  $A_{gen} = 3$  V



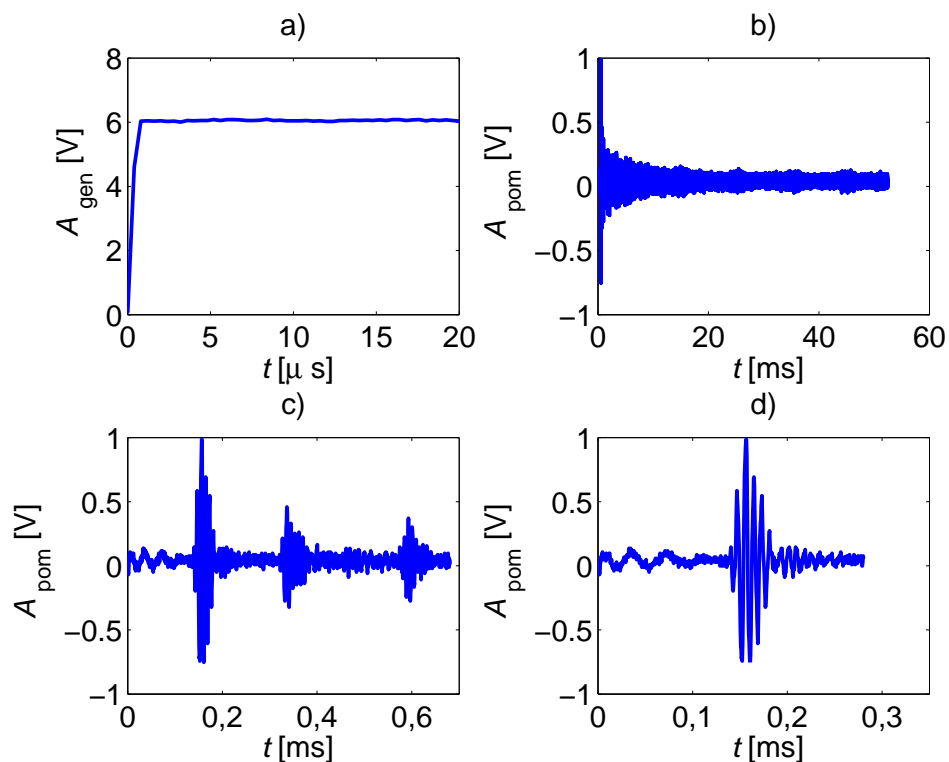
Rysunek D.2: Przebiegi czasowe sygnałów EA rejestrowanej przy wymuszeniu skokiem jednostkowym o amplitudzie  $A_{gen} = 4$  V



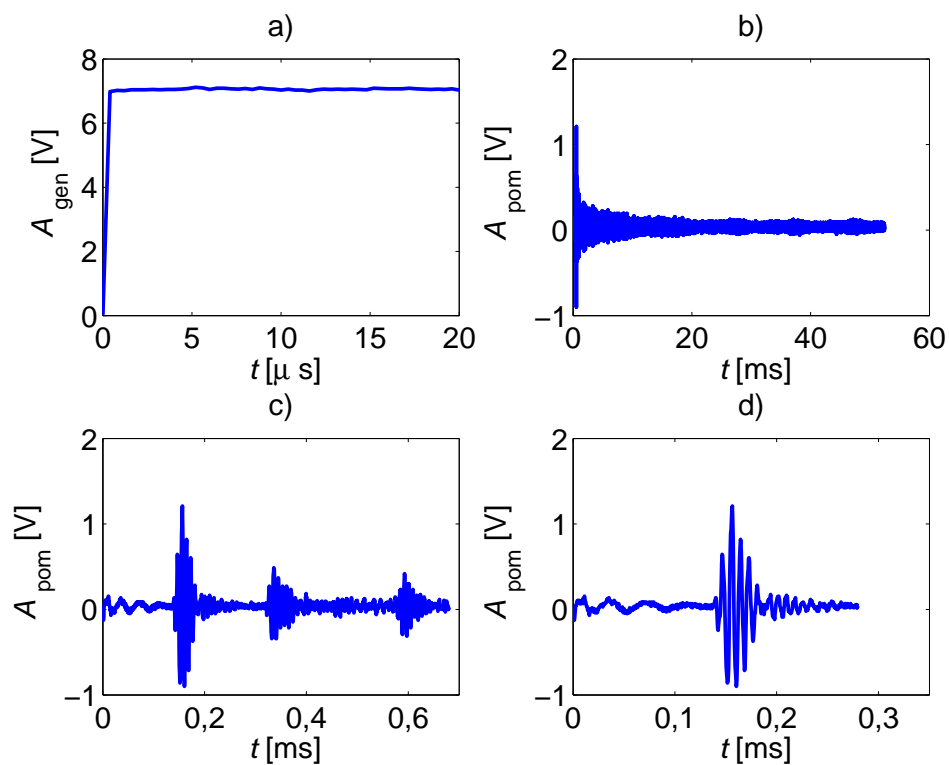
Rysunek D.3: Przebiegi czasowe sygnałów EA rejestrowanej przy wymuszeniu skokiem jednostkowym o amplitudzie  $A_{gen} = 5$  V



Rysunek D.4: Przebiegi czasowe sygnałów EA rejestrowanej przy wymuszeniu skokiem jednostkowym o amplitudzie  $A_{gen} = 6$  V

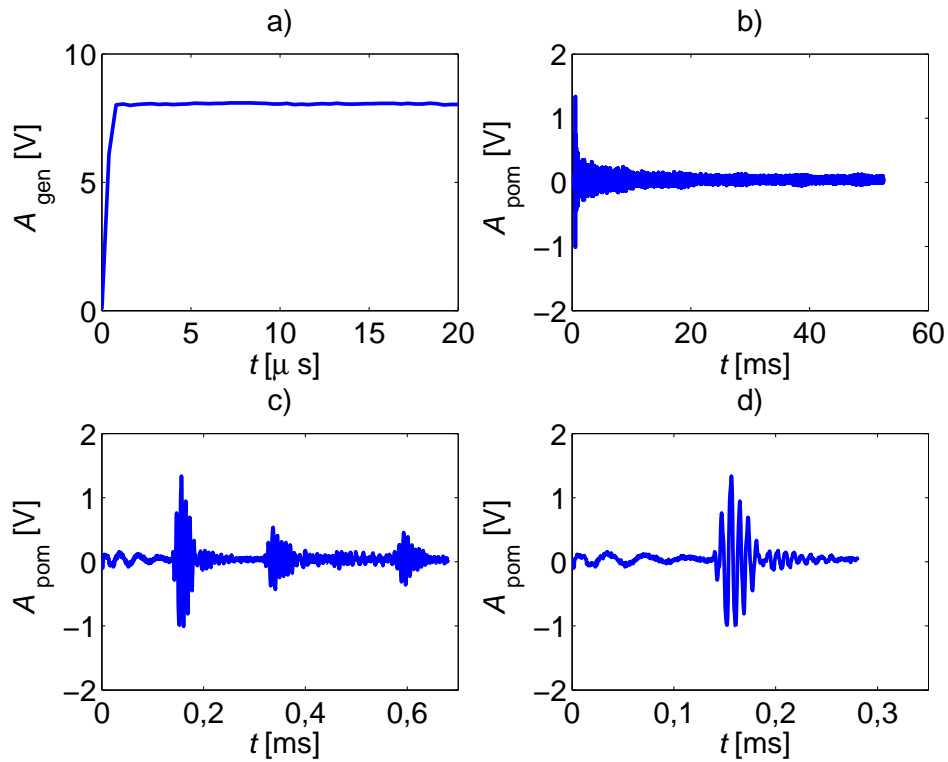


Rysunek D.5: Przebiegi czasowe sygnałów EA rejestrowanej przy wymuszeniu skokiem jednostkowym o amplitudzie  $A_{gen}=7$  V

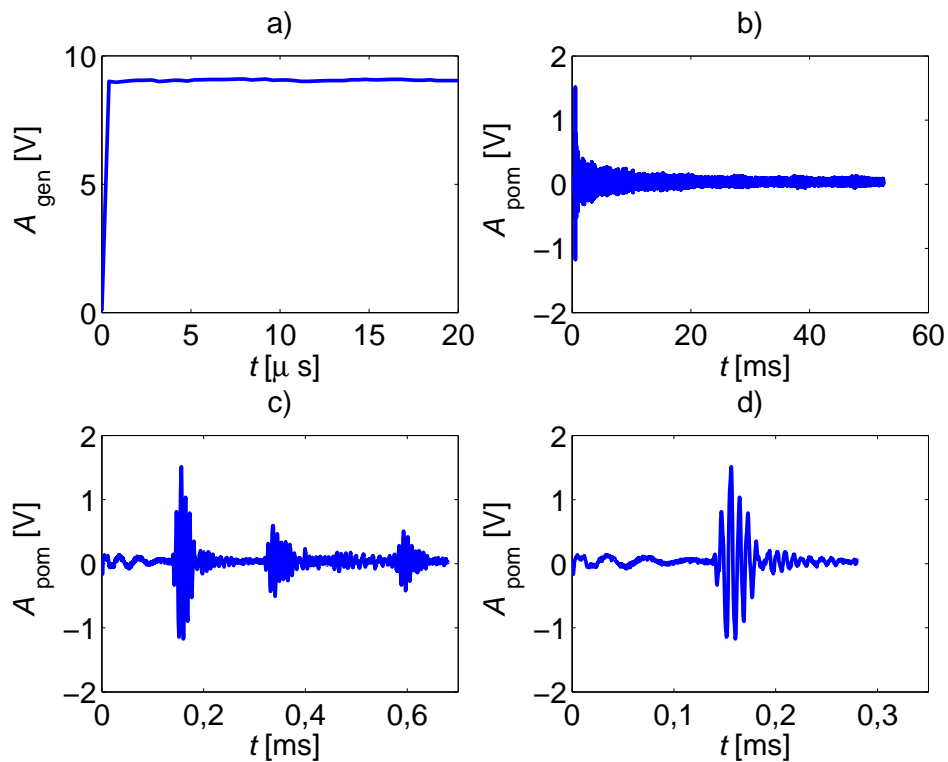


Rysunek D.6: Przebiegi czasowe sygnałów EA rejestrowanej przy wymuszeniu skokiem jednostkowym o amplitudzie  $A_{gen}=8$  V

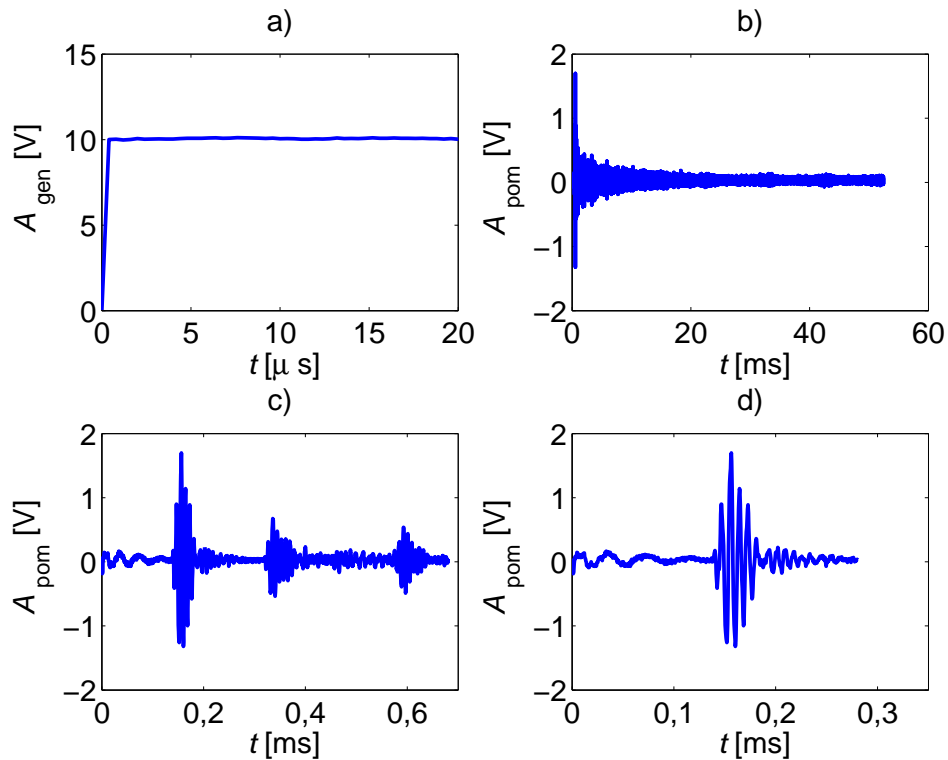




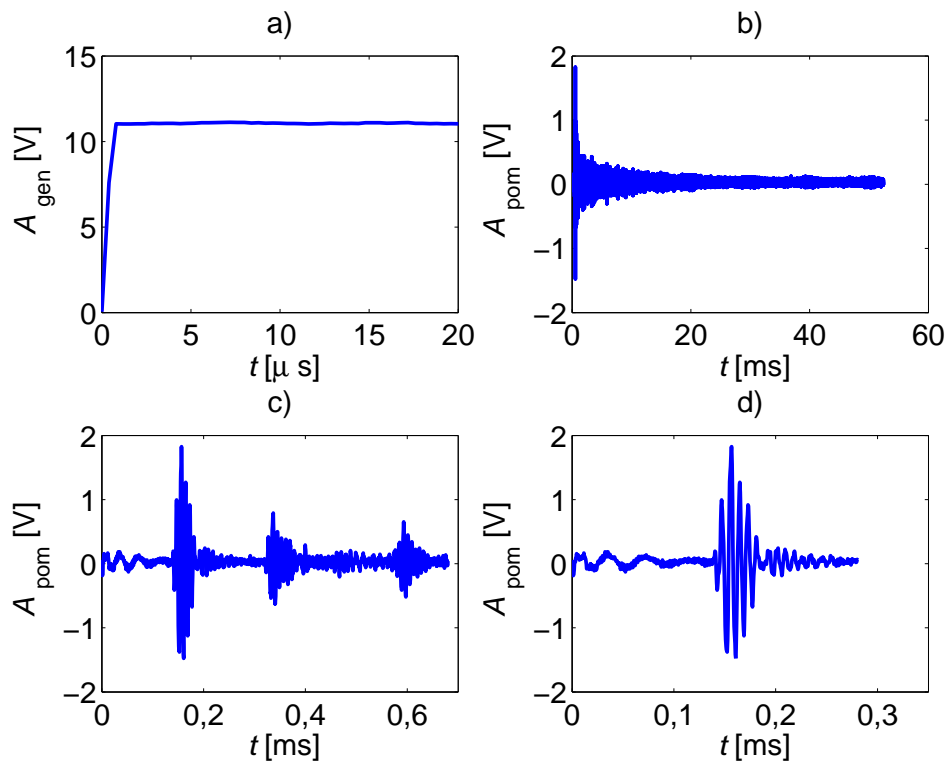
Rysunek D.7: Przebiegi czasowe sygnałów EA rejestrowanej przy wymuszeniu skokiem jednostkowym o amplitudzie  $A_{gen} = 9$  V



Rysunek D.8: Przebiegi czasowe sygnałów EA rejestrowanej przy wymuszeniu skokiem jednostkowym o amplitudzie  $A_{gen} = 10$  V



Rysunek D.9: Przebiegi czasowe sygnałów EA rejestrowanej przy wymuszeniu skokiem jednostkowym o amplitudzie  $A_{gen}=11$  V



Rysunek D.10: Przebiegi czasowe sygnałów EA rejestrowanej przy wymuszeniu skokiem jednostkowym o amplitudzie  $A_{gen}=12$  V

## Załącznik E

---

Przebiegi czasowe sygnałów EA rejestrowanej przy wymuszeniu jednym okresem sinusoidy o częstotliwości 100 kHz i amplitudzie  $A_{\text{gen}}$  zmienianej w zakresie (3-12) V, przetwornikiem PIC155 umieszczonym wewnątrz kadzi w położeniu oznaczonym literą B na rys. 7.7. a) przebieg czasowy rozpatrywanego wymuszenia, b) przebieg czasowy sygnału rejestrowanego, c) wybrany przedział czasowy sygnału rejestrowanego dla przedziału czasu  $t \in (0 - 0,7)$  ms, d) wybrany przedział czasowy sygnału zarejestrowanego dla przedziału czasu  $t \in (0 - 0,7)$  ms

---

**Rysunek E.1.** Przebiegi czasowe sygnałów EA rejestrowanej przy wymuszeniu jednym okresem sinusoidy o amplitudzie  $A_{\text{gen}} = 3$  V

**Rysunek E.2.** Przebiegi czasowe sygnałów EA rejestrowanej przy wymuszeniu jednym okresem sinusoidy o amplitudzie  $A_{\text{gen}} = 4$  V

**Rysunek E.3.** Przebiegi czasowe sygnałów EA rejestrowanej przy wymuszeniu jednym okresem sinusoidy o amplitudzie  $A_{\text{gen}} = 5$  V

**Rysunek E.4.** Przebiegi czasowe sygnałów EA rejestrowanej przy wymuszeniu jednym okresem sinusoidy o amplitudzie  $A_{\text{gen}} = 6$  V

**Rysunek E.5.** Przebiegi czasowe sygnałów EA rejestrowanej przy wymuszeniu jednym okresem sinusoidy o amplitudzie  $A_{\text{gen}} = 7$  V

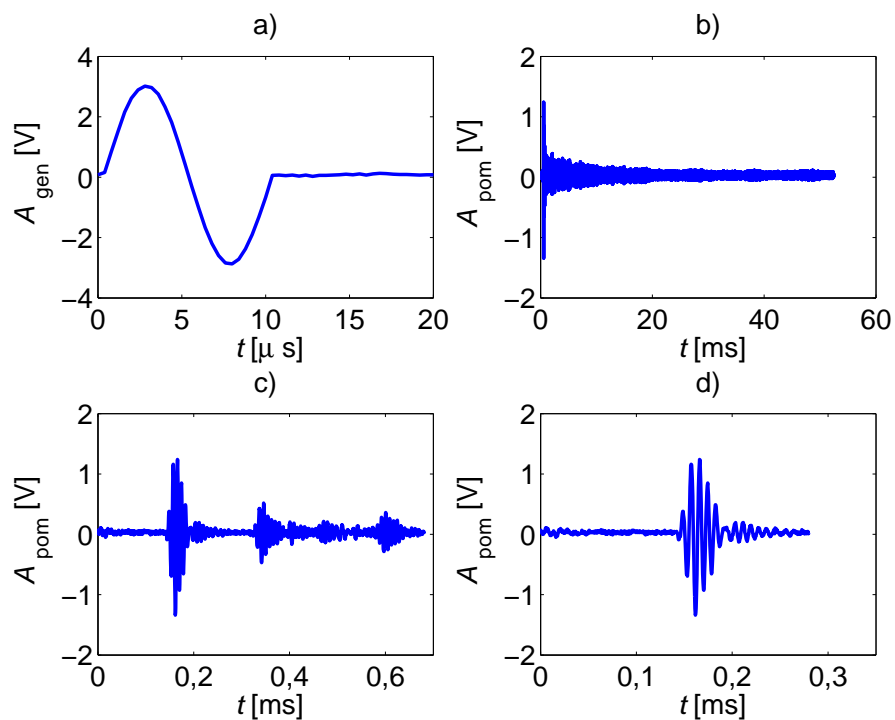
**Rysunek E.6.** Przebiegi czasowe sygnałów EA rejestrowanej przy wymuszeniu jednym okresem sinusoidy o amplitudzie  $A_{\text{gen}} = 8$  V

**Rysunek E.7.** Przebiegi czasowe sygnałów EA rejestrowanej przy wymuszeniu jednym okresem sinusoidy o amplitudzie  $A_{\text{gen}} = 9$  V

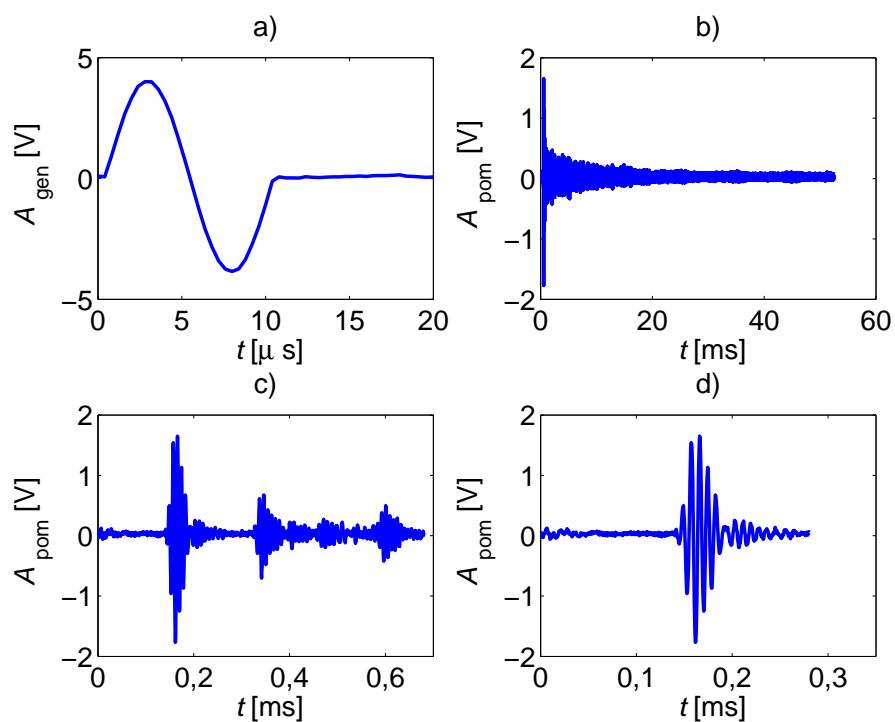
**Rysunek E.8.** Przebiegi czasowe sygnałów EA rejestrowanej przy wymuszeniu jednym okresem sinusoidy o amplitudzie  $A_{\text{gen}} = 10$  V

**Rysunek E.9.** Przebiegi czasowe sygnałów EA rejestrowanej przy wymuszeniu jednym okresem sinusoidy o amplitudzie  $A_{\text{gen}} = 11 \text{ V}$

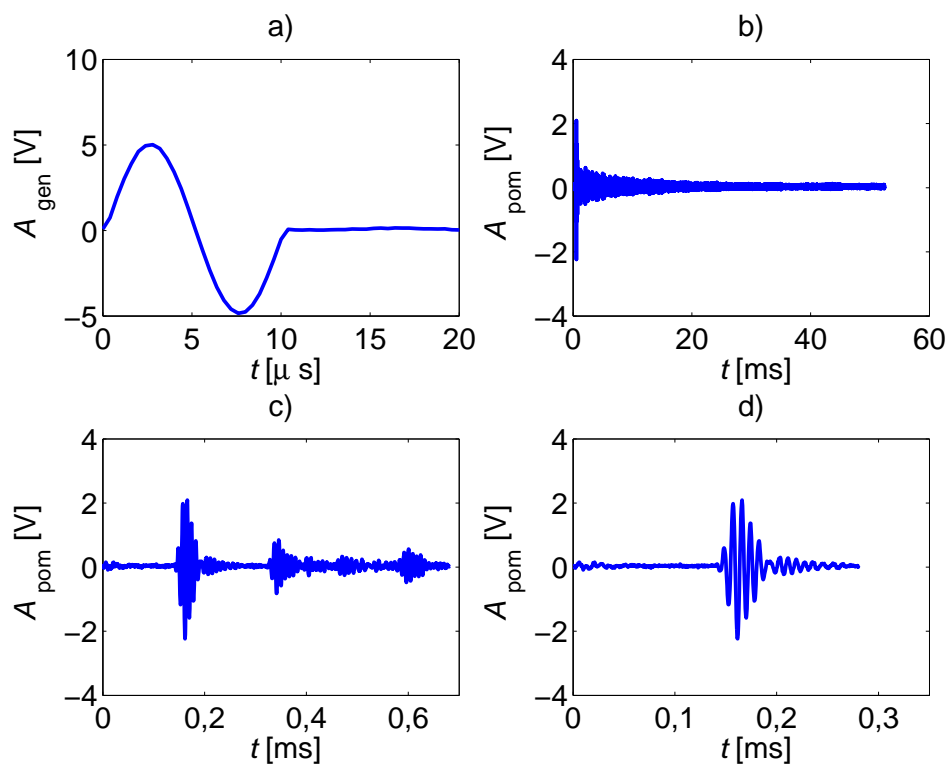
**Rysunek E.10.** Przebiegi czasowe sygnałów EA rejestrowanej przy wymuszeniu jednym okresem sinusoidy o amplitudzie  $A_{\text{gen}} = 12 \text{ V}$



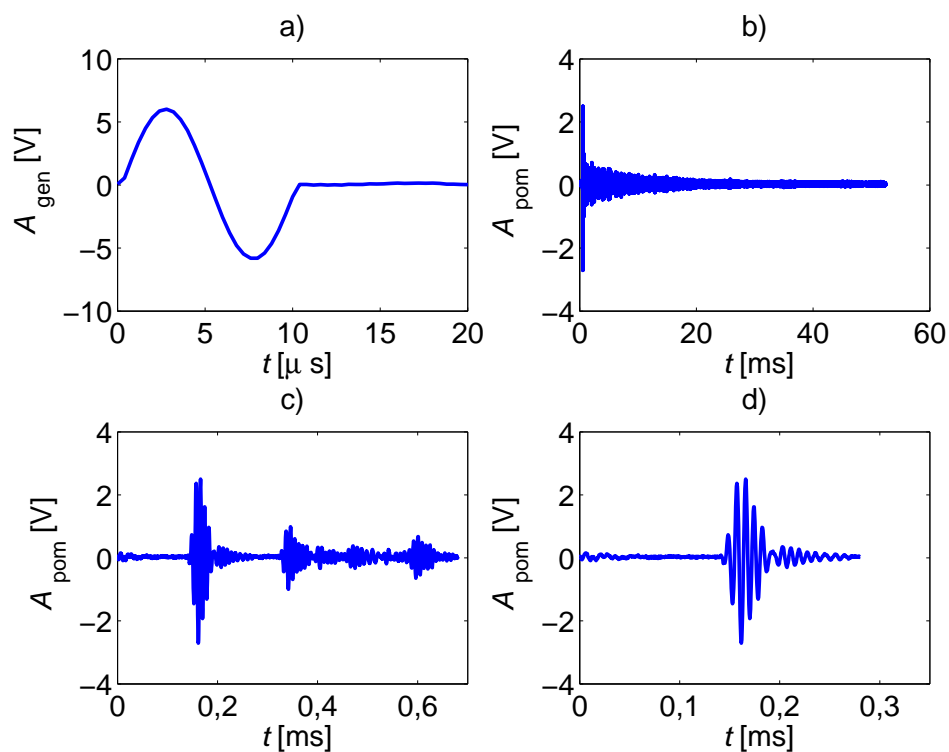
Rysunek E.1: Przebiegi czasowe sygnałów EA rejestrowanej przy wymuszeniu jednym okresem sinusoidy o amplitudzie  $A_{gen} = 3$  V



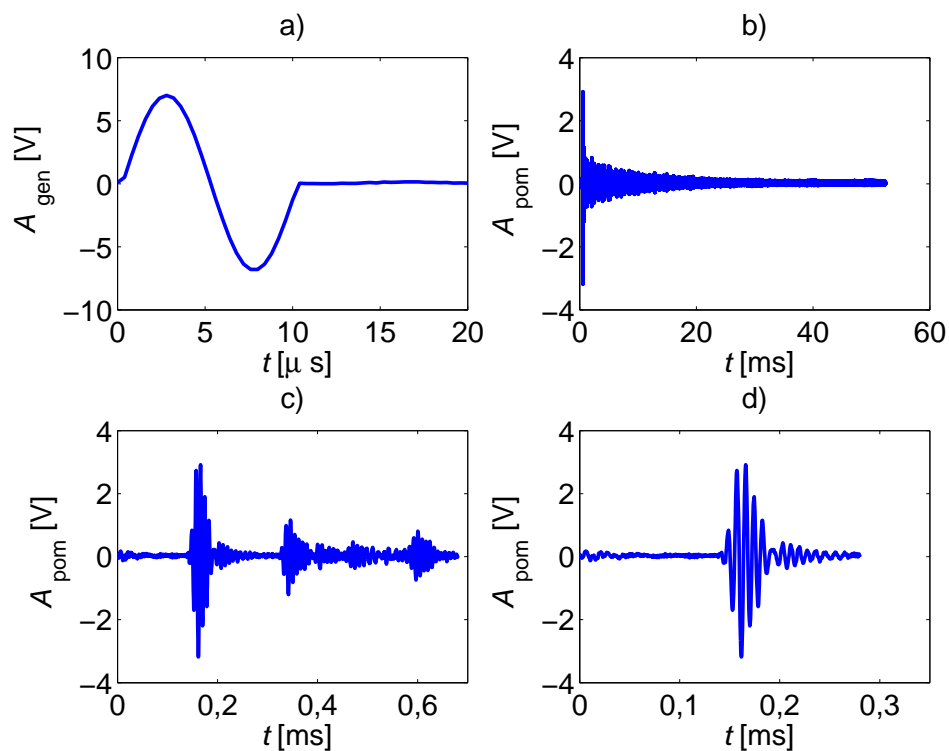
Rysunek E.2: Przebiegi czasowe sygnałów EA rejestrowanej przy wymuszeniu jednym okresem sinusoidy o amplitudzie  $A_{gen} = 4$  V



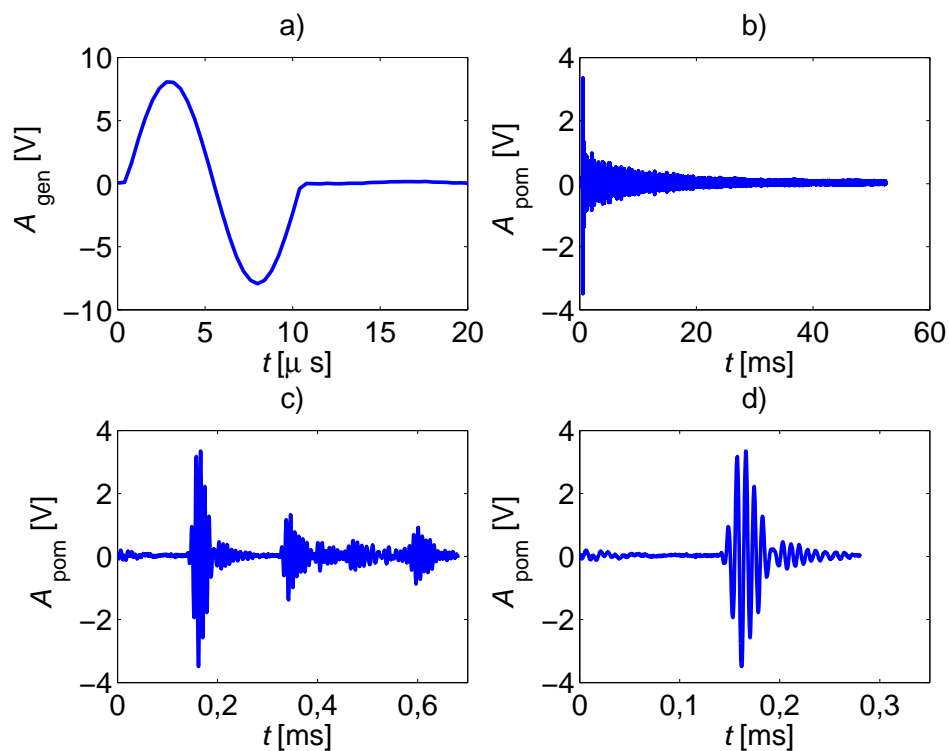
Rysunek E.3: Przebiegi czasowe sygnałów EA rejestrowanej przy wymuszeniu jednym okresem sinusoidy o amplitudzie  $A_{gen} = 5$  V



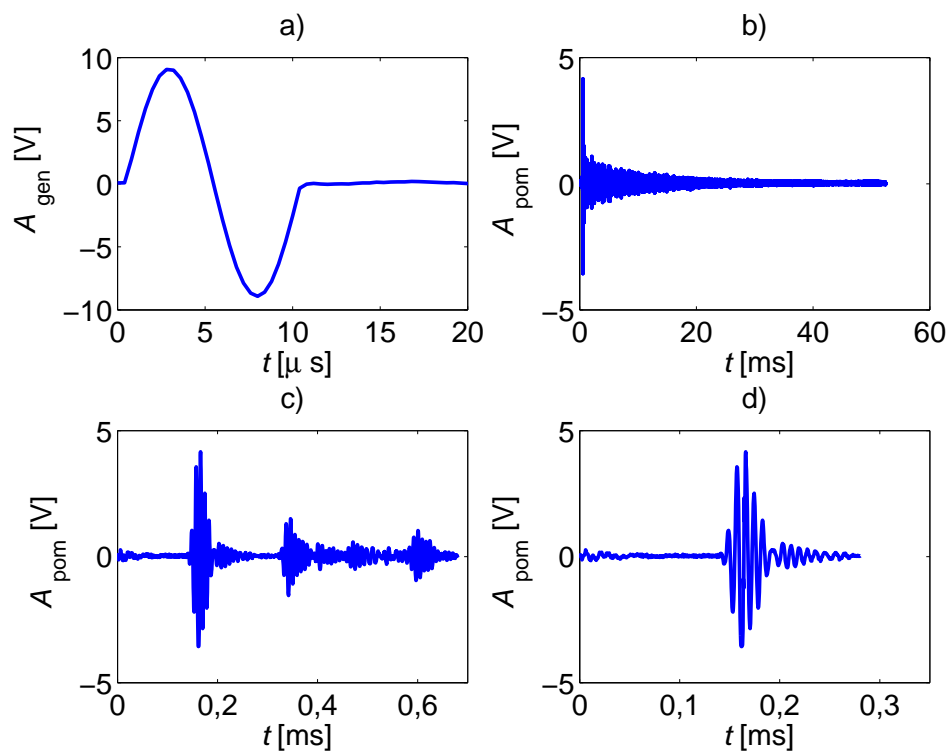
Rysunek E.4: Przebiegi czasowe sygnałów EA rejestrowanej przy wymuszeniu jednym okresem sinusoidy o amplitudzie  $A_{gen} = 6$  V



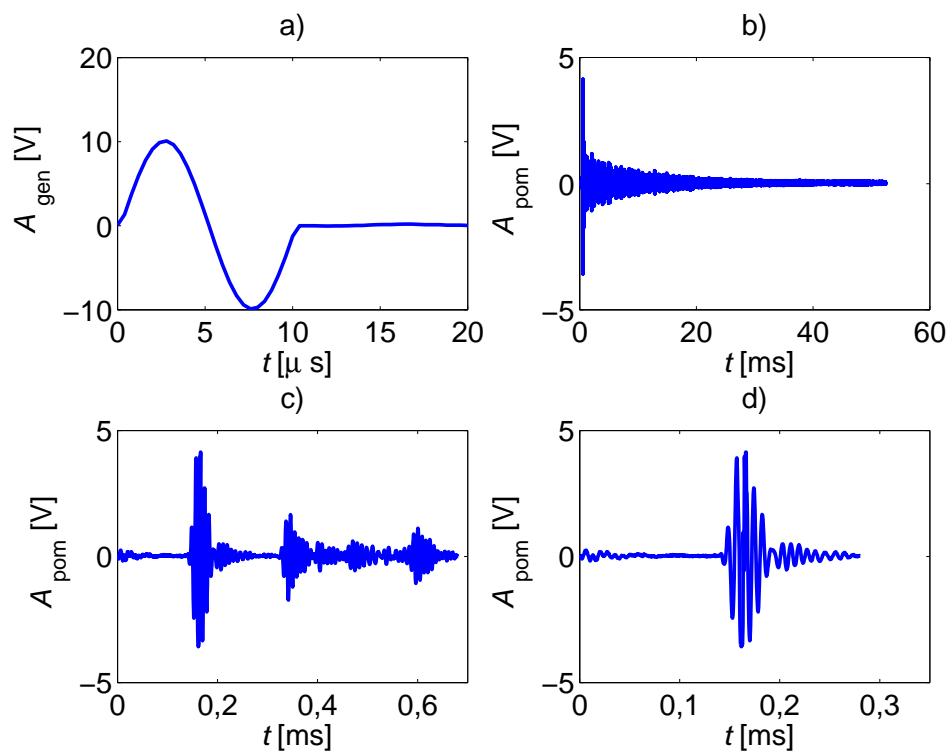
Rysunek E.5: Przebiegi czasowe sygnałów EA rejestrowanej przy wymuszeniu jednym okresem sinusoidy o amplitudzie  $A_{gen} = 7$  V



Rysunek E.6: Przebiegi czasowe sygnałów EA rejestrowanej przy wymuszeniu jednym okresem sinusoidy o amplitudzie  $A_{gen} = 8$  V

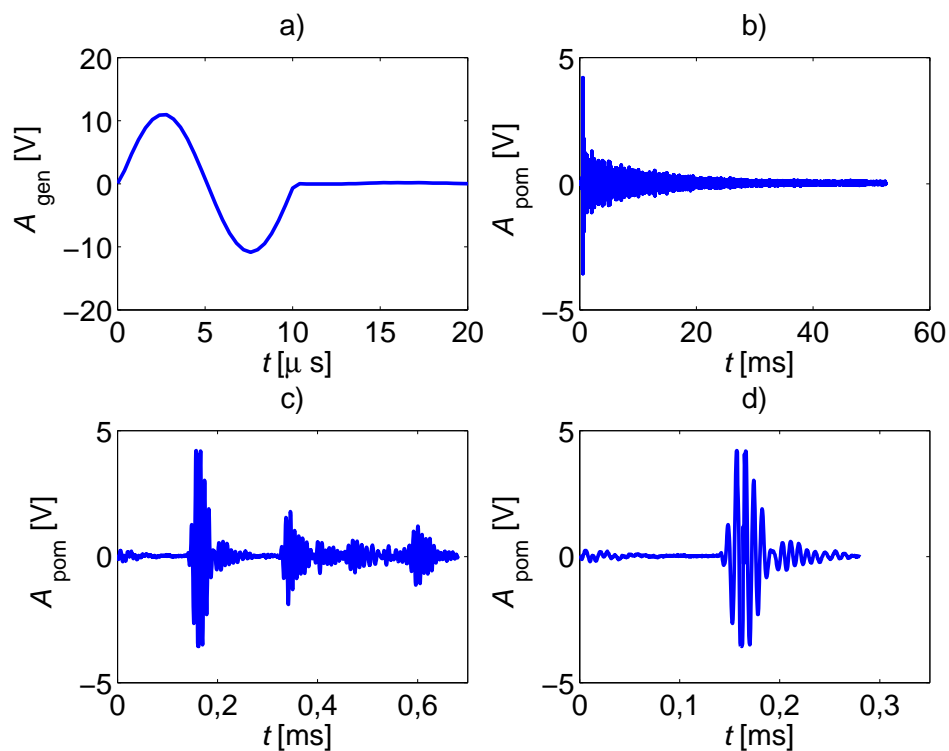


Rysunek E.7: Przebiegi czasowe sygnałów EA rejestrowanej przy wymuszeniu jednym okresem sinusoidy o amplitudzie  $A_{gen} = 9$  V

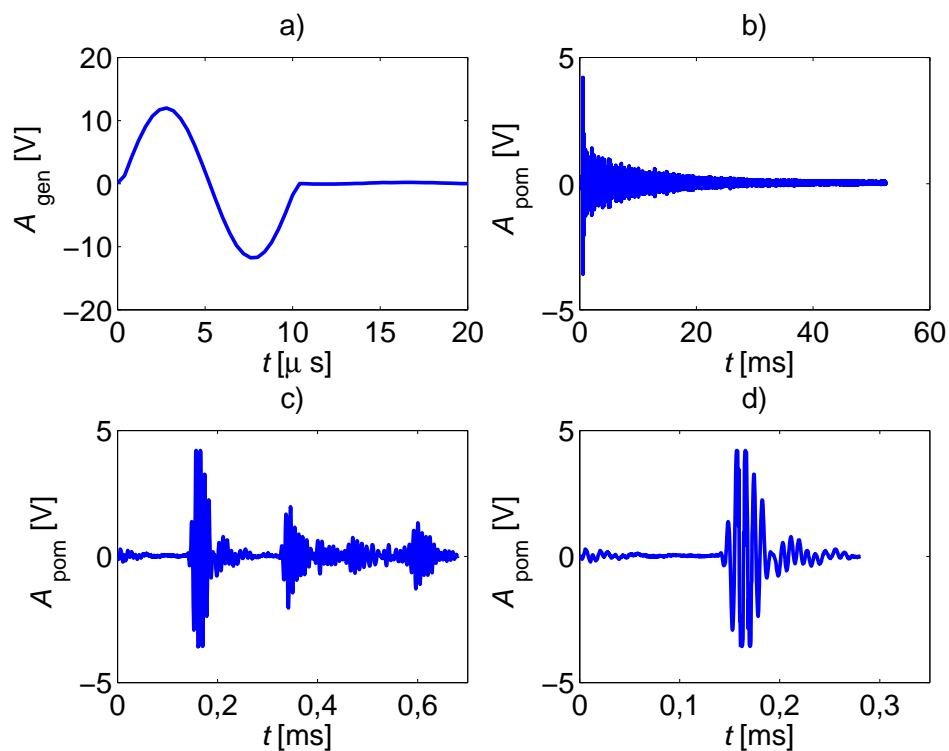


Rysunek E.8: Przebiegi czasowe sygnałów EA rejestrowanej przy wymuszeniu jednym okresem sinusoidy o amplitudzie  $A_{gen} = 10$  V





Rysunek E.9: Przebiegi czasowe sygnałów EA rejestrowanej przy wymuszeniu jednym okresem sinusoidy o amplitudzie  $A_{gen} = 11$  V



Rysunek E.10: Przebiegi czasowe sygnałów EA rejestrowanej przy wymuszeniu jednym okresem sinusoidy o amplitudzie  $A_{gen} = 12$  V

## Załącznik F

---

**Spektrogramy sygnałów EA rejestrowanej przy wymuszeniu skokiem jednostkowym o amplitudzie  $A_{\text{gen}} \in (3 - 12)$  V przetwornikiem PIC155 umieszczonym w miejscu oznaczonym literą B na rys. 7.7: i) dla przedziału czasu  $t \in (0 - 50)$  ms, ii) dla przedziału czasu  $t \in (0 - 1, 2)$  ms**

---

**Rysunek F.1.** Spektrogram sygnałów EA  $A_{\text{pom}}$  [dB] rejestrowanej przy wymuszeniu skokiem jednostkowym o amplitudzie  $A_{\text{gen}}=3$  V: i) dla przedziału czasu  $t \in (0 - 50)$  ms, ii) dla przedziału czasu  $t \in (0 - 1, 2)$  ms

**Rysunek F.2.** Spektrogram sygnałów EA  $A_{\text{pom}}$  [dB] rejestrowanej przy wymuszeniu skokiem jednostkowym o amplitudzie  $A_{\text{gen}}=4$  V: i) dla przedziału czasu  $t \in (0 - 50)$  ms, ii) dla przedziału czasu  $t \in (0 - 1, 2)$  ms

**Rysunek F.3.** Spektrogram sygnałów EA  $A_{\text{pom}}$  [dB] rejestrowanej przy wymuszeniu skokiem jednostkowym o amplitudzie  $A_{\text{gen}}=5$  V: i) dla przedziału czasu  $t \in (0 - 50)$  ms, ii) dla przedziału czasu  $t \in (0 - 1, 2)$  ms

**Rysunek F.4.** Spektrogram sygnałów EA  $A_{\text{pom}}$  [dB] rejestrowanej przy wymuszeniu skokiem jednostkowym o amplitudzie  $A_{\text{gen}}=6$  V: i) dla przedziału czasu  $t \in (0 - 50)$  ms, ii) dla przedziału czasu  $t \in (0 - 1, 2)$  ms

**Rysunek F.5.** Spektrogram sygnałów EA  $A_{\text{pom}}$  [dB] rejestrowanej przy wymuszeniu skokiem jednostkowym o amplitudzie  $A_{\text{gen}}=7$  V: i) dla przedziału czasu  $t \in (0 - 50)$  ms, ii) dla przedziału czasu  $t \in (0 - 1, 2)$  ms

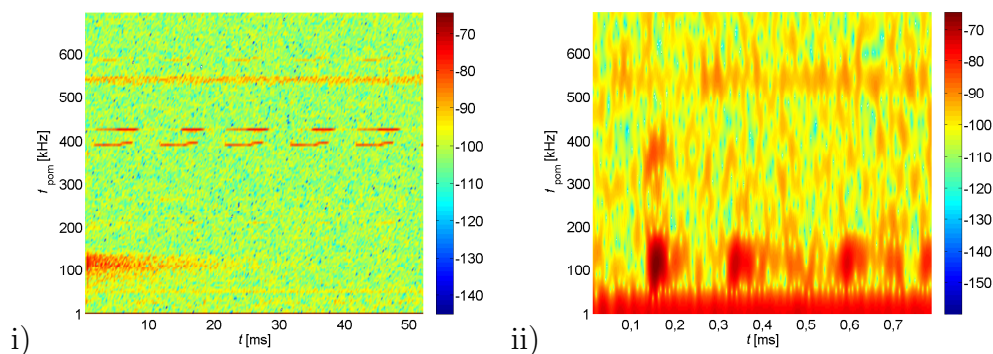
**Rysunek F.6.** Spektrogram sygnałów EA  $A_{\text{pom}}$  [dB] rejestrowanej przy wymuszeniu skokiem jednostkowym o amplitudzie  $A_{\text{gen}}=8$  V: i) dla przedziału czasu  $t \in (0 - 50)$  ms, ii) dla przedziału czasu  $t \in (0 - 1, 2)$  ms

**Rysunek F.7.** Spektrogram sygnałów EA  $A_{\text{pom}}$  [dB] rejestrowanej przy wymuszeniu skokiem jednostkowym o amplitudzie  $A_{\text{gen}}=9$  V: i) dla przedziału czasu  $t \in (0 - 50)$  ms, ii) dla przedziału czasu  $t \in (0 - 1, 2)$  ms

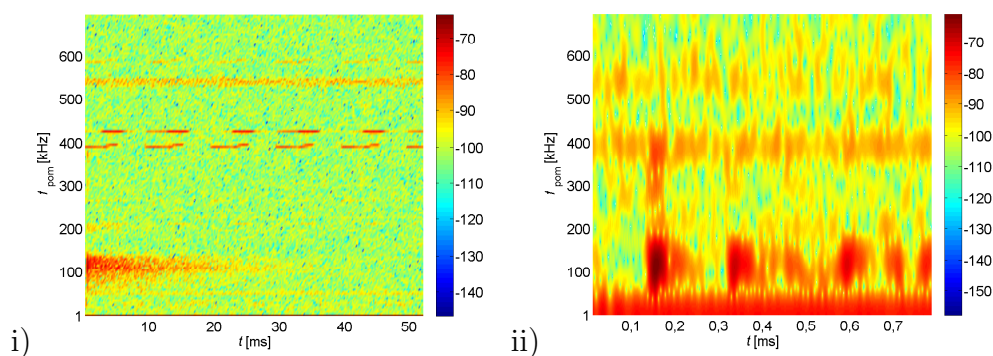
**Rysunek F.8.** Spektrogram sygnałów EA  $A_{\text{pom}}$  [dB] rejestrowanej przy wymuszeniu skokiem jednostkowym o amplitudzie  $A_{\text{gen}}=10$  V: i) dla przedziału czasu  $t \in (0 - 50)$  ms, ii) dla przedziału czasu  $t \in (0 - 1, 2)$  ms

**Rysunek F.9.** Spektrogram sygnałów EA  $A_{\text{pom}}$  [dB] rejestrowanej przy wymuszeniu skokiem jednostkowym o amplitudzie  $A_{\text{gen}}=11$  V: i) dla przedziału czasu  $t \in (0-50)$  ms, ii) dla przedziału czasu  $t \in (0-1,2)$  ms

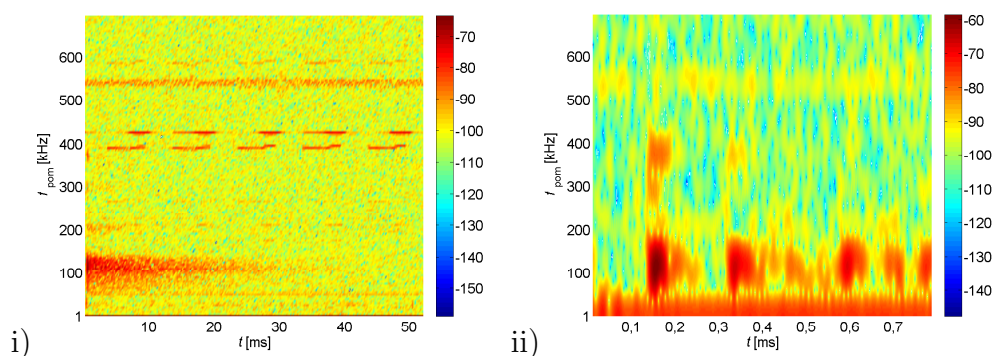
**Rysunek F.10.** Spektrogram sygnałów EA  $A_{\text{pom}}$  [dB] rejestrowanej przy wymuszeniu skokiem jednostkowym o amplitudzie  $A_{\text{gen}}=12$  V: i) dla przedziału czasu  $t \in (0-50)$  ms, ii) dla przedziału czasu  $t \in (0-1,2)$  ms



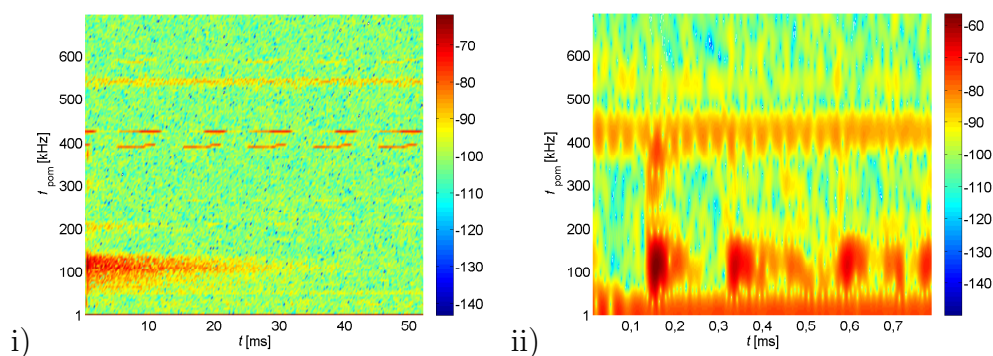
Rysunek F.1: Spektrogram sygnałów EA  $A_{\text{pom}}$  [dB] rejestrowanej przy wymuszeniu skokiem jednostkowym o amplitudzie  $A_{\text{gen}}=3$  V: i) dla przedziału czasu  $t \in (0 - 50)$  ms, ii) dla przedziału czasu  $t \in (0 - 1, 2)$  ms



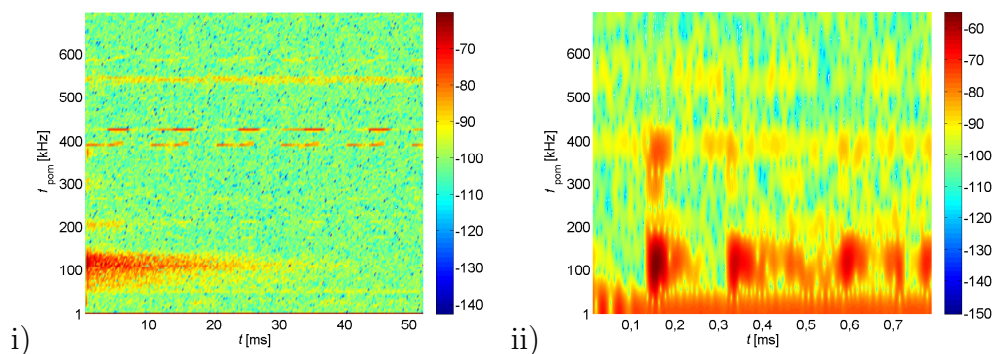
Rysunek F.2: Spektrogram sygnałów EA  $A_{\text{pom}}$  [dB] rejestrowanej przy wymuszeniu skokiem jednostkowym o amplitudzie  $A_{\text{gen}}=4$  V: i) dla przedziału czasu  $t \in (0 - 50)$  ms, ii) dla przedziału czasu  $t \in (0 - 1, 2)$  ms



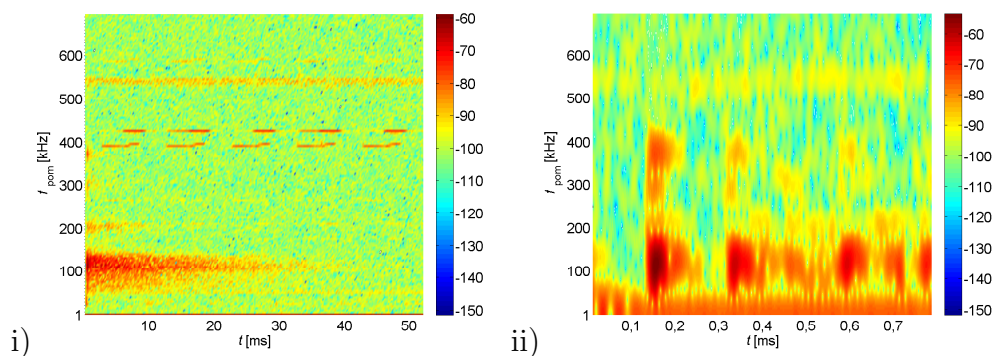
Rysunek F.3: Spektrogram sygnałów EA  $A_{\text{pom}}$  [dB] rejestrowanej przy wymuszeniu skokiem jednostkowym o amplitudzie  $A_{\text{gen}}=5$  V: i) dla przedziału czasu  $t \in (0 - 50)$  ms, ii) dla przedziału czasu  $t \in (0 - 1, 2)$  ms



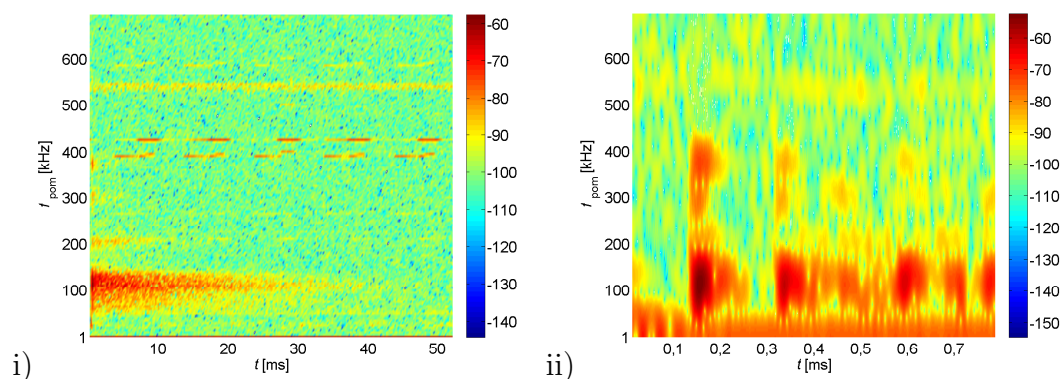
Rysunek F.4: Spektrogram sygnałów EA  $A_{\text{pom}}$  [dB] rejestrowanej przy wymuszeniu skokiem jednostkowym o amplitudzie  $A_{\text{gen}}=6$  V: i) dla przedziału czasu  $t \in (0 - 50)$  ms, ii) dla przedziału czasu  $t \in (0 - 1, 2)$  ms



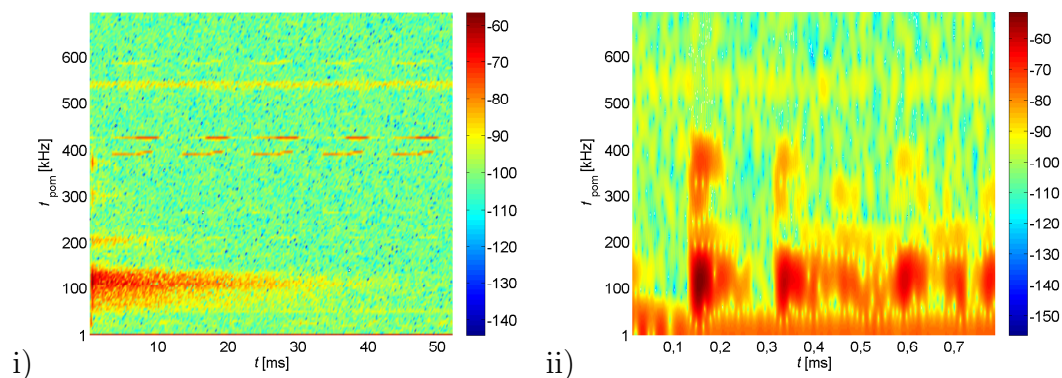
Rysunek F.5: Spektrogram sygnałów EA  $A_{\text{pom}}$  [dB] rejestrowanej przy wymuszeniu skokiem jednostkowym o amplitudzie  $A_{\text{gen}}=7$  V: i) dla przedziału czasu  $t \in (0 - 50)$  ms, ii) dla przedziału czasu  $t \in (0 - 1, 2)$  ms



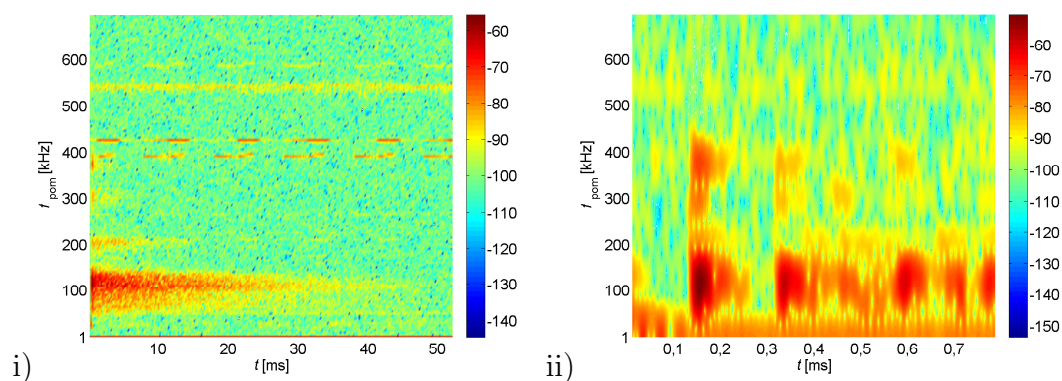
Rysunek F.6: Spektrogram sygnałów EA  $A_{\text{pom}}$  [dB] rejestrowanej przy wymuszeniu skokiem jednostkowym o amplitudzie  $A_{\text{gen}}=8$  V: i) dla przedziału czasu  $t \in (0 - 50)$  ms, ii) dla przedziału czasu  $t \in (0 - 1, 2)$  ms



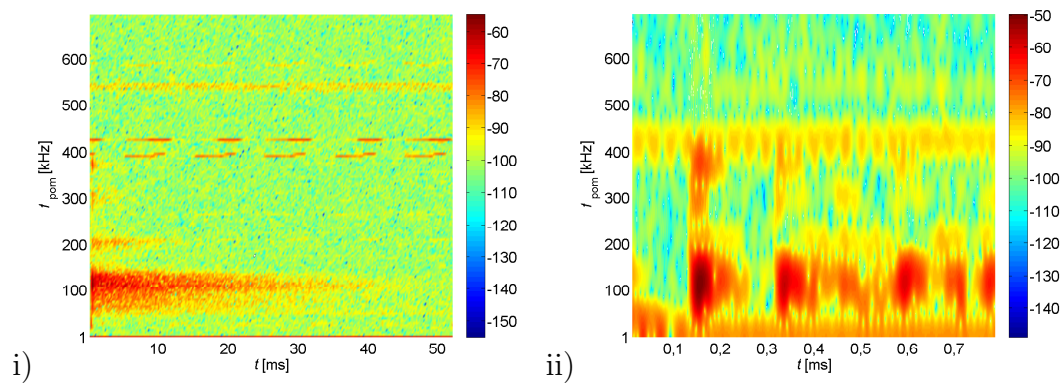
Rysunek F.7: Spektrogram sygnałów EA  $A_{\text{pom}}$  [dB] rejestrowanej przy wymuszeniu skokiem jednostkowym o amplitudzie  $A_{\text{gen}}=9$  V: i) dla przedziału czasu  $t \in (0 - 50)$  ms, ii) dla przedziału czasu  $t \in (0 - 1, 2)$  ms



Rysunek F.8: Spektrogram sygnałów EA  $A_{\text{pom}}$  [dB] rejestrowanej przy wymuszeniu skokiem jednostkowym o amplitudzie  $A_{\text{gen}}=10$  V: i) dla przedziału czasu  $t \in (0 - 50)$  ms, ii) dla przedziału czasu  $t \in (0 - 1, 2)$  ms



Rysunek F.9: Spektrogram sygnałów EA  $A_{\text{pom}}$  [dB] rejestrowanej przy wymuszeniu skokiem jednostkowym o amplitudzie  $A_{\text{gen}}=11$  V: i) dla przedziału czasu  $t \in (0 - 50)$  ms, ii) dla przedziału czasu  $t \in (0 - 1, 2)$  ms



Rysunek F.10: Spektrogram sygnałów EA  $A_{pom}$  [dB] rejestrowanej przy wymuszeniu skokiem jednostkowym o amplitudzie  $A_{gen}=12$  V: i) dla przedziału czasu  $t \in (0 - 50)$  ms, ii) dla przedziału czasu  $t \in (0 - 1, 2)$  ms

## Załącznik G

---

**Spektrogramy sygnałów EA  $A_{\text{pom}}$  [dB] rejestrowanej przy wymuszeniu jednym okresem sinusoidy o amplitudzie  $A_{\text{gen}} \in (3 - 12)$  V przetwornikiem PIC155 umieszczonym w miejscu oznaczonym literą B na rys. 7.7: i) dla przedziału czasu  $t \in (0 - 50)$  ms, ii) dla przedziału czasu  $t \in (0 - 1, 2)$  ms**

---

**Rysunek G.1.** Spektrogram sygnałów EA  $A_{\text{pom}}$  [dB] rejestrowanej przy wymuszeniu jednym okresem sinusoidy o amplitudzie  $A_{\text{gen}}=3$  V: i) dla przedziału czasu  $t \in (0 - 50)$  ms, ii) dla przedziału czasu  $t \in (0 - 1, 2)$  ms

**Rysunek G.2.** Spektrogram sygnałów EA  $A_{\text{pom}}$  [dB] rejestrowanej przy wymuszeniu jednym okresem sinusoidy o amplitudzie  $A_{\text{gen}}=4$  V: i) dla przedziału czasu  $t \in (0 - 50)$  ms, ii) dla przedziału czasu  $t \in (0 - 1, 2)$  ms

**Rysunek G.3.** Spektrogram sygnałów EA  $A_{\text{pom}}$  [dB] rejestrowanej przy wymuszeniu jednym okresem sinusoidy o amplitudzie  $A_{\text{gen}}=5$  V: i) dla przedziału czasu  $t \in (0 - 50)$  ms, ii) dla przedziału czasu  $t \in (0 - 1, 2)$  ms

**Rysunek G.4.** Spektrogram sygnałów EA  $A_{\text{pom}}$  [dB] rejestrowanej przy wymuszeniu jednym okresem sinusoidy o amplitudzie  $A_{\text{gen}}=6$  V: i) dla przedziału czasu  $t \in (0 - 50)$  ms, ii) dla przedziału czasu  $t \in (0 - 1, 2)$  ms

**Rysunek G.5.** Spektrogram sygnałów EA  $A_{\text{pom}}$  [dB] rejestrowanej przy wymuszeniu jednym okresem sinusoidy o amplitudzie  $A_{\text{gen}}=7$  V: i) dla przedziału czasu  $t \in (0 - 50)$  ms, ii) dla przedziału czasu  $t \in (0 - 1, 2)$  ms

**Rysunek G.6.** Spektrogram sygnałów EA  $A_{\text{pom}}$  [dB] rejestrowanej przy wymuszeniu jednym okresem sinusoidy o amplitudzie  $A_{\text{gen}}=8$  V: i) dla przedziału czasu  $t \in (0 - 50)$  ms, ii) dla przedziału czasu  $t \in (0 - 1, 2)$  ms

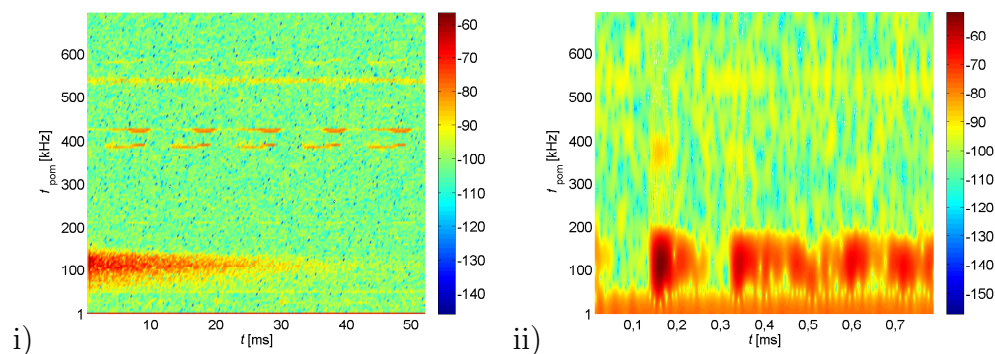
**Rysunek G.7.** Spektrogram sygnałów EA  $A_{\text{pom}}$  [dB] rejestrowanej przy wymuszeniu jednym okresem sinusoidy o amplitudzie  $A_{\text{gen}}=9$  V: i) dla przedziału czasu  $t \in (0 - 50)$  ms, ii) dla przedziału czasu  $t \in (0 - 1, 2)$  ms



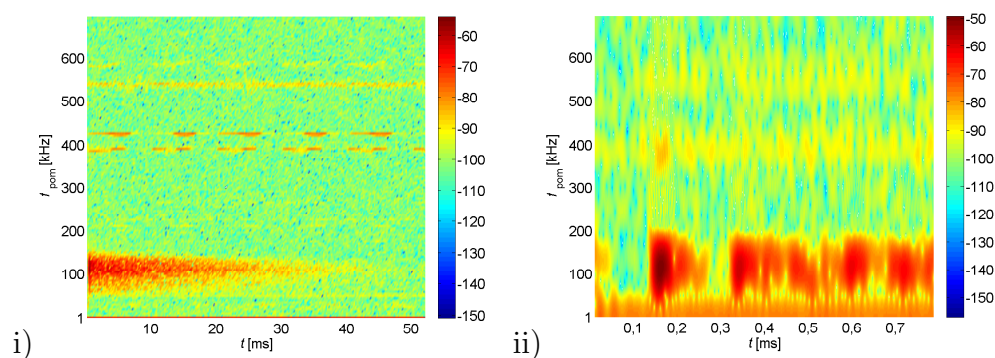
**Rysunek G.8.** Spektrogram sygnałów EA  $A_{\text{pom}}$  [dB] rejestrowanej przy wymuszeniu jednym okresem sinusoidy o amplitudzie  $A_{\text{gen}}=10$  V: i) dla przedziału czasu  $t \in (0 - 50)$  ms, ii) dla przedziału czasu  $t \in (0 - 1, 2)$  ms

**Rysunek G.9.** Spektrogram sygnałów EA  $A_{\text{pom}}$  [dB] rejestrowanej przy wymuszeniu jednym okresem sinusoidy o amplitudzie  $A_{\text{gen}}=11$  V: i) dla przedziału czasu  $t \in (0 - 50)$  ms, ii) dla przedziału czasu  $t \in (0 - 1, 2)$  ms

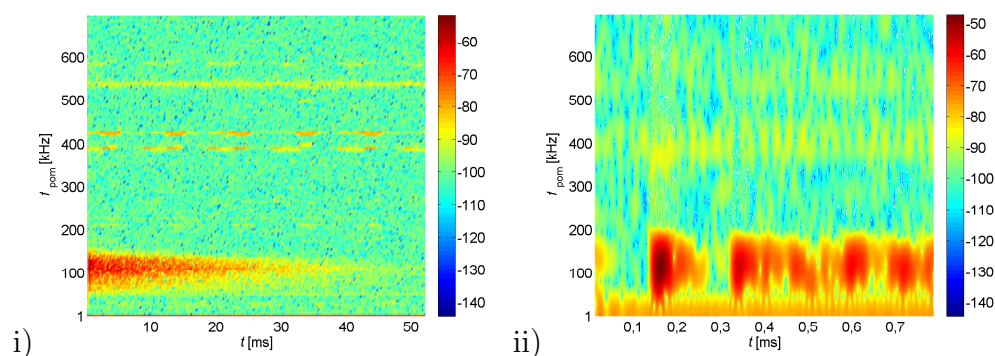
**Rysunek G.10.** Spektrogram sygnałów EA  $A_{\text{pom}}$  [dB] rejestrowanej przy wymuszeniu jednym okresem sinusoidy o amplitudzie  $A_{\text{gen}}=12$  V: i) dla przedziału czasu  $t \in (0 - 50)$  ms, ii) dla przedziału czasu  $t \in (0 - 1, 2)$  ms



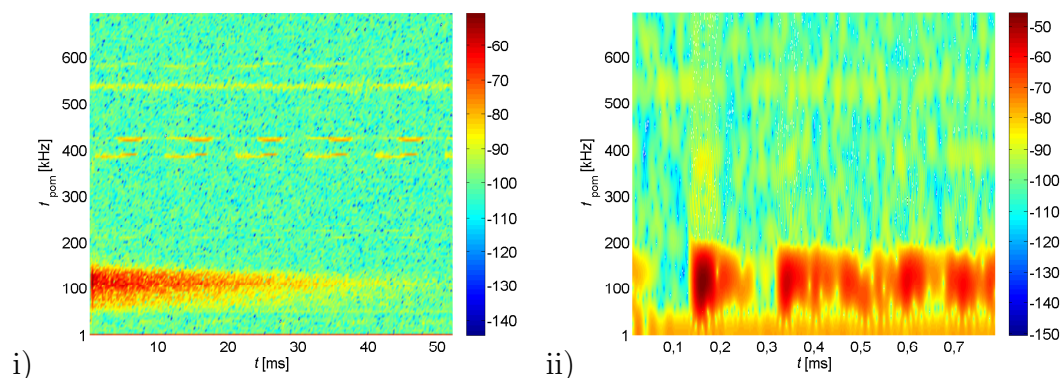
Rysunek G.1: Spektrogram sygnałów EA  $A_{pom}$  [dB] rejestrowanej przy wymuszeniu jednym okresem sinusoidy o amplitudzie  $A_{gen}=3$  V: i) dla przedziału czasu  $t \in (0 - 50)$  ms, ii) dla przedziału czasu  $t \in (0 - 1, 2)$  ms



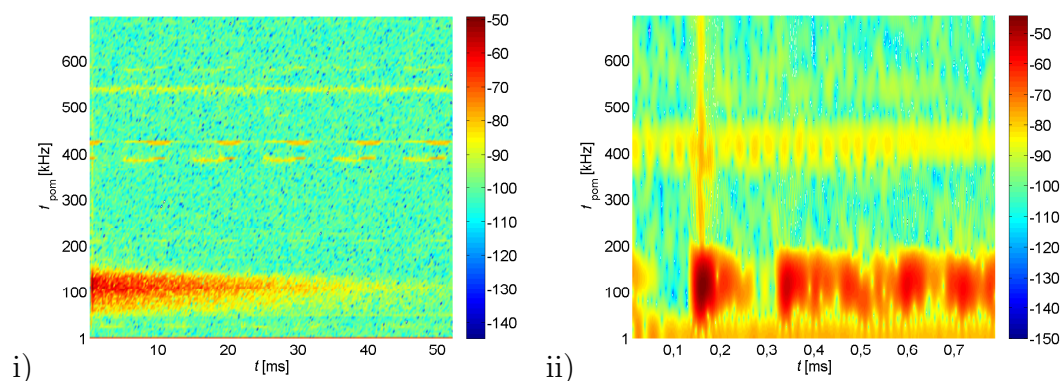
Rysunek G.2: Spektrogram sygnałów EA  $A_{pom}$  [dB] rejestrowanej przy wymuszeniu jednym okresem sinusoidy o amplitudzie  $A_{gen}=4$  V: i) dla przedziału czasu  $t \in (0 - 50)$  ms, ii) dla przedziału czasu  $t \in (0 - 1, 2)$  ms



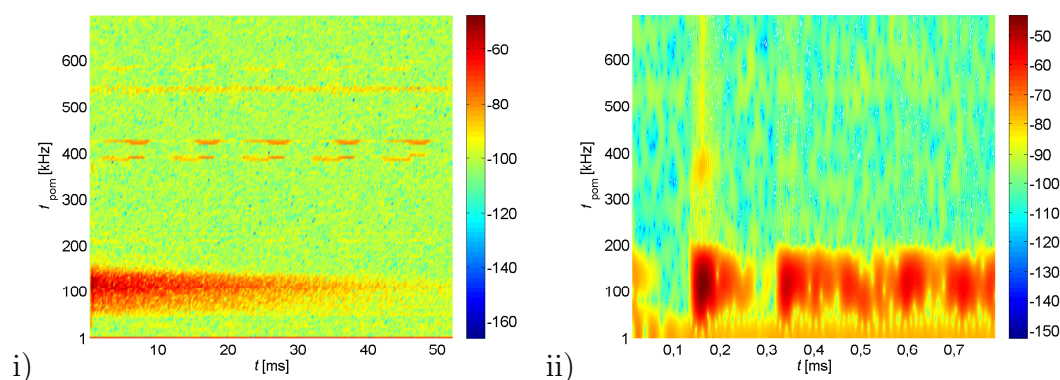
Rysunek G.3: Spektrogram sygnałów EA  $A_{pom}$  [dB] rejestrowanej przy wymuszeniu jednym okresem sinusoidy o amplitudzie  $A_{gen}=5$  V: i) dla przedziału czasu  $t \in (0 - 50)$  ms, ii) dla przedziału czasu  $t \in (0 - 1, 2)$  ms



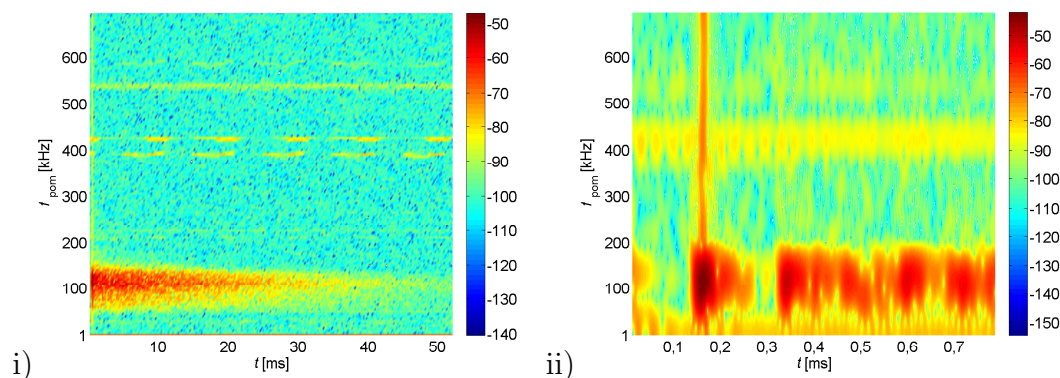
Rysunek G.4: Spektrogram sygnałów EA  $A_{\text{pom}}$  [dB] rejestrowanej przy wymuszeniu jednym okresem sinusoidy o amplitudzie  $A_{\text{gen}}=6$  V: i) dla przedziału czasu  $t \in (0 - 50)$  ms, ii) dla przedziału czasu  $t \in (0 - 1, 2)$  ms



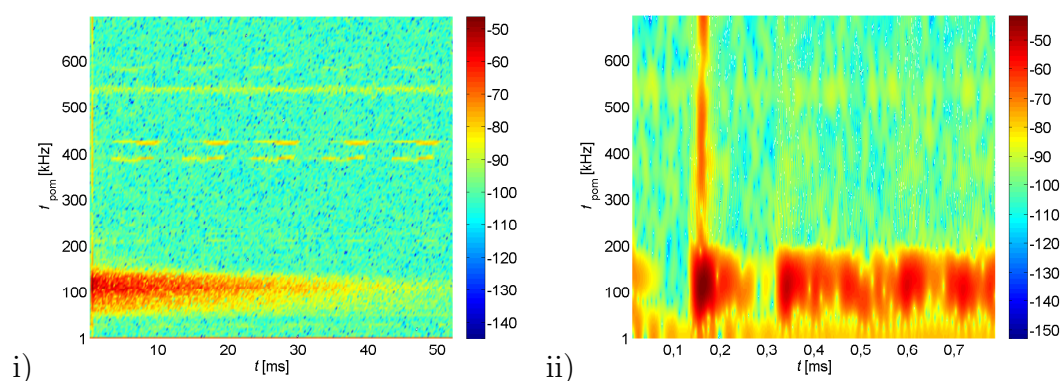
Rysunek G.5: Spektrogram sygnałów EA  $A_{\text{pom}}$  [dB] rejestrowanej przy wymuszeniu jednym okresem sinusoidy o amplitudzie  $A_{\text{gen}}=7$  V: i) dla przedziału czasu  $t \in (0 - 50)$  ms, ii) dla przedziału czasu  $t \in (0 - 1, 2)$  ms



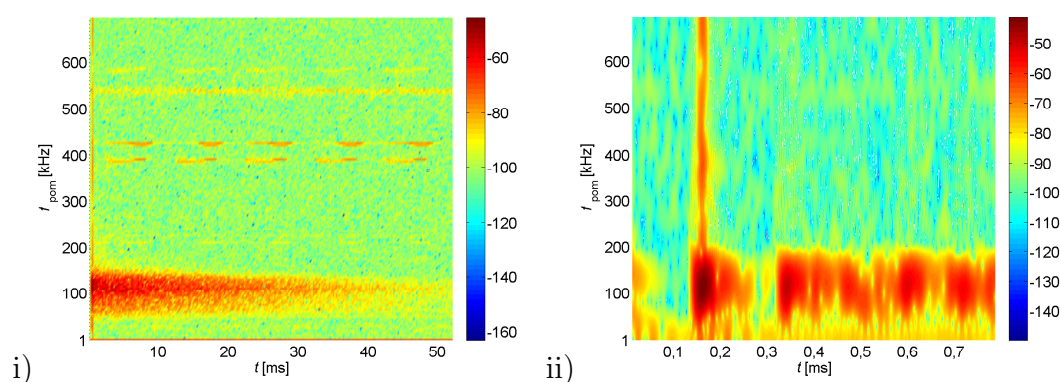
Rysunek G.6: Spektrogram sygnałów EA  $A_{\text{pom}}$  [dB] rejestrowanej przy wymuszeniu jednym okresem sinusoidy o amplitudzie  $A_{\text{gen}}=8$  V: i) dla przedziału czasu  $t \in (0 - 50)$  ms, ii) dla przedziału czasu  $t \in (0 - 1, 2)$  ms



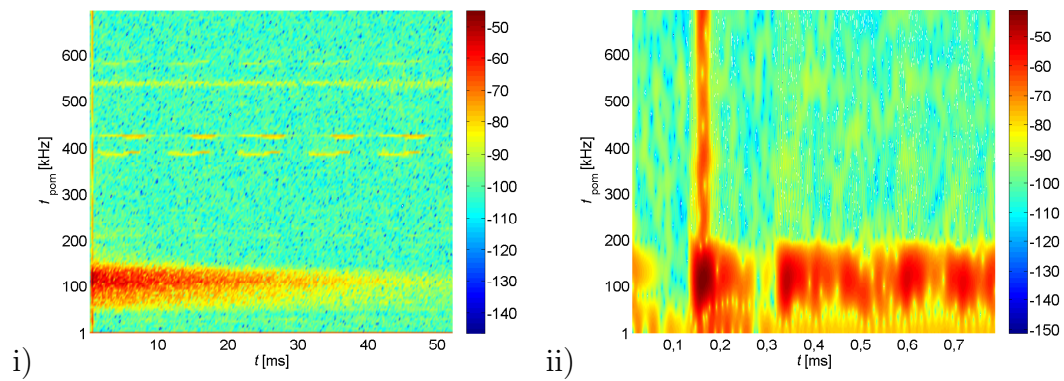
Rysunek G.7: Spektrogram sygnałów EA  $A_{\text{pom}}$  [dB] rejestrowanej przy wymuszeniu jednym okresem sinusoidy o amplitudzie  $A_{\text{gen}}=9$  V: i) dla przedziału czasu  $t \in (0 - 50)$  ms, ii) dla przedziału czasu  $t \in (0 - 1, 2)$  ms



Rysunek G.8: Spektrogram sygnałów EA  $A_{\text{pom}}$  [dB] rejestrowanej przy wymuszeniu jednym okresem sinusoidy o amplitudzie  $A_{\text{gen}}=10$  V: i) dla przedziału czasu  $t \in (0 - 50)$  ms, ii) dla przedziału czasu  $t \in (0 - 1, 2)$  ms



Rysunek G.9: Spektrogram sygnałów EA  $A_{\text{pom}}$  [dB] rejestrowanej przy wymuszeniu jednym okresem sinusoidy o amplitudzie  $A_{\text{gen}}=11$  V: i) dla przedziału czasu  $t \in (0 - 50)$  ms, ii) dla przedziału czasu  $t \in (0 - 1, 2)$  ms



Rysunek G.10: Spektrogram sygnałów EA  $A_{pom}$  [dB] rejestrowanej przy wymuszeniu jednym okresem sinusoidy o amplitudzie  $A_{gen}=12$  V: i) dla przedziału czasu  $t \in (0 - 50)$  ms, ii) dla przedziału czasu  $t \in (0 - 1, 2)$  ms

## Załącznik H

---

Przebiegi czasowe funkcji regresji (b) i sygnałów EA (a) rejestrowanej przy wymuszeniu skokiem jednostkowym dla przedziału czasowego  $t \in (140-320) \mu s$ , (dla 352 próbek sygnału) przetwornikiem PIC155 w położeniu B (rys. 7.7)

---

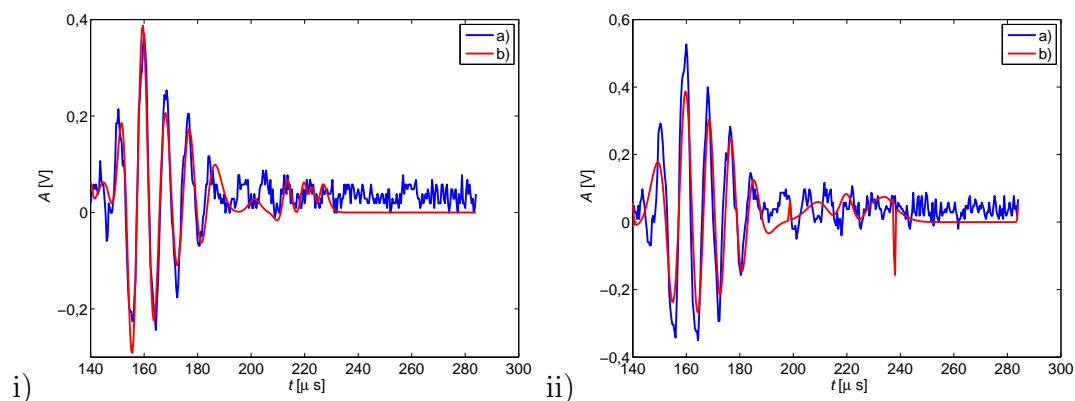
**Rysunek H.1.** Przebiegi czasowe funkcji regresji (b) i sygnałów EA (a) rejestrowanej podczas emisji sygnałów o amplitudzie: i)  $A_{gen}=3$  V, ii)  $A_{gen}=4$  V

**Rysunek H.2.** Przebiegi czasowe funkcji regresji (b) i sygnałów EA (a) rejestrowanej podczas emisji sygnałów o amplitudzie: i)  $A_{gen}=5$  V, ii)  $A_{gen}=6$  V

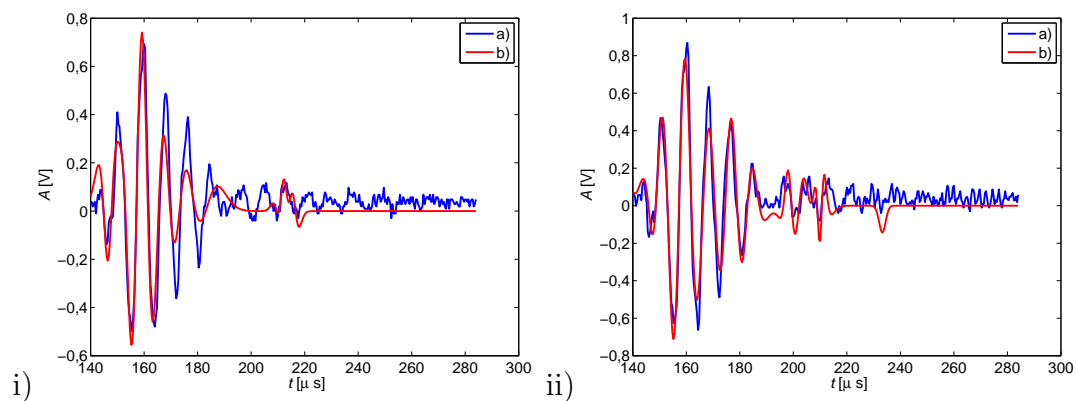
**Rysunek H.3.** Przebiegi czasowe funkcji regresji (b) i sygnałów EA (a) rejestrowanej podczas emisji sygnałów o amplitudzie: i)  $A_{gen}=7$  V, ii)  $A_{gen}=8$  V

**Rysunek H.4.** Przebiegi czasowe funkcji regresji (b) i sygnałów EA (a) rejestrowanej podczas emisji sygnałów o amplitudzie: i)  $A_{gen}=9$  V, ii)  $A_{gen}=10$  V

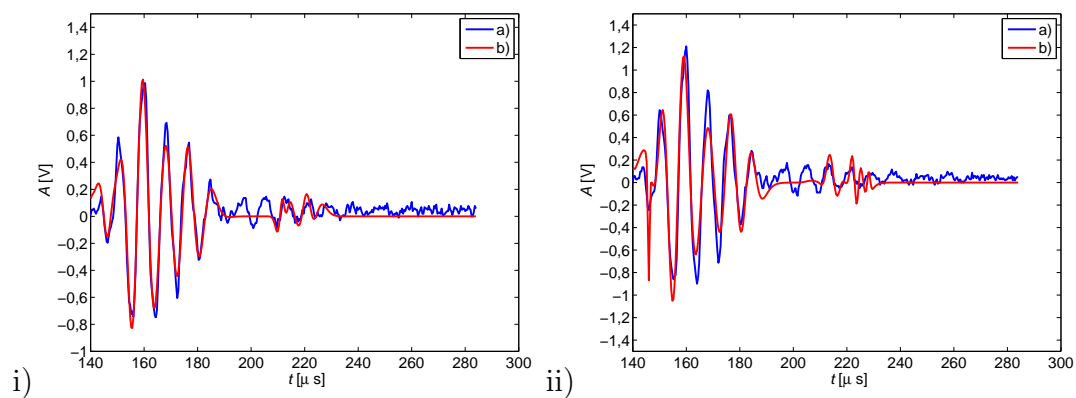
**Rysunek H.5.** Przebiegi czasowe funkcji regresji (b) i sygnałów EA (a) rejestrowanej podczas emisji sygnałów o amplitudzie: i)  $A_{gen}=11$  V, ii)  $A_{gen}=12$  V



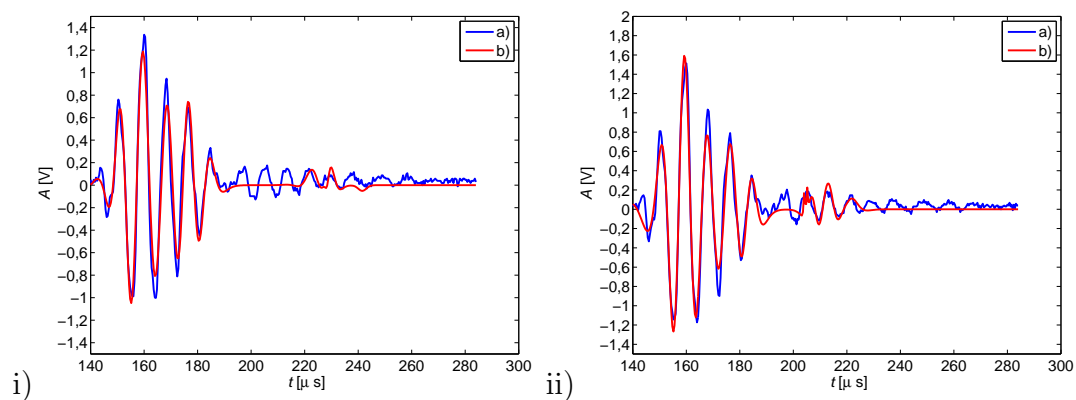
Rysunek H.1: Przebiegi czasowe funkcji regresji (b) i sygnałów EA (a) rejestrowanej podczas emisji sygnałów o amplitudzie: i)  $A_{gen}=3$  V, ii)  $A_{gen}=4$  V



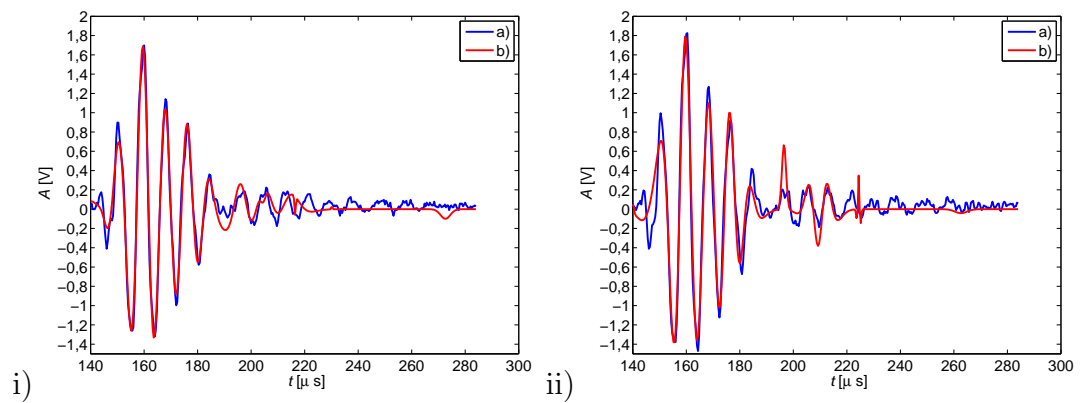
Rysunek H.2: Przebiegi czasowe funkcji regresji (b) i sygnałów EA (a) rejestrowanej podczas emisji sygnałów o amplitudzie: i)  $A_{\text{gen}}=5$  V, ii)  $A_{\text{gen}}=6$  V



Rysunek H.3: Przebiegi czasowe funkcji regresji (b) i sygnałów EA (a) rejestrowanej podczas emisji sygnałów o amplitudzie: i)  $A_{\text{gen}}=7$  V, ii)  $A_{\text{gen}}=8$  V



Rysunek H.4: Przebiegi czasowe funkcji regresji (b) i sygnałów EA (a) rejestrowanej podczas emisji sygnałów o amplitudzie: i)  $A_{\text{gen}}=9$  V, ii)  $A_{\text{gen}}=10$  V



Rysunek H.5: Przebiegi czasowe funkcji regresji (b) i sygnałów EA (a) rejestrowanej podczas emisji sygnałów o amplitudzie: i)  $A_{\text{gen}}=11$  V, ii)  $A_{\text{gen}}=12$  V



# Załącznik I

---

**Przebiegi widm amplitudowych w funkcji częstotliwości sygnałów generowanych wyznaczone dla sygnałów EA generowanej przetwornikiem PIC155 umieszczonym wewnątrz kadzi w położeniu O na rys. 7.7 podczas emisji sygnałów o różnej amplitudzie  $A_{gen}$**

---

**Rysunek I.1.** Przebiegi widm amplitudowych w funkcji częstotliwości sygnałów generowanych wyznaczone dla: i)  $A_{gen}=0,5$  V, ii)  $A_{gen}=1$  V

**Rysunek I.2.** Przebiegi widm amplitudowych w funkcji częstotliwości sygnałów generowanych wyznaczone dla: i)  $A_{gen}=1,5$  V, ii)  $A_{gen}=2$  V

**Rysunek I.3.** Przebiegi widm amplitudowych w funkcji częstotliwości sygnałów generowanych wyznaczone dla: i)  $A_{gen}=2,5$  V, ii)  $A_{gen}=3$  V

**Rysunek I.4.** Przebiegi widm amplitudowych w funkcji częstotliwości sygnałów generowanych wyznaczone dla: i)  $A_{gen}=3,5$  V, ii)  $A_{gen}=4$  V

**Rysunek I.5.** Przebiegi widm amplitudowych w funkcji częstotliwości sygnałów generowanych wyznaczone dla: i)  $A_{gen}=4,5$  V, ii)  $A_{gen}=5$  V

**Rysunek I.6.** Przebiegi widm amplitudowych w funkcji częstotliwości sygnałów generowanych wyznaczone dla: i)  $A_{gen}=5,5$  V, ii)  $A_{gen}=6$  V

**Rysunek I.7.** Przebiegi widm amplitudowych w funkcji częstotliwości sygnałów generowanych wyznaczone dla: i)  $A_{gen}=6,5$  V, ii)  $A_{gen}=7$  V

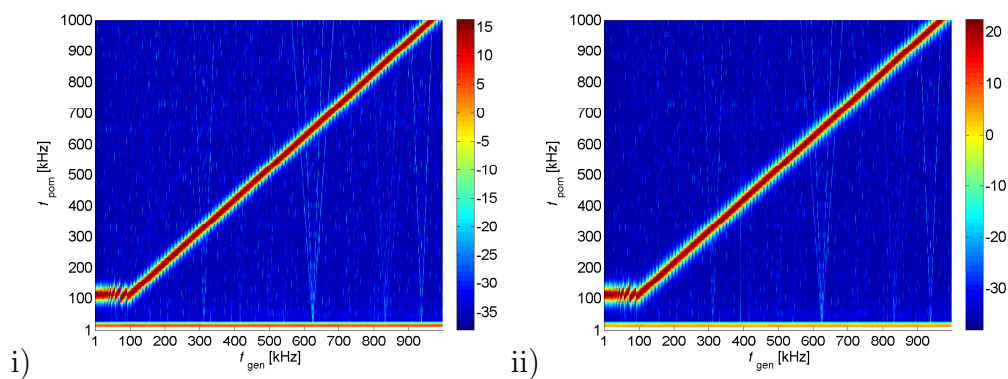
**Rysunek I.8.** Przebiegi widm amplitudowych w funkcji częstotliwości sygnałów generowanych wyznaczone dla: i)  $A_{gen}=7,5$  V, ii)  $A_{gen}=8$  V

**Rysunek I.9.** Przebiegi widm amplitudowych w funkcji częstotliwości sygnałów generowanych wyznaczone dla: i)  $A_{gen}=8,5$  V, ii)  $A_{gen}=9$  V

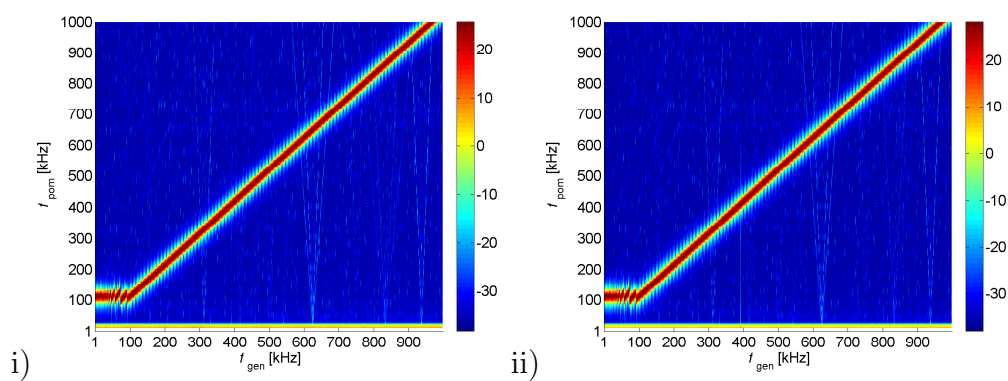
**Rysunek I.10.** Przebiegi widm amplitudowych w funkcji częstotliwości sygnałów generowanych wyznaczone dla: i)  $A_{gen}=9,5$  V, ii)  $A_{gen}=10$  V

**Rysunek I.11.** Przebiegi widm amplitudowych w funkcji częstotliwości sygnałów generowanych wyznaczone dla: i)  $A_{gen}=10,5$  V, ii)  $A_{gen}=11$  V

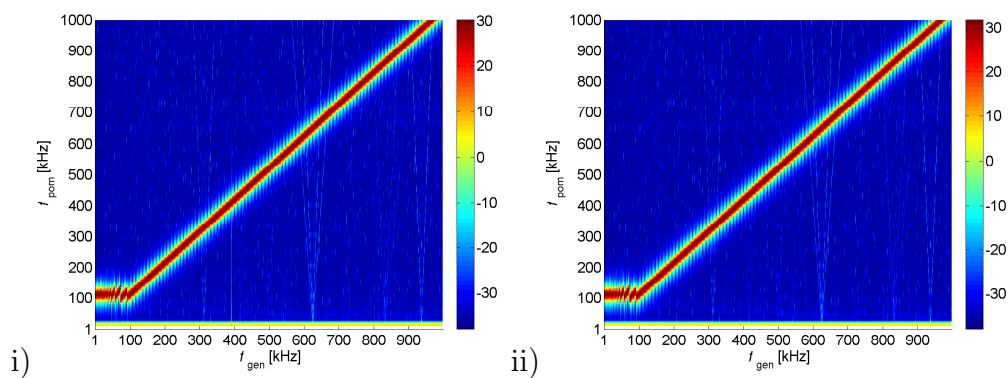
**Rysunek I.12.** Przebiegi widm amplitudowych w funkcji częstotliwości sygnałów generowanych wyznaczone dla: i)  $A_{\text{gen}}=11,5 \text{ V}$ , ii)  $A_{\text{gen}}=12 \text{ V}$



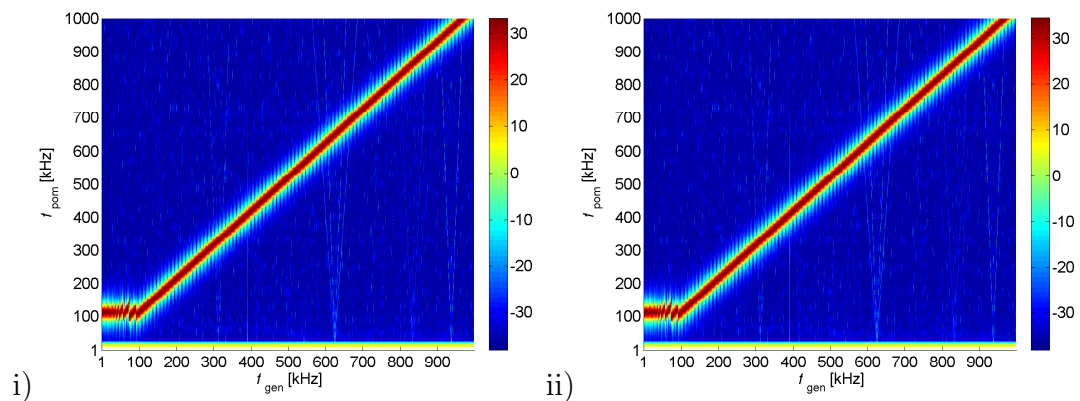
Rysunek I.1: Przebiegi widm amplitudowych w funkcji częstotliwości sygnałów generowanych wyznaczone dla: i)  $A_{gen}=0,5$  V, ii)  $A_{gen}=1$  V



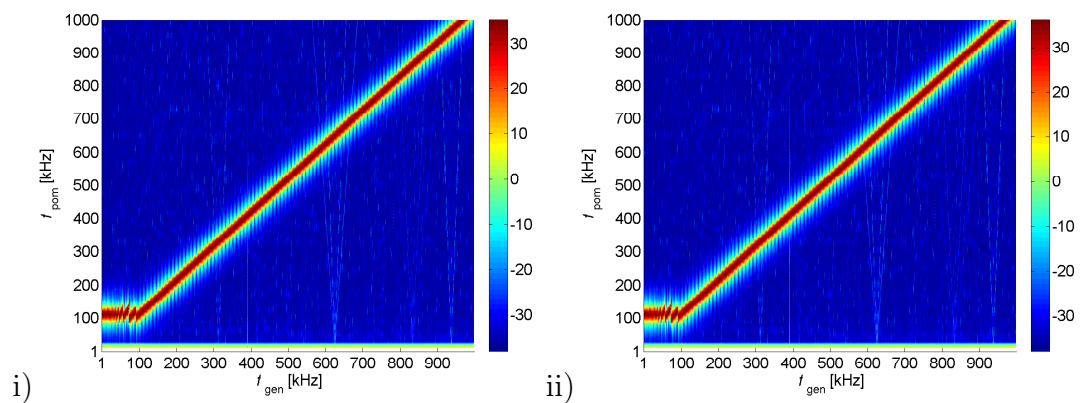
Rysunek I.2: Przebiegi widm amplitudowych w funkcji częstotliwości sygnałów generowanych wyznaczone dla: i)  $A_{gen}=0,5$  V, ii)  $A_{gen}=1$  V



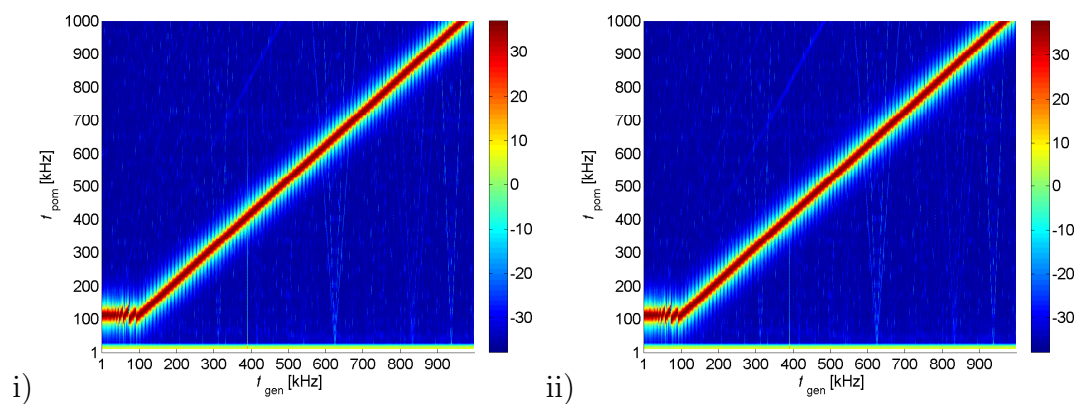
Rysunek I.3: Przebiegi widm amplitudowych w funkcji częstotliwości sygnałów generowanych wyznaczone dla: i)  $A_{gen}=1,5$  V, ii)  $A_{gen}=2$  V



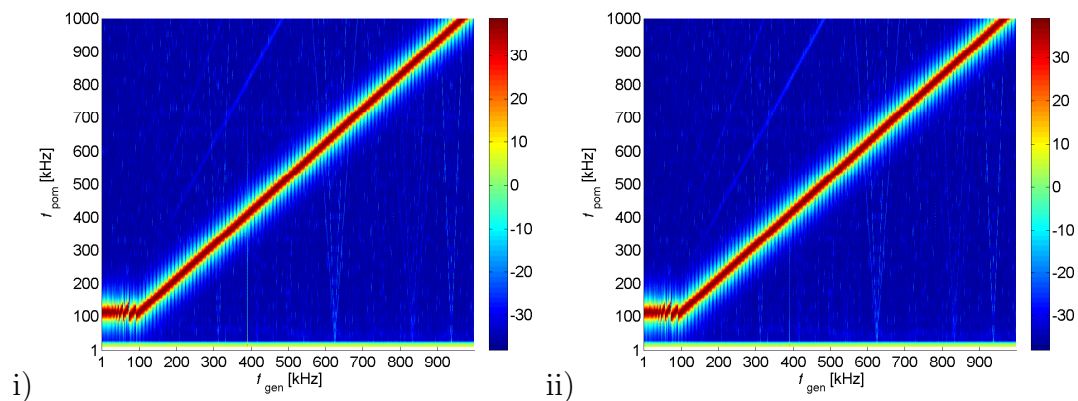
Rysunek I.4: Przebiegi widm amplitudowych w funkcji częstotliwości sygnałów generowanych wyznaczone dla: i)  $A_{gen}=2,5$  V, ii)  $A_{gen}=3$  V



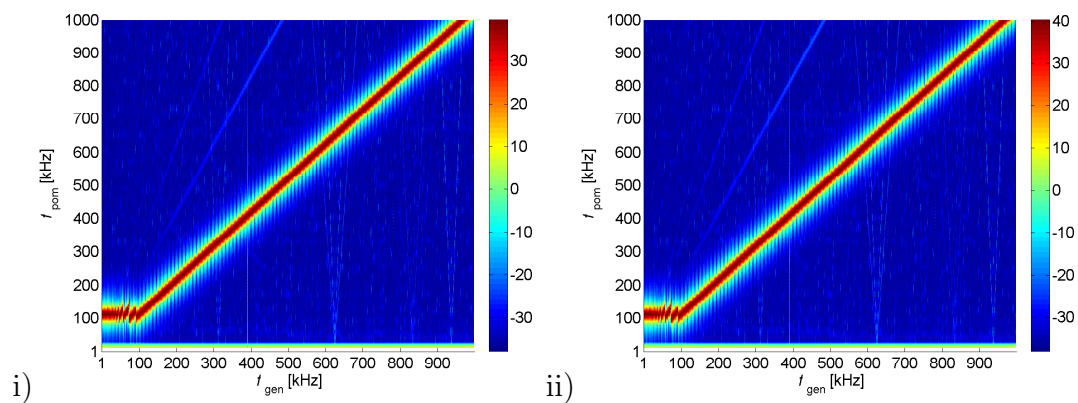
Rysunek I.5: Przebiegi widm amplitudowych w funkcji częstotliwości sygnałów generowanych wyznaczone dla: i)  $A_{gen}=3,5$  V, ii)  $A_{gen}=4$  V



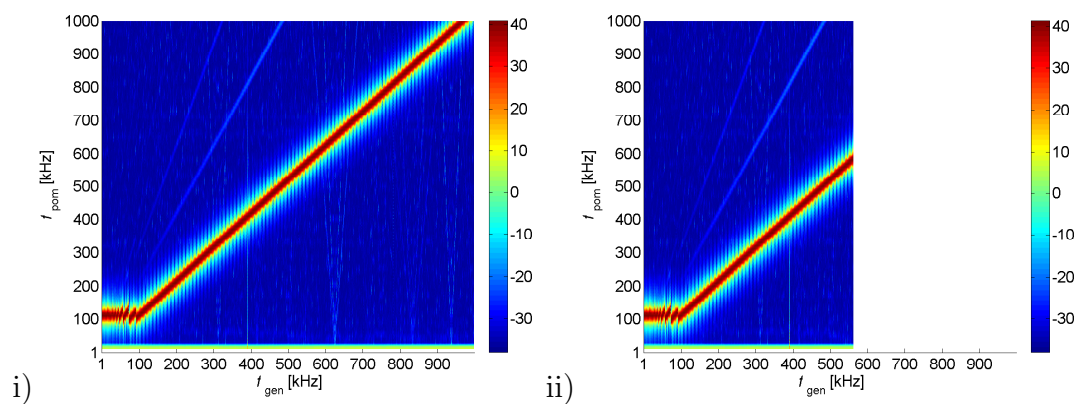
Rysunek I.6: Przebiegi widm amplitudowych w funkcji częstotliwości sygnałów generowanych wyznaczone dla: i)  $A_{gen}=4,5$  V, ii)  $A_{gen}=5$  V



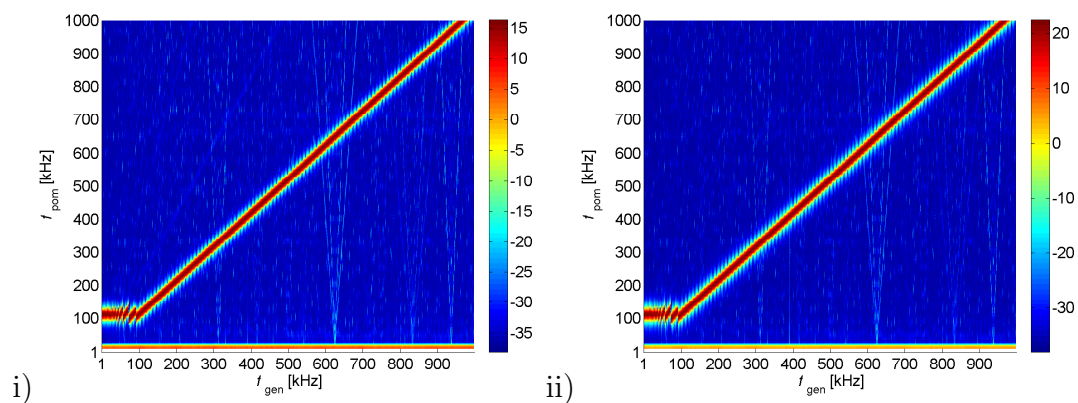
Rysunek I.7: Przebiegi widm amplitudowych w funkcji częstotliwości sygnałów generowanych wyznaczone dla: i)  $A_{gen}=5,5$  V, ii)  $A_{gen}=6$  V



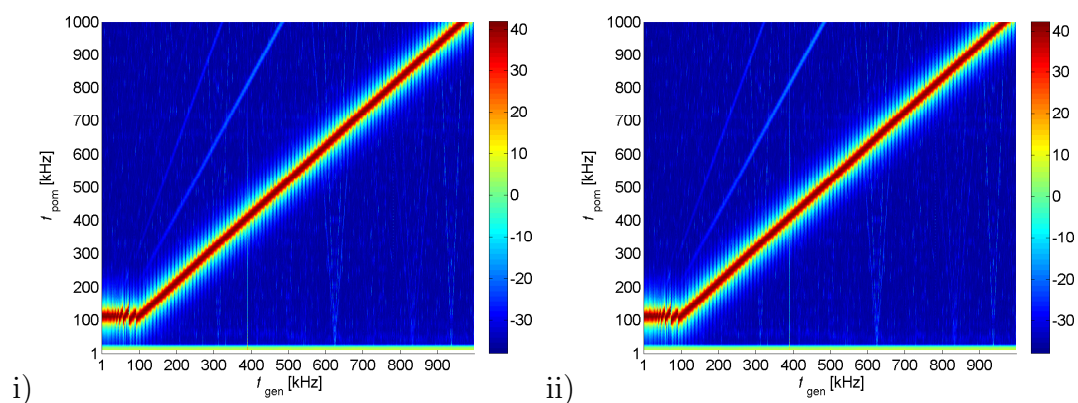
Rysunek I.8: Przebiegi widm amplitudowych w funkcji częstotliwości sygnałów generowanych wyznaczone dla: i)  $A_{gen}=6,5$  V, ii)  $A_{gen}=7$  V



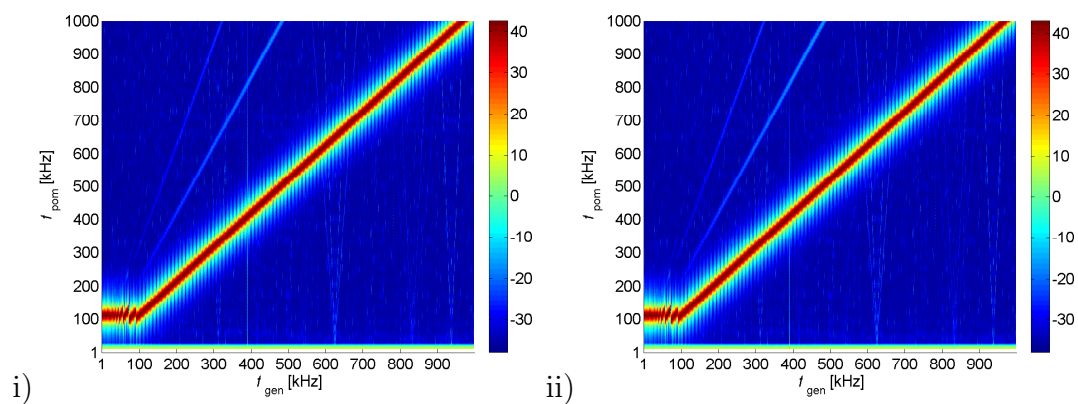
Rysunek I.9: Przebiegi widm amplitudowych w funkcji częstotliwości sygnałów generowanych wyznaczone dla: i)  $A_{gen}=7,5$  V, ii)  $A_{gen}=8$  V (pomiar nieudany)



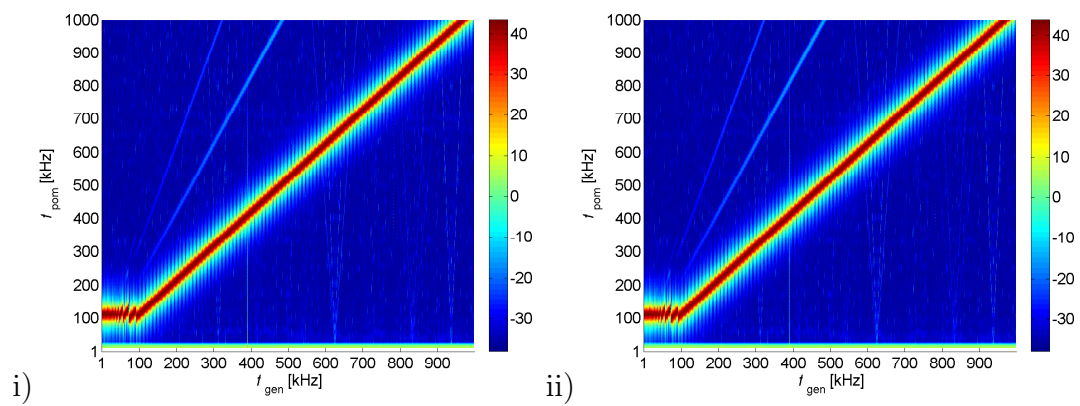
Rysunek I.10: Przebiegi widm amplitudowych w funkcji częstotliwości sygnałów generowanych wyznaczone dla: i)  $A_{\text{gen}}=8,5$  V, ii)  $A_{\text{gen}}=9$  V



Rysunek I.11: Przebiegi widm amplitudowych w funkcji częstotliwości sygnałów generowanych wyznaczone dla: i)  $A_{\text{gen}}=9,5$  V, ii)  $A_{\text{gen}}=10$  V



Rysunek I.12: Przebiegi widm amplitudowych w funkcji częstotliwości sygnałów generowanych wyznaczone dla: a)  $A_{\text{gen}}=10,5$  V, ii)  $A_{\text{gen}}=11$  V



Rysunek I.13: Przebiegi widm amplitudowych w funkcji częstotliwości sygnałów generowanych wyznaczone dla: i)  $A_{\text{gen}}=11,5$  V, ii)  $A_{\text{gen}}=12$  V

## Załącznik J

---

**Przebiegi widm amplitudowych w funkcji częstotliwości sygnałów generowanych wyznaczone dla sygnałów EA rejestrowanej przetwornikiem WD umieszczonym wewnątrz kadzi w położeniu B na rys. 7.7 podczas emisji sygnałów o różnej amplitudzie  $A_{gen}$**

---

**Rysunek J.1.** Przebiegi widm amplitudowych w funkcji częstotliwości sygnałów generowanych o amplitudzie: i)  $A_{gen}=0,5$  V, ii)  $A_{gen}=1$  V

**Rysunek J.2.** Przebiegi widm amplitudowych w funkcji częstotliwości sygnałów generowanych o amplitudzie: i)  $A_{gen}=1,5$  V, ii)  $A_{gen}=2$  V

**Rysunek J.3.** Przebiegi widm amplitudowych w funkcji częstotliwości sygnałów generowanych o amplitudzie: i)  $A_{gen}=2,5$  V, ii)  $A_{gen}=3$  V

**Rysunek J.4.** Przebiegi widm amplitudowych w funkcji częstotliwości sygnałów generowanych o amplitudzie: i)  $A_{gen}=3,5$  V, ii)  $A_{gen}=4$  V

**Rysunek J.5.** Przebiegi widm amplitudowych w funkcji częstotliwości sygnałów generowanych o amplitudzie: i)  $A_{gen}=4,5$  V, ii)  $A_{gen}=5$  V

**Rysunek J.6.** Przebiegi widm amplitudowych w funkcji częstotliwości sygnałów generowanych o amplitudzie: i)  $A_{gen}=5,5$  V, ii)  $A_{gen}=6$  V

**Rysunek J.7.** Przebiegi widm amplitudowych w funkcji częstotliwości sygnałów generowanych o amplitudzie: i)  $A_{gen}=6,5$  V, ii)  $A_{gen}=7$  V

**Rysunek J.8.** Przebiegi widm amplitudowych w funkcji częstotliwości sygnałów generowanych o amplitudzie: i)  $A_{gen}=7,5$  V, ii)  $A_{gen}=8$  V

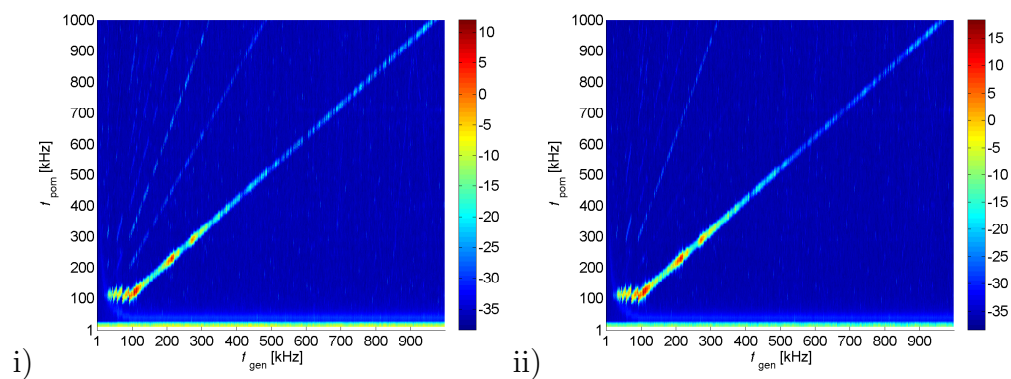
**Rysunek J.9.** Przebiegi widm amplitudowych w funkcji częstotliwości sygnałów generowanych o amplitudzie: i)  $A_{gen}=8,5$  V, ii)  $A_{gen}=9$  V

**Rysunek J.10.** Przebiegi widm amplitudowych w funkcji częstotliwości sygnałów generowanych o amplitudzie: i)  $A_{gen}=9,5$  V, ii)  $A_{gen}=10$  V

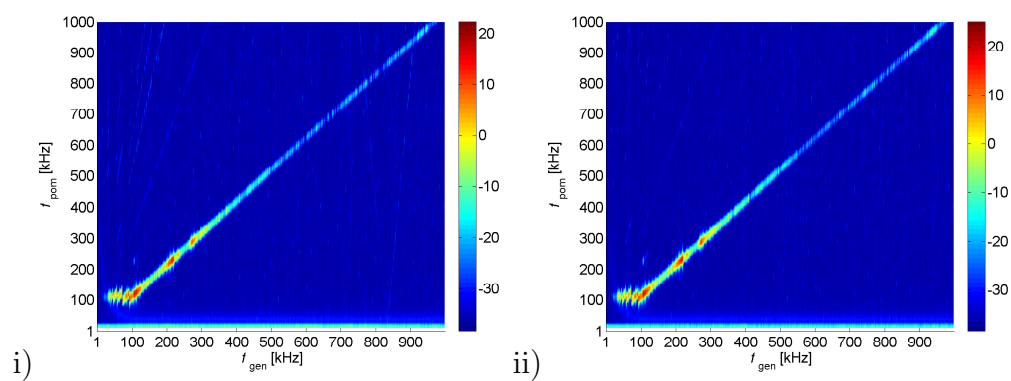
**Rysunek J.11.** Przebiegi widm amplitudowych w funkcji częstotliwości sygnałów generowanych o amplitudzie: i)  $A_{gen}=10,5$  V, ii)  $A_{gen}=11$  V



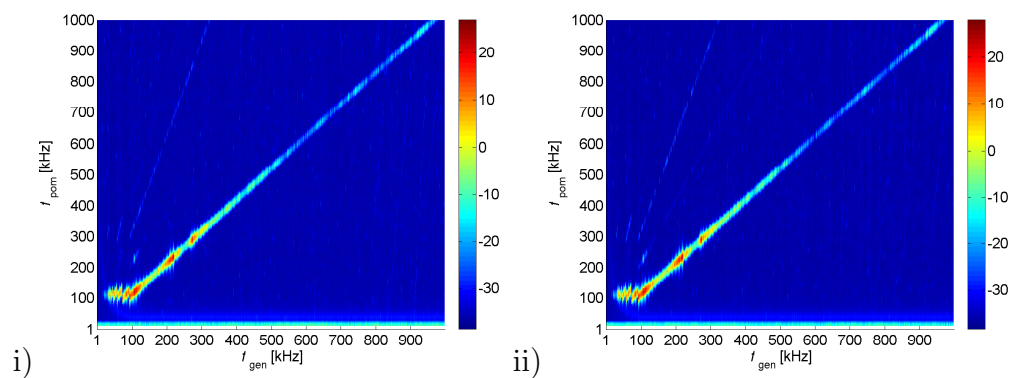
**Rysunek J.12.** Przebiegi widm amplitudowych w funkcji częstotliwości sygnałów generowanych o amplitudzie: i)  $A_{\text{gen}}=11,5 \text{ V}$ , ii)  $A_{\text{gen}}=12 \text{ V}$



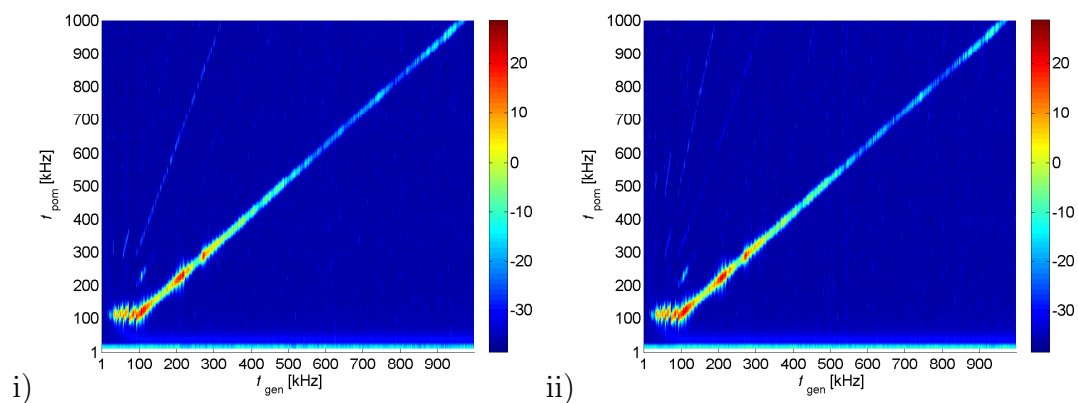
Rysunek J.1: Przebiegi widm amplitudowych w funkcji częstotliwości sygnałów generowanych o amplitudzie: i)  $A_{gen}=0,5$  V, ii)  $A_{gen}=1$  V



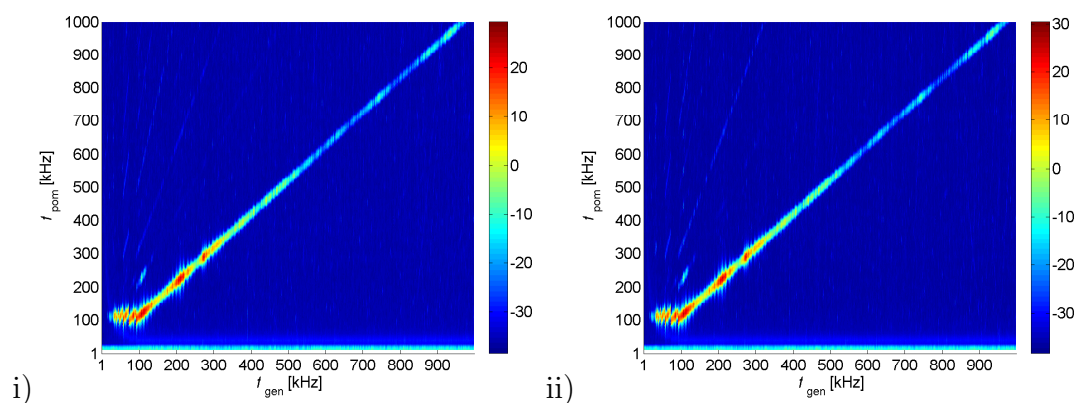
Rysunek J.2: Przebiegi widm amplitudowych w funkcji częstotliwości sygnałów generowanych o amplitudzie: i)  $A_{gen}=1,5$  V, ii)  $A_{gen}=2$  V



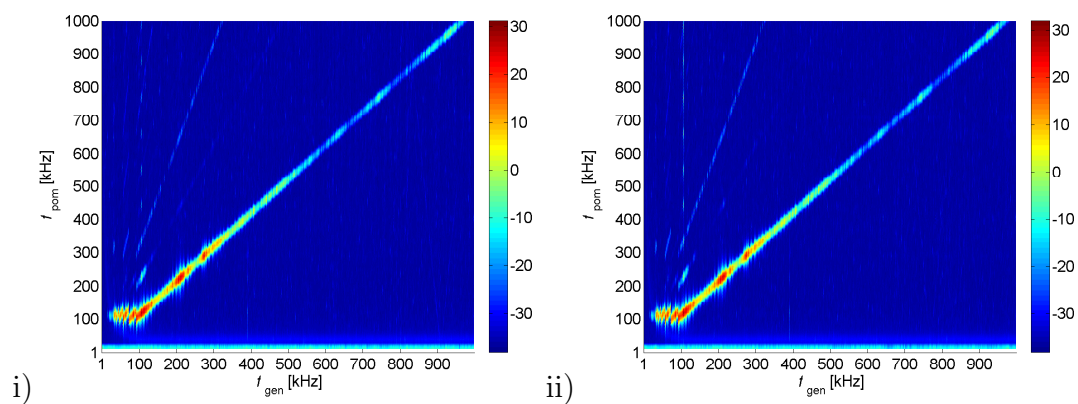
Rysunek J.3: Przebiegi widm amplitudowych w funkcji częstotliwości sygnałów generowanych o amplitudzie: i)  $A_{gen}=2,5$  V, ii)  $A_{gen}=3$  V



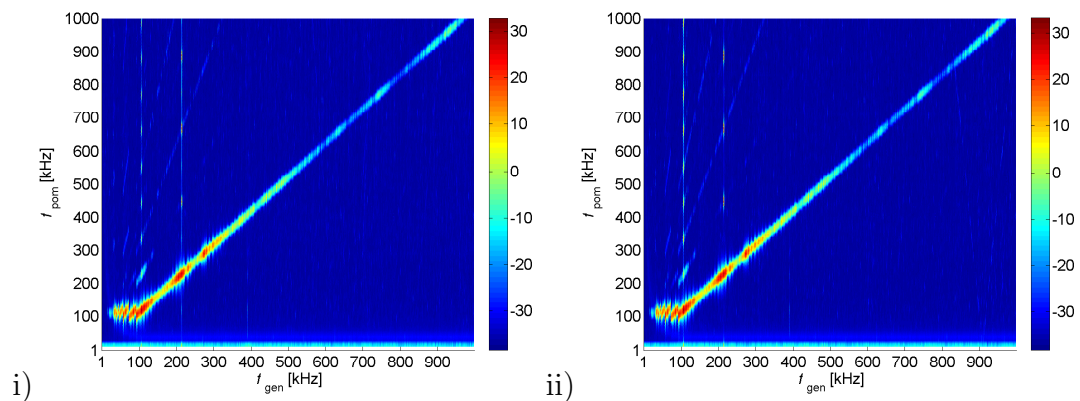
Rysunek J.4: Przebiegi widm amplitudowych w funkcji częstotliwości sygnałów generowanych o amplitudzie: i)  $A_{gen}=3,5$  V, ii)  $A_{gen}=4$  V



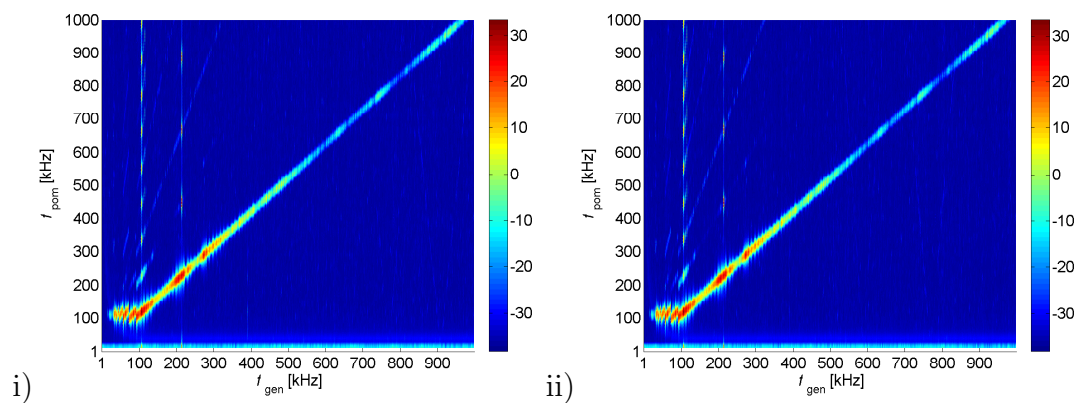
Rysunek J.5: Przebiegi widm amplitudowych w funkcji częstotliwości sygnałów generowanych o amplitudzie: i)  $A_{gen}=4,5$  V, ii)  $A_{gen}=5$  V



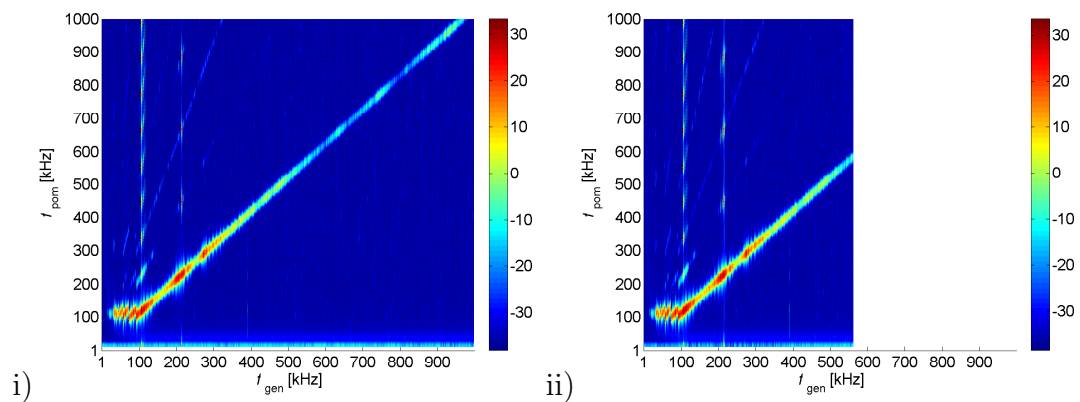
Rysunek J.6: Przebiegi widm amplitudowych w funkcji częstotliwości sygnałów generowanych o amplitudzie: i)  $A_{gen}=5,5$  V, ii)  $A_{gen}=6$  V



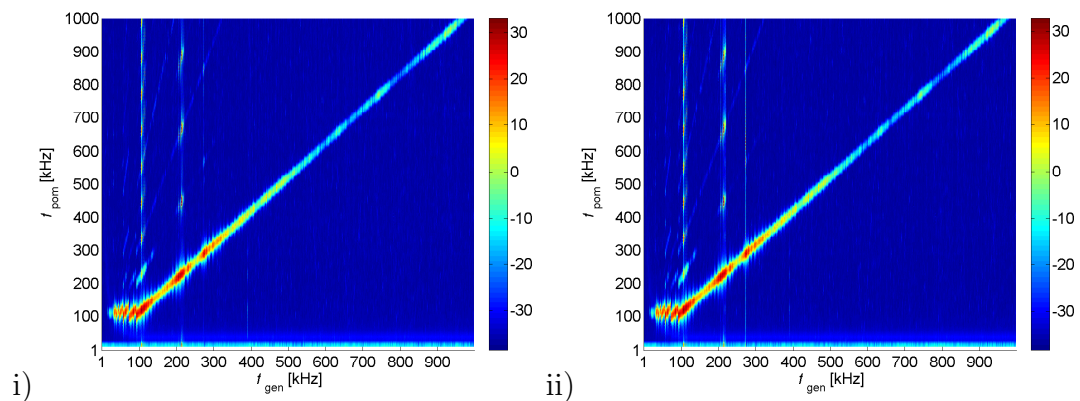
Rysunek J.7: Przebiegi widm amplitudowych w funkcji częstotliwości sygnałów generowanych o amplitudzie: i)  $A_{gen}=6,5$  V, ii)  $A_{gen}=7$  V



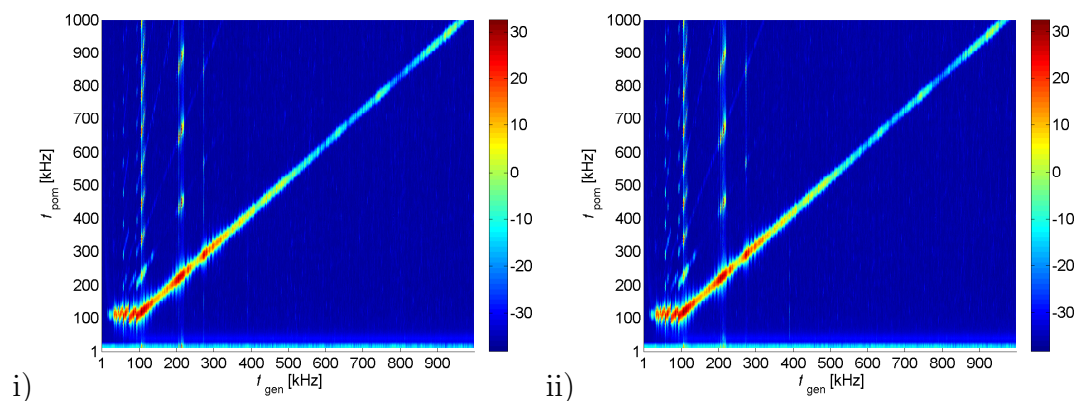
Rysunek J.8: Przebiegi widm amplitudowych w funkcji częstotliwości sygnałów generowanych o amplitudzie: i)  $A_{gen}=7,5$  V, ii)  $A_{gen}=8$  V



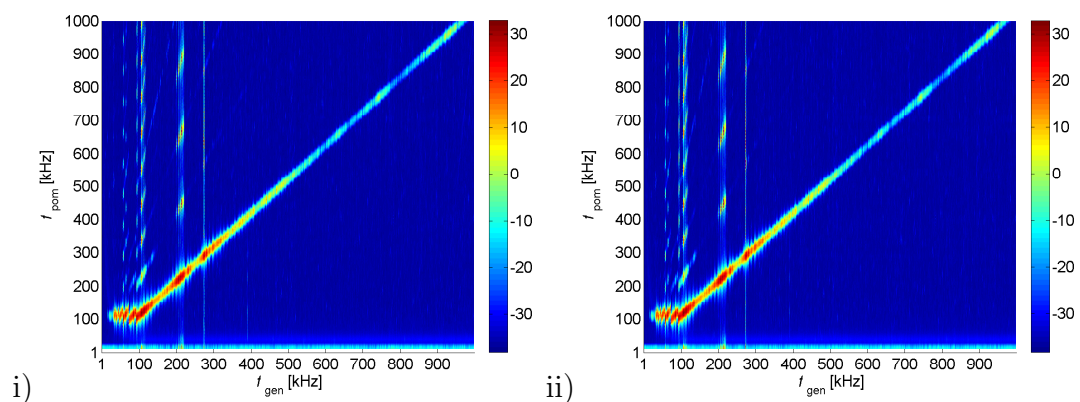
Rysunek J.9: Przebiegi widm amplitudowych w funkcji częstotliwości sygnałów generowanych o amplitudzie: i)  $A_{gen}=8,5$  V, ii)  $A_{gen}=9$  V



Rysunek J.10: Przebiegi widm amplitudowych w funkcji częstotliwości sygnałów generowanych o amplitudzie: i)  $A_{gen}=9,5$  V, ii)  $A_{gen}=10$  V



Rysunek J.11: Przebiegi widm amplitudowych w funkcji częstotliwości sygnałów generowanych o amplitudzie: i)  $A_{gen}=10,5$  V, ii)  $A_{gen}=11$  V



Rysunek J.12: Przebiegi widm amplitudowych w funkcji częstotliwości sygnałów generowanych o amplitudzie: i)  $A_{gen}=11,5$  V, ii)  $A_{gen}=12$  V

## Załącznik K

---

**Przebiegi funkcji koherencji sygnałów generowanych przetwornikiem PIC155 umieszczonym wewnątrz kadzi w położeniu oznaczonym literą O na rys. 7.7 i sygnałów rejestrowanych przetwornikiem WD umieszczonym wewnątrz kadzi w położeniu oznaczonym literą B na rys. 7.7**

---

**Rysunek K.1.** Przebiegi funkcji koherencji sygnałów rejestrowanych i generowanych podczas emisji fal EA o amplitudzie równej: i)  $A_{\text{gen}}=0,5$  V, ii)  $A_{\text{gen}}=1$  V

**Rysunek K.2.** Przebiegi funkcji koherencji sygnałów rejestrowanych i generowanych podczas emisji fal EA o amplitudzie równej: i)  $A_{\text{gen}}=1,5$  V, ii)  $A_{\text{gen}}=2$  V

**Rysunek K.3.** Przebiegi funkcji koherencji sygnałów rejestrowanych i generowanych podczas emisji fal EA o amplitudzie równej: i)  $A_{\text{gen}}=2,5$  V, ii)  $A_{\text{gen}}=3$  V

**Rysunek K.4.** Przebiegi funkcji koherencji sygnałów rejestrowanych i generowanych podczas emisji fal EA o amplitudzie równej: i)  $A_{\text{gen}}=3,5$  V, ii)  $A_{\text{gen}}=4$  V

**Rysunek K.5.** Przebiegi funkcji koherencji sygnałów rejestrowanych i generowanych podczas emisji fal EA o amplitudzie równej: i)  $A_{\text{gen}}=4,5$  V, ii)  $A_{\text{gen}}=5$  V

**Rysunek K.6.** Przebiegi funkcji koherencji sygnałów rejestrowanych i generowanych podczas emisji fal EA o amplitudzie równej: i)  $A_{\text{gen}}=5,5$  V, ii)  $A_{\text{gen}}=6$  V

**Rysunek K.7.** Przebiegi funkcji koherencji sygnałów rejestrowanych i generowanych podczas emisji fal EA o amplitudzie równej: i)  $A_{\text{gen}}=6,5$  V, ii)  $A_{\text{gen}}=7$  V

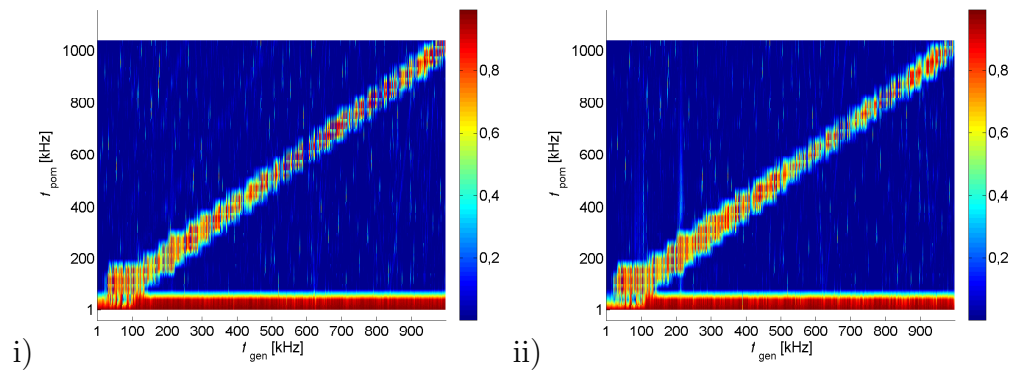
**Rysunek K.8.** Przebiegi funkcji koherencji sygnałów rejestrowanych i generowanych podczas emisji fal EA o amplitudzie równej: i)  $A_{\text{gen}}=7,5$  V, ii)  $A_{\text{gen}}=8$  V

**Rysunek K.9.** Przebiegi funkcji koherencji sygnałów rejestrowanych i generowanych podczas emisji fal EA o amplitudzie równej: i)  $A_{\text{gen}}=8,5$  V, ii)  $A_{\text{gen}}=9$  V

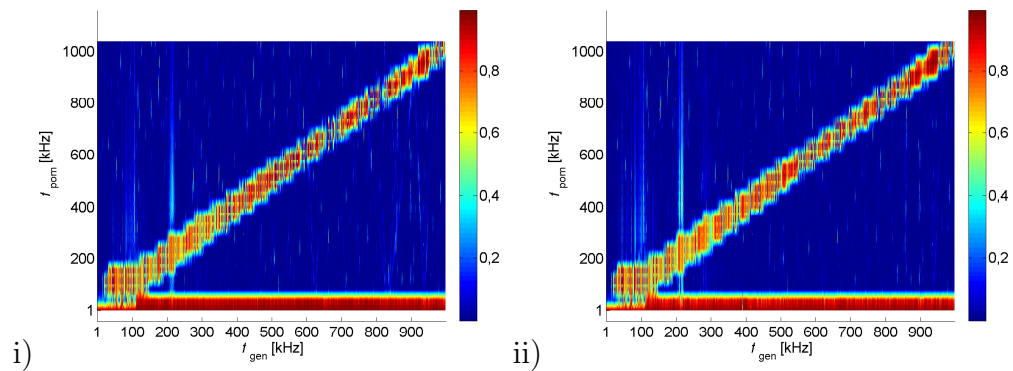
**Rysunek K.10.** Przebiegi funkcji koherencji sygnałów rejestrowanego i generowanego podczas emisji fal EA o amplitudzie równej: i)  $A_{\text{gen}}=9,5$  V, ii)  $A_{\text{gen}}=10$  V

**Rysunek K.11.** Przebiegi funkcji koherencji sygnałów rejestrowanych i generowanych podczas emisji fal EA o amplitudzie równej: i)  $A_{\text{gen}}=10,5$  V, ii)  $A_{\text{gen}}=11$  V

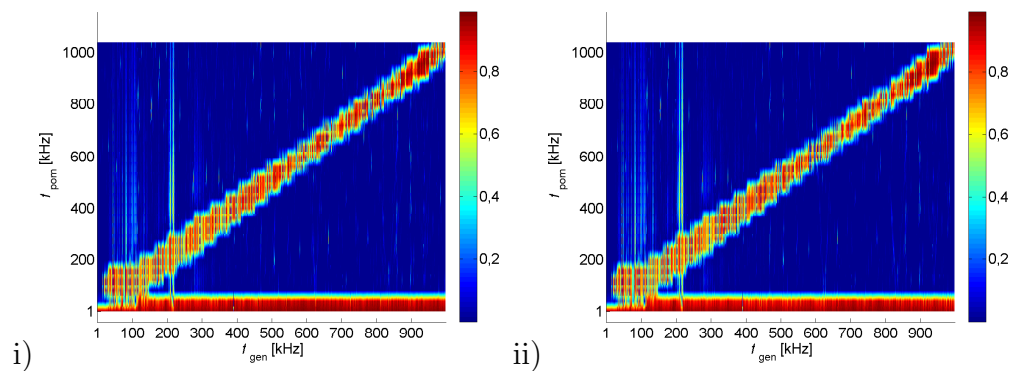
**Rysunek K.12.** Przebiegi funkcji koherencji sygnałów rejestrowanych i generowanych podczas emisji fal EA o amplitudzie równej: i)  $A_{\text{gen}}=11,5$  V, ii)  $A_{\text{gen}}=12$  V



Rysunek K.1: Przebiegi funkcji koherencji sygnałów rejestrowanych i generowanych podczas emisji fal EA o amplitudzie równej: i)  $A_{\text{gen}}=0,5$  V, ii)  $A_{\text{gen}}=1$  V

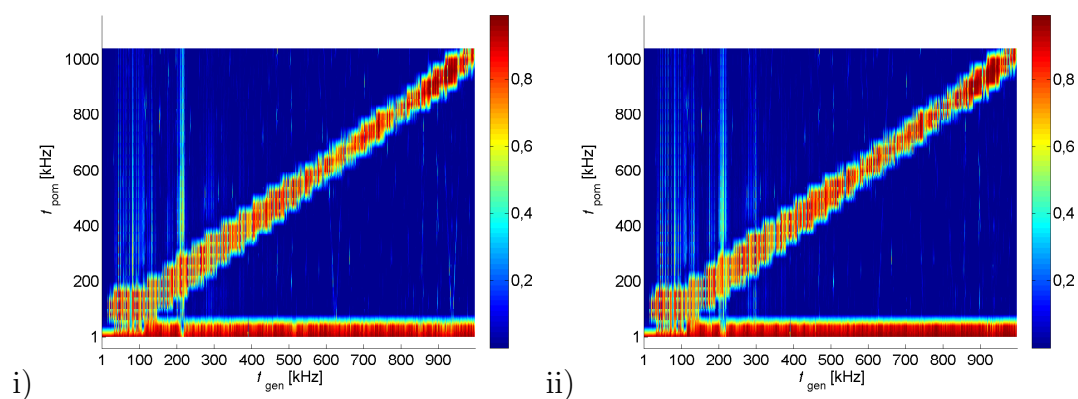


Rysunek K.2: Przebiegi funkcji koherencji sygnałów rejestrowanych i generowanych podczas emisji fal EA o amplitudzie równej: i)  $A_{\text{gen}}=0,5$  V, ii)  $A_{\text{gen}}=1$  V

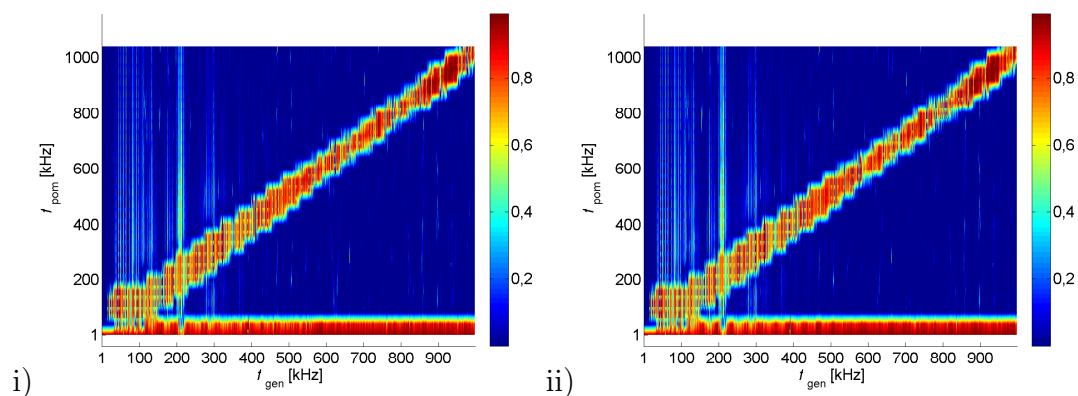


Rysunek K.3: Przebiegi funkcji koherencji sygnałów rejestrowanych i generowanych podczas emisji fal EA o amplitudzie równej: i)  $A_{\text{gen}}=1,5$  V, ii)  $A_{\text{gen}}=2$  V

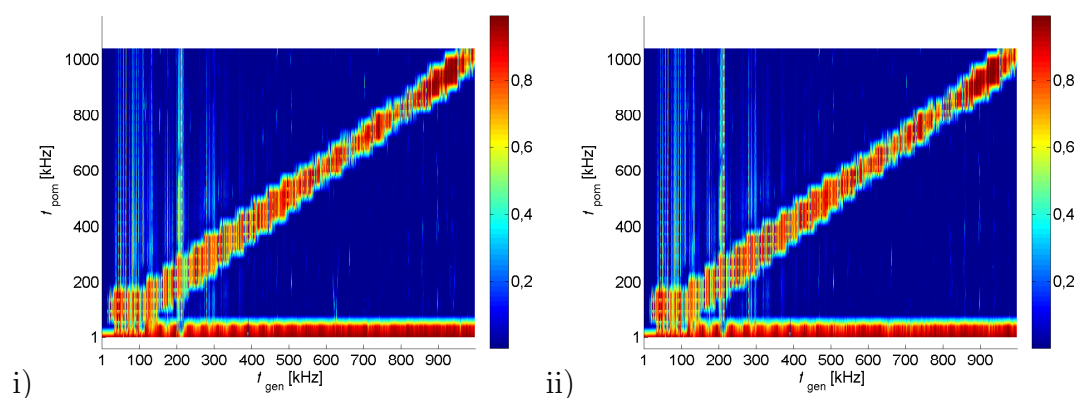




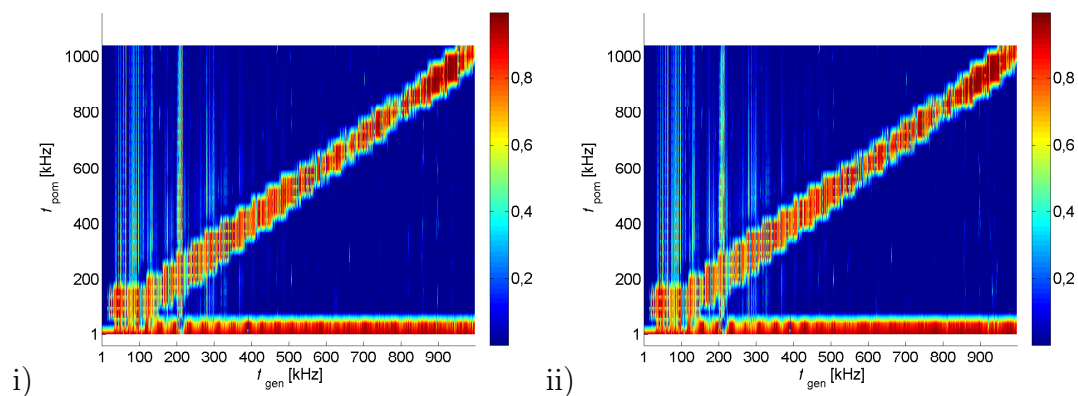
Rysunek K.4: Przebiegi funkcji koherencji sygnałów rejestrowanych i generowanych podczas emisji fal EA o amplitudzie równej: i)  $A_{gen} = 2,5$  V, ii)  $A_{gen} = 3$  V



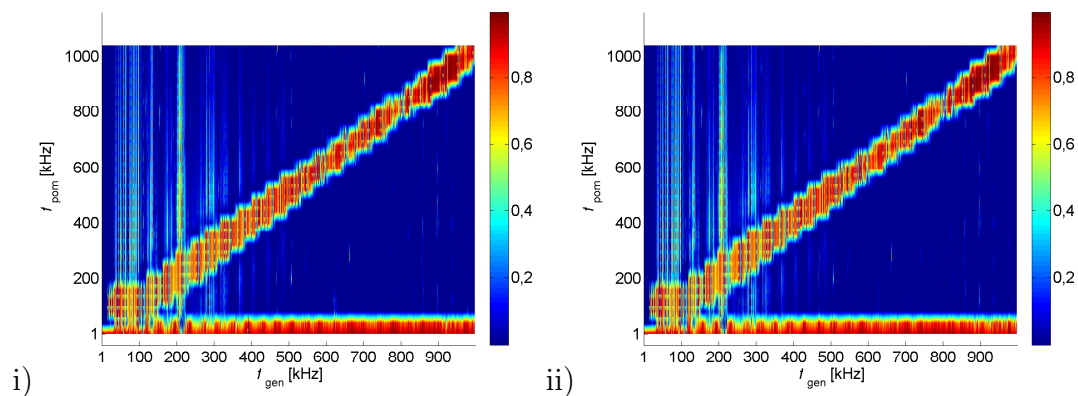
Rysunek K.5: Przebiegi funkcji koherencji sygnałów rejestrowanych i generowanych podczas emisji fal EA o amplitudzie równej: i)  $A_{gen} = 3,5$  V, ii)  $A_{gen} = 4$  V



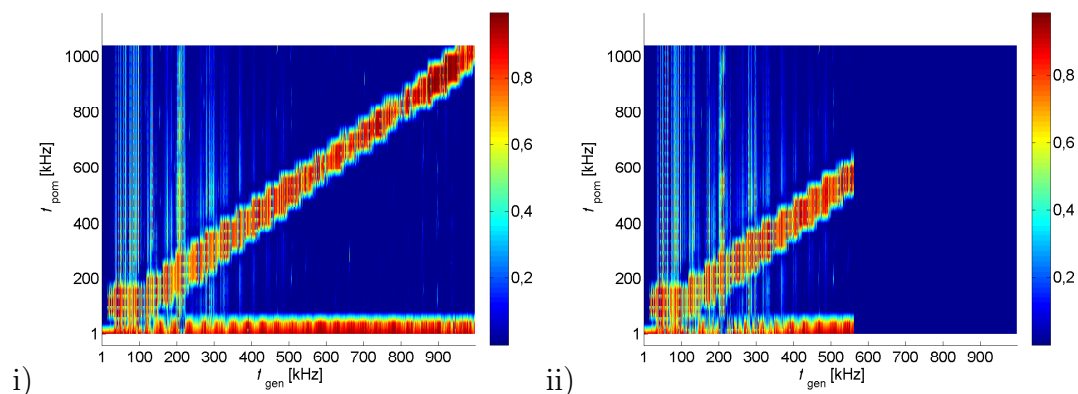
Rysunek K.6: Przebiegi funkcji koherencji sygnałów rejestrowanych i generowanych podczas emisji fal EA o amplitudzie równej: i)  $A_{gen} = 4,5$  V, ii)  $A_{gen} = 5$  V



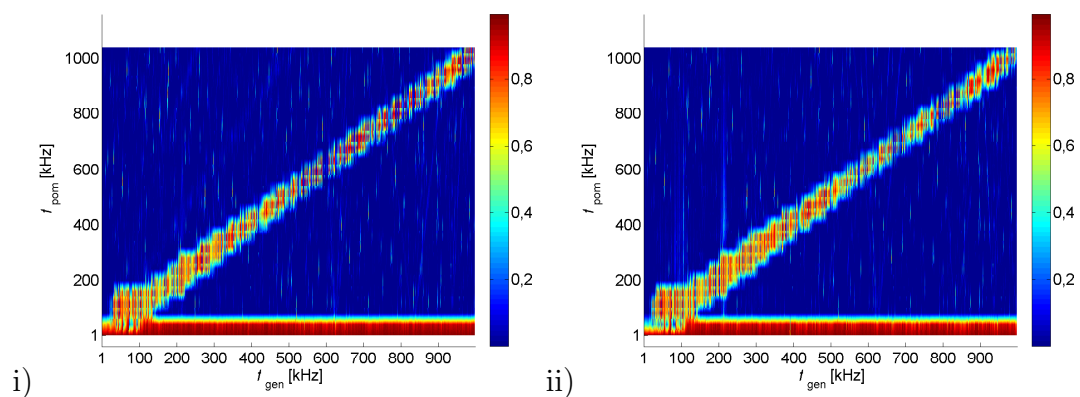
Rysunek K.7: Przebiegi funkcji koherencji sygnałów rejestrowanych i generowanych podczas emisji fal EA o amplitudzie równej: i)  $A_{\text{gen}}=5,5$  V, ii)  $A_{\text{gen}}=6$  V



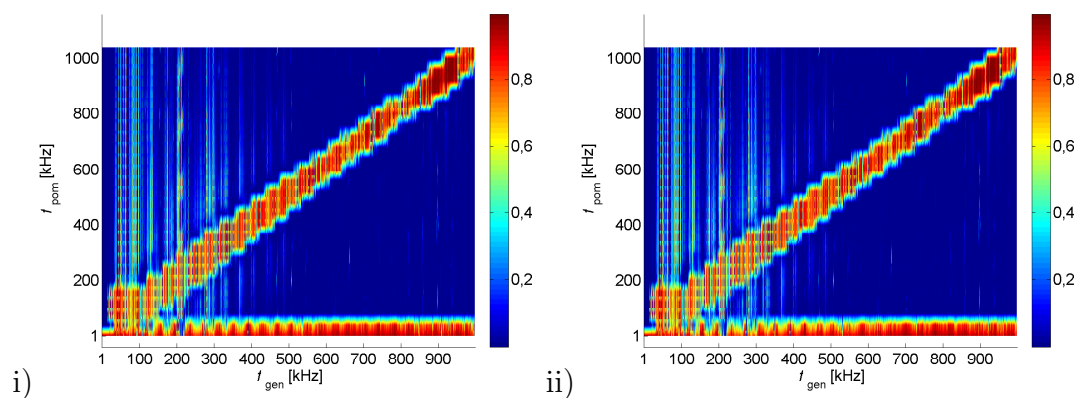
Rysunek K.8: Przebiegi funkcji koherencji sygnałów rejestrowanych i generowanych podczas emisji fal EA o amplitudzie równej: i)  $A_{\text{gen}}=6,5$  V, ii)  $A_{\text{gen}}=7$  V



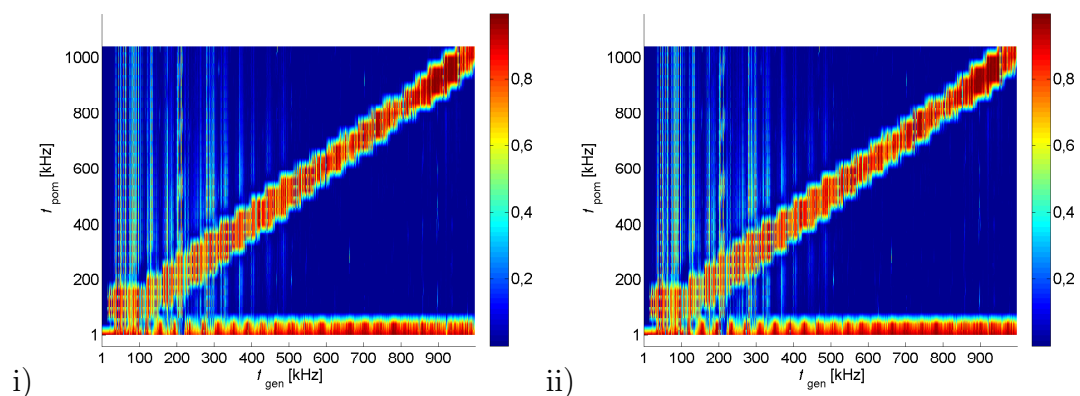
Rysunek K.9: Przebiegi funkcji koherencji sygnałów rejestrowanych i generowanych podczas emisji fal EA o amplitudzie równej: i)  $A_{\text{gen}}=7,5$  V, ii)  $A_{\text{gen}}=8$  V (pomiar nieudany)



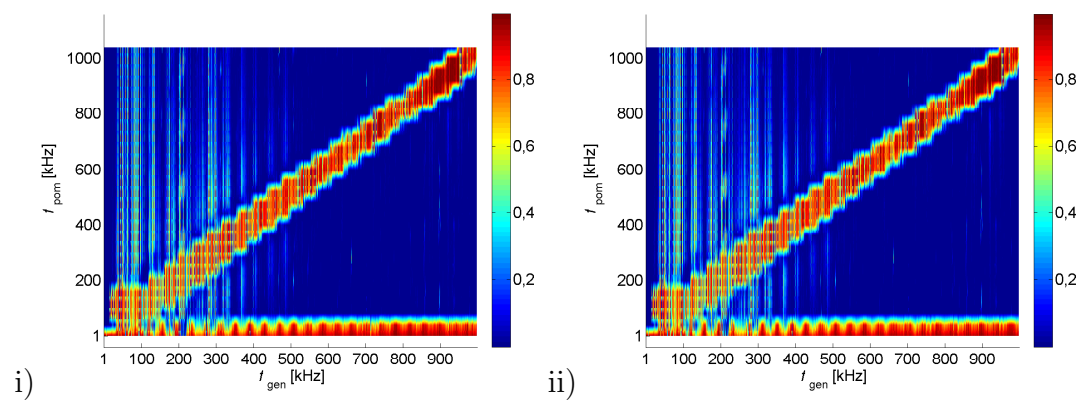
Rysunek K.10: Przebiegi funkcji koherencji sygnałów rejestrowanych i generowanych podczas emisji fal EA o amplitudzie równej: i)  $A_{gen} = 8,5$  V, ii)  $A_{gen} = 9$  V



Rysunek K.11: Przebiegi funkcji koherencji sygnałów rejestrowanych i generowanych podczas emisji fal EA o amplitudzie równej: i)  $A_{gen} = 9,5$  V, ii)  $A_{gen} = 10$  V



Rysunek K.12: Przebiegi funkcji koherencji sygnałów rejestrowanych i generowanych podczas emisji fal EA o amplitudzie równej: i)  $A_{gen} = 10,5$  V, ii)  $A_{gen} = 11$  V



Rysunek K.13: Przebiegi funkcji koherencji sygnałów rejestrowanych i generowanych podczas emisji fal EA o amplitudzie równej: i)  $A_{\text{gen}}=11,5$  V, ii)  $A_{\text{gen}}=12$  V

## Załącznik L

---

**Zestawienie porównawcze międzyszczytowych wartości sygnałów EA rejestrowanej przetwornikiem WD umieszczanym w różnych miejscach kadzi podczas generacji sygnałów o różnej amplitudzie  $A_{gen}$ . Lokalizacje przetwornika pomiarowego oznaczono odpowiednimi literami na rys. 7.7: a) położenie A, b) położenie B, c) położenie D, d) położenie E, e) położenie F**

---

**Rysunek L.1.** Zestawienie porównawcze międzyszczytowych wartości sygnałów EA rejestrowanej podczas generacji sygnału o amplitudzie: i)  $A_{gen}=0,5$  V, ii)  $A_{gen}=1$  V

**Rysunek L.2.** Zestawienie porównawcze międzyszczytowych wartości sygnałów EA rejestrowanej podczas generacji sygnału o amplitudzie: i)  $A_{gen}=1,5$  V, ii)  $A_{gen}=2$  V

**Rysunek L.3.** Zestawienie porównawcze międzyszczytowych wartości sygnałów EA rejestrowanej podczas generacji sygnału o amplitudzie: i)  $A_{gen}=2,5$  V, ii)  $A_{gen}=3$  V

**Rysunek L.4.** Zestawienie porównawcze międzyszczytowych wartości sygnałów EA rejestrowanej podczas generacji sygnału o amplitudzie: i)  $A_{gen}=3,5$  V, ii)  $A_{gen}=4$  V

**Rysunek L.5.** Zestawienie porównawcze międzyszczytowych wartości sygnałów EA rejestrowanej podczas generacji sygnału o amplitudzie: i)  $A_{gen}=4,5$  V, ii)  $A_{gen}=5$  V

**Rysunek L.6.** Zestawienie porównawcze międzyszczytowych wartości sygnałów EA rejestrowanej podczas generacji sygnału o amplitudzie: i)  $A_{gen}=5,5$  V, ii)  $A_{gen}=6$  V

**Rysunek L.7.** Zestawienie porównawcze międzyszczytowych wartości sygnałów EA rejestrowanej podczas generacji sygnału o amplitudzie: i)  $A_{gen}=6,5$  V, ii)  $A_{gen}=7$  V

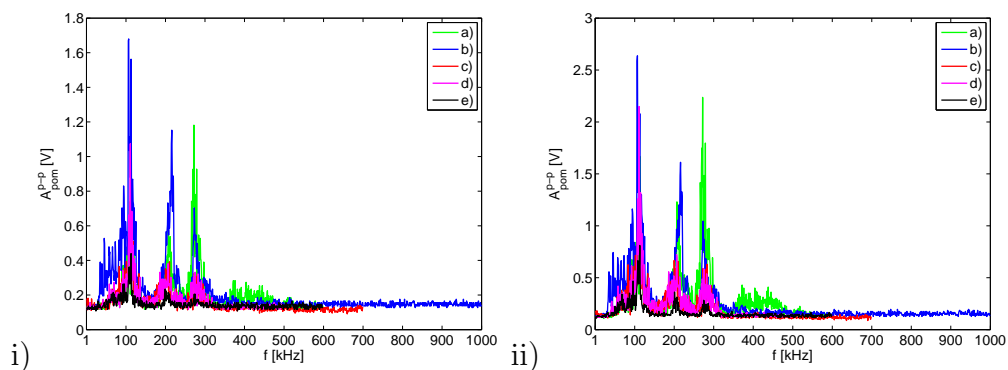
**Rysunek L.8.** Zestawienie porównawcze międzyszczytowych wartości sygnałów EA rejestrowanej podczas generacji sygnału o amplitudzie: i)  $A_{gen}=7,5$  V, ii)  $A_{gen}=8$  V

**Rysunek L.9.** Zestawienie porównawcze międzyszczytowych wartości sygnałów EA rejestrowanej podczas generacji sygnału o amplitudzie: i)  $A_{gen}=8,5$  V, ii)  $A_{gen}=9$  V

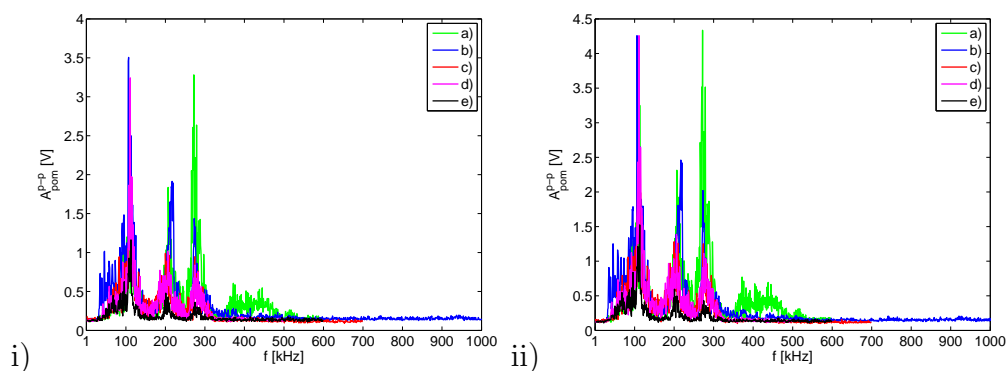
**Rysunek L.10.** Zestawienie porównawcze międzyszczytowych wartości sygnałów EA rejestrowanej podczas generacji sygnału o amplitudzie: i)  $A_{gen}=9,5$  V, ii)  $A_{gen}=10$  V

**Rysunek L.11.** Zestawienie porównawcze międzyszczytowych wartości sygnałów EA rejestrowanej podczas generacji sygnału o amplitudzie: i)  $A_{\text{gen}}=10,5$  V, ii)  $A_{\text{gen}}=11$  V

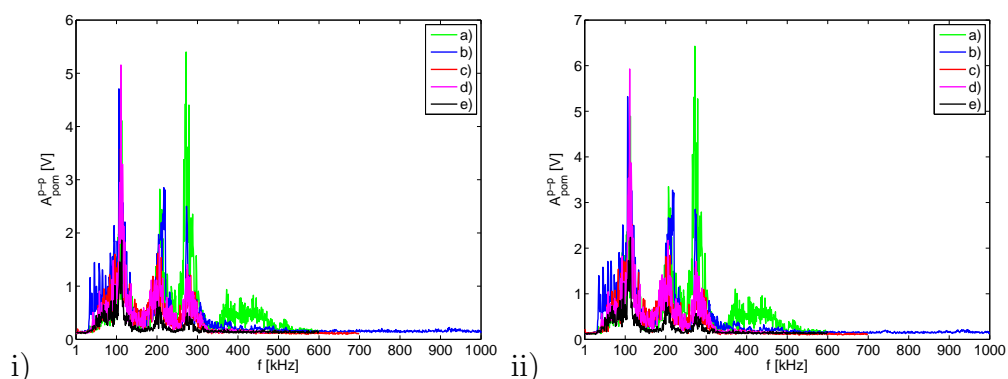
**Rysunek L.12.** Zestawienie porównawcze międzyszczytowych wartości sygnałów EA rejestrowanej podczas generacji sygnału o amplitudzie: i)  $A_{\text{gen}}=11,5$  V, ii)  $A_{\text{gen}}=12$  V



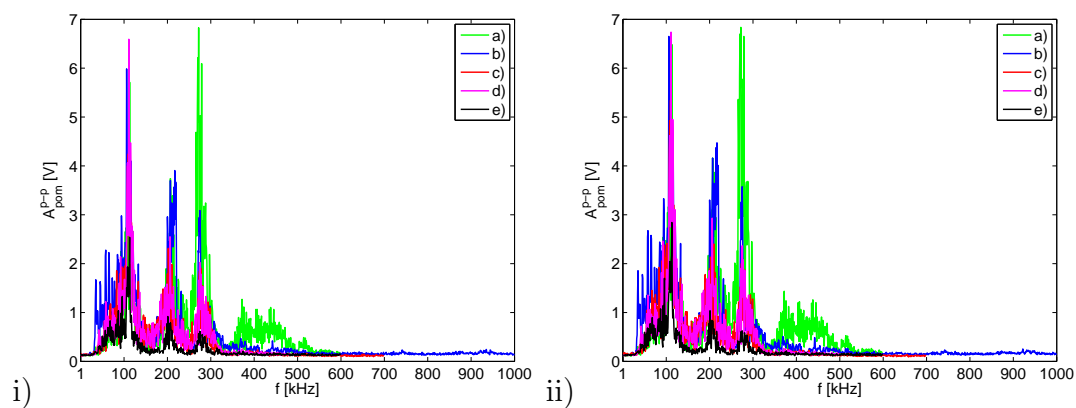
Rysunek L.1: Zestawienie porównawcze międzyszczytowych wartości sygnałów EA rejestrowanej podczas generacji sygnału o amplitudzie: i)  $A_{gen} = 0,5$  V, ii)  $A_{gen} = 1$  V



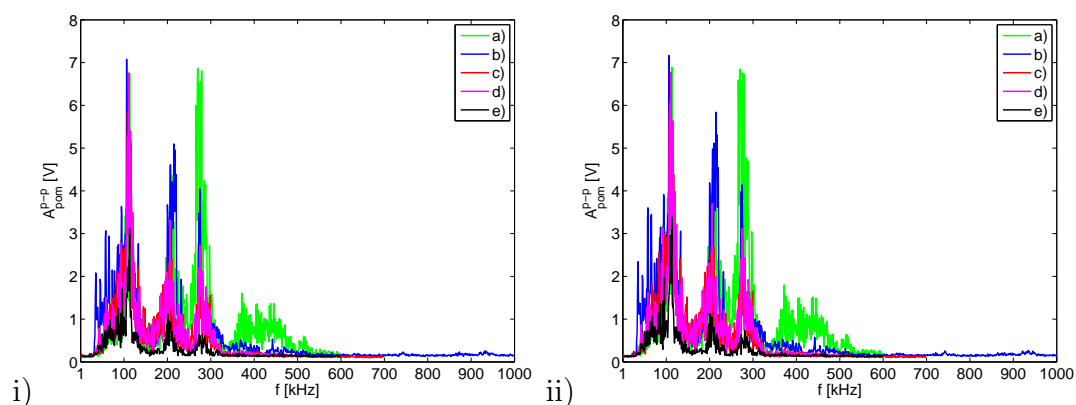
Rysunek L.2: Zestawienie porównawcze międzyszczytowych wartości sygnałów EA rejestrowanej podczas generacji sygnału o amplitudzie: i)  $A_{gen} = 1,5$  V, ii)  $A_{gen} = 2$  V



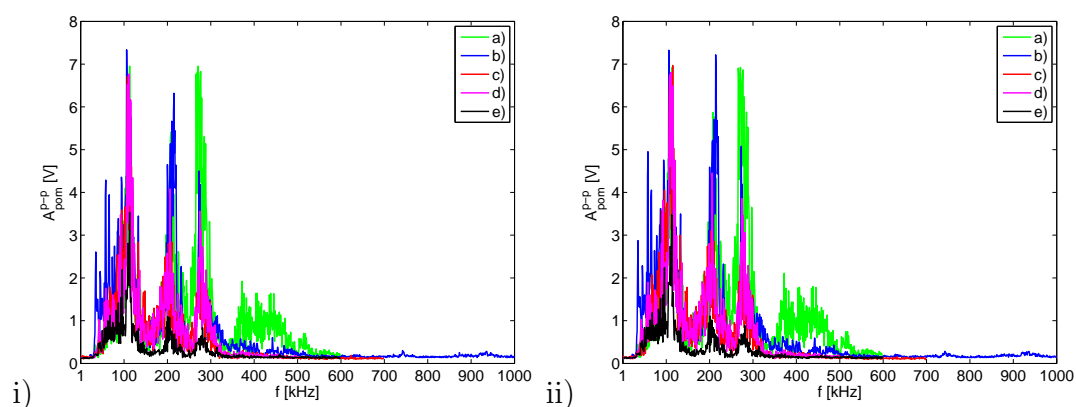
Rysunek L.3: Zestawienie porównawcze międzyszczytowych wartości sygnałów EA rejestrowanej podczas generacji sygnału o amplitudzie: i)  $A_{gen} = 2,5$  V, ii)  $A_{gen} = 3$  V



Rysunek L.4: Zestawienie porównawcze międzyszczytowych wartości sygnałów EA rejestrowanej podczas generacji sygnału o amplitudzie: i)  $A_{\text{gen}} = 3,5 \text{ V}$ , ii)  $A_{\text{gen}} = 4 \text{ V}$

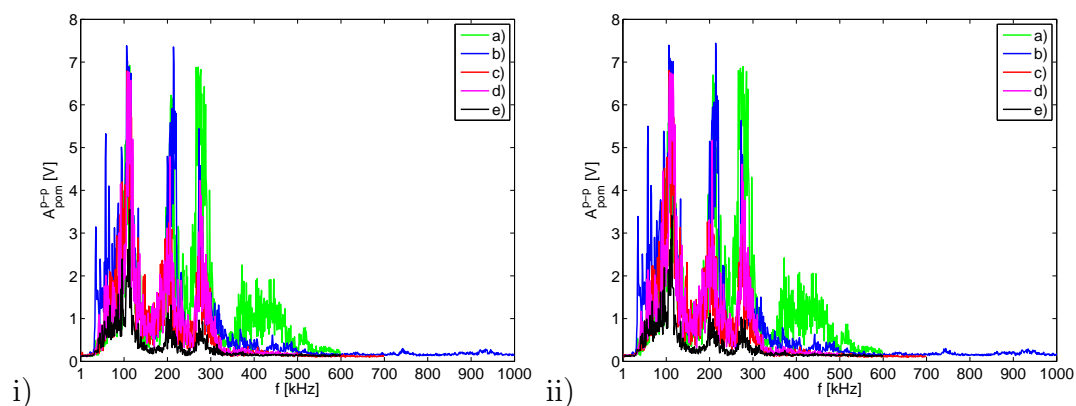


Rysunek L.5: Zestawienie porównawcze międzyszczytowych wartości sygnałów EA rejestrowanej podczas generacji sygnału o amplitudzie: i)  $A_{\text{gen}} = 4,5 \text{ V}$ , ii)  $A_{\text{gen}} = 5 \text{ V}$

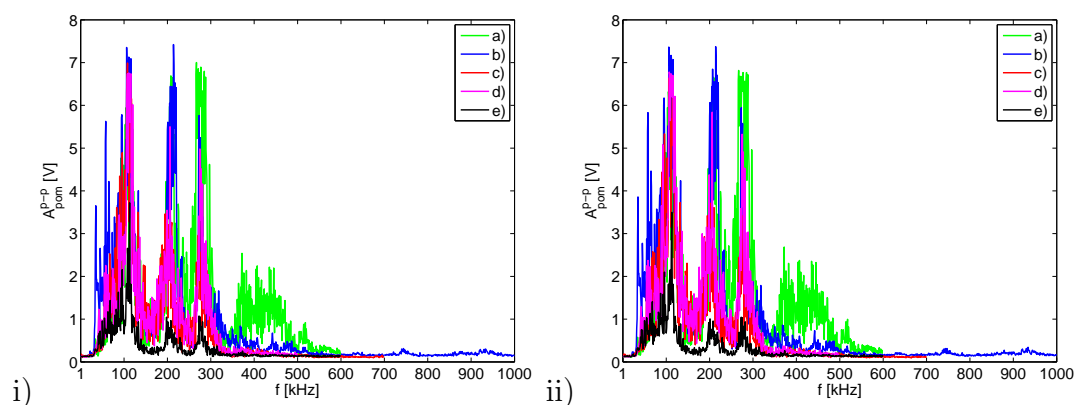


Rysunek L.6: Zestawienie porównawcze międzyszczytowych wartości sygnałów EA rejestrowanej podczas generacji sygnału o amplitudzie: i)  $A_{\text{gen}} = 5,5 \text{ V}$ , ii)  $A_{\text{gen}} = 6 \text{ V}$

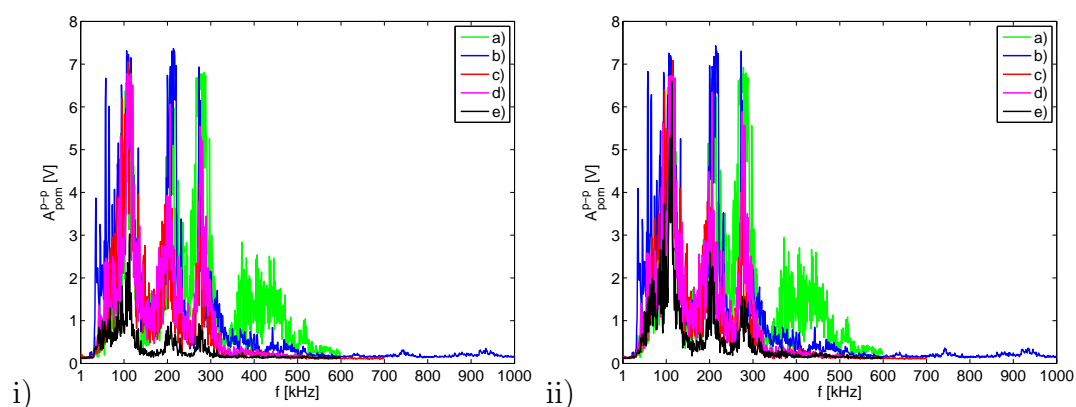




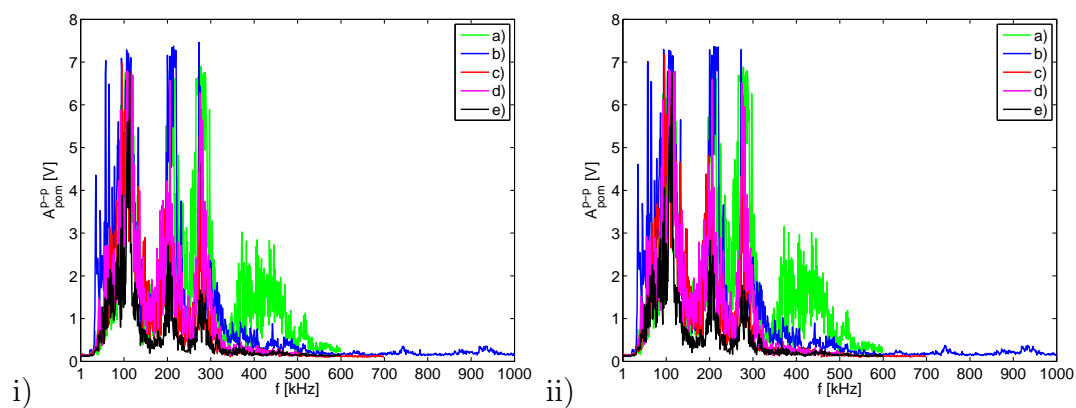
Rysunek L.7: Zestawienie porównawcze międzyszczytowych wartości sygnałów EA rejestrowanej podczas generacji sygnału o amplitudzie: i)  $A_{\text{gen}} = 6,5 \text{ V}$ , ii)  $A_{\text{gen}} = 7 \text{ V}$



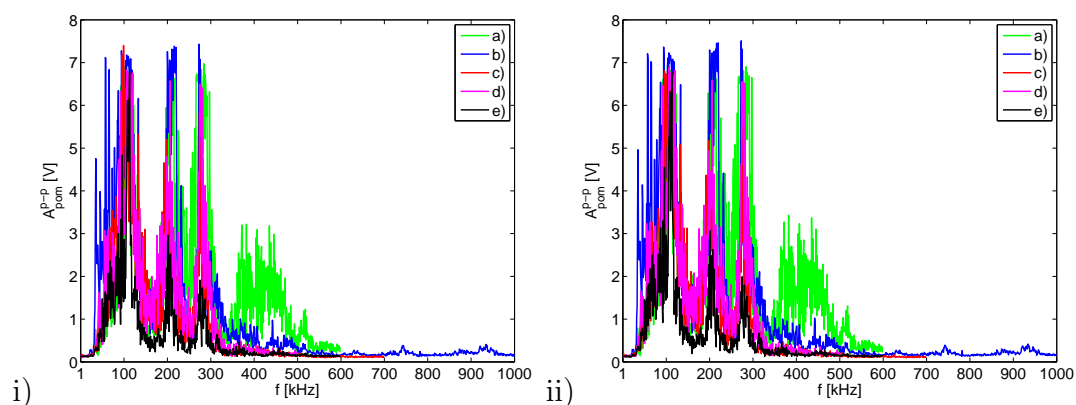
Rysunek L.8: Zestawienie porównawcze międzyszczytowych wartości sygnałów EA rejestrowanej podczas generacji sygnału o amplitudzie: i)  $A_{\text{gen}} = 7,5 \text{ V}$ , ii)  $A_{\text{gen}} = 8 \text{ V}$



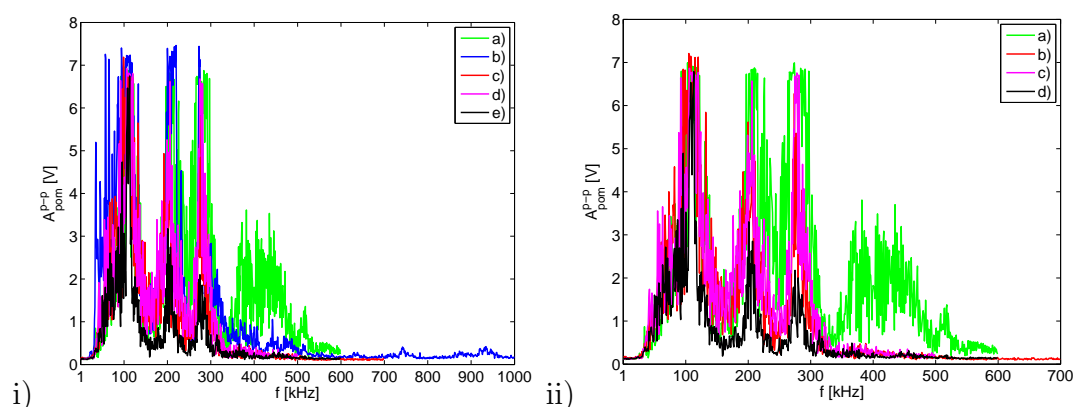
Rysunek L.9: Zestawienie porównawcze międzyszczytowych wartości sygnałów EA rejestrowanej podczas generacji sygnału o amplitudzie: i)  $A_{\text{gen}} = 8,5 \text{ V}$ , ii)  $A_{\text{gen}} = 9 \text{ V}$



Rysunek L.10: Zestawienie porównawcze międzyszczytowych wartości sygnałów EA rejestrowanej podczas generacji sygnału o amplitudzie: i)  $A_{\text{gen}} = 9,5 \text{ V}$ , ii)  $A_{\text{gen}} = 10 \text{ V}$



Rysunek L.11: Zestawienie porównawcze międzyszczytowych wartości sygnałów EA rejestrowanej podczas generacji sygnału o amplitudzie: i)  $A_{\text{gen}} = 10,5 \text{ V}$ , ii)  $A_{\text{gen}} = 11 \text{ V}$



Rysunek L.12: Zestawienie porównawcze międzyszczytowych wartości sygnałów EA rejestrowanej podczas generacji sygnału o amplitudzie: i)  $A_{\text{gen}} = 11,5 \text{ V}$ , ii)  $A_{\text{gen}} = 12 \text{ V}$