

**AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA**  
**im. Stanisława Staszica**  
**Wydział Górnictwa i Geoinżynierii**  
**Katedra Górnictwa Odkrywkowego**

**Rozprawa doktorska**

**WPLYW WIELKOŚCI OPÓŹNIEŃ MILISEKUNDOWYCH**  
**NA SPEKTRUM ODPOWIEDZI DRGAŃ**  
**WZBUDZANYCH DETONACJĄ ŁADUNKÓW MATERIA-**  
**ŁÓW WYBUCHOWYCH**

**mgr inż. Józef Pyra**

**Promotor**  
**dr hab. inż. Marek Cała prof. nadzw. AGH**

**- Kraków 2011 -**

**Panu Prof. dr hab. inż. Markowi Cale**  
serdecznie dziękuję za zainteresowanie  
tematem, życzliwość i pomoc okazane  
podczas realizacji niniejszej pracy



## Spis treści

|                                                                                         |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1. Wstęp.....                                                                           | 6  |
| 2. Zastosowanie opóźnień milisekundowych do robót z użyciem MW .....                    | 9  |
| 2.1. Roboty strzałowe w górnictwie podziemnym .....                                     | 9  |
| 2.2. Roboty strzałowe w górnictwie odkrywkowym .....                                    | 12 |
| 2.3. Roboty inżynierskie z użyciem MW .....                                             | 15 |
| 2.4. Odpalanie milisekundowe w górnictwie odkrywkowym .....                             | 20 |
| 2.4.1. System inicjowania elektrycznego .....                                           | 21 |
| 2.4.2. System inicjowania nieelektrycznego .....                                        | 23 |
| 2.4.3. System inicjowania elektronicznego .....                                         | 26 |
| 2.5. Badania związane z opóźnieniem milisekundowym .....                                | 29 |
| 2.5.1. Doświadczenia zagraniczne i krajowe .....                                        | 29 |
| 2.5.2. Wzory stosowane do wyznaczania opóźnienia milisekundowego .....                  | 43 |
| 3. Oddziaływanie na otoczenie drgań wzbudzanych detonacją MW .....                      | 47 |
| 3.1. Charakterystyka drgań .....                                                        | 47 |
| 3.1.1. Czynniki wpływające na intensywność drgań wzbudzanych robotami strzałowymi ..... | 51 |
| 3.1.2. Wpływ drgań parasejsmicznych na obiekty budowlane .....                          | 52 |
| 3.2. Profilaktyka stosowana przez przedsiębiorstwa górnicze .....                       | 58 |
| 3.3. Drgania parasejsmiczne jako sygnał .....                                           | 59 |
| 4. Wybrane metody analizy sygnałów .....                                                | 64 |
| 4.1. Najpopularniejsze metody analizy sygnału drgań parasejsmicznych .....              | 64 |
| 4.2. Analiza czasowo-częstotliwościowa Matching Pursuit (MP) .....                      | 73 |
| 4.3. Spektrum odpowiedzi i jego zastosowanie .....                                      | 78 |
| 4.3.1. Charakterystyka metody spektrum odpowiedzi .....                                 | 79 |
| 4.3.2. Spektrum odpowiedzi drgań powstałych na skutek wstrząsów sejsmicznych .....      | 84 |
| 4.3.3. Spektrum odpowiedzi drgań powstałych na skutek wstrząsów górniczych .....        | 88 |

|                                                                                                                                                      |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.3.4. Spektrum odpowiedzi drgań powstałych na skutek ruchu komunikacyjnego .....                                                                    | 94  |
| 4.3.5. Spektrum odpowiedzi drgań powstałych na skutek robót strzałowych.....                                                                         | 95  |
| 4.3.6. Przykładowe spektra odpowiedzi dla wybranych surowców.....                                                                                    | 100 |
| 4.4. Podsumowanie .....                                                                                                                              | 107 |
| 5. Opis badań terenowych .....                                                                                                                       | 108 |
| 5.1. Założenia do badań terenowych.....                                                                                                              | 108 |
| 5.2. Zastosowana aparatura pomiarowa .....                                                                                                           | 109 |
| 5.3. Wybrane parametry robót strzałowych oraz lokalizacja stanowisk<br>pomiarowych w otoczeniu kopalni gipsu A .....                                 | 112 |
| 5.4. Wybrane parametry robót strzałowych oraz lokalizacja stanowisk<br>pomiarowych w otoczeniu kopalni wapienia B .....                              | 114 |
| 6. Analiza zarejestrowanych sygnałów .....                                                                                                           | 117 |
| 6.1. Analiza dotychczasowych wyników badań z kopalni gipsu A.....                                                                                    | 117 |
| 6.1.1. Analiza sygnałów z kopalni gipsu A z zastosowaniem analizy MP .....                                                                           | 120 |
| 6.1.2. Spektrum odpowiedzi drgań zarejestrowanych w otoczeniu kopalni gipsu A ...                                                                    | 134 |
| 6.2. Analiza wyników badań prowadzonych w kopalni wapienia B .....                                                                                   | 144 |
| 6.2.1. Analiza wyników badań prowadzonych w kopalni wapienia B – odpalanie<br>ładunków MW systemem nieelektrycznym <i>Nonel Unidet</i> .....         | 144 |
| 6.2.2. Spektrum odpowiedzi drgań zarejestrowanych w otoczeniu kopalni<br>wapienia B – opóźnienie zadawane systemem nieelektrycznym .....             | 160 |
| 6.2.3. Analiza wyników badań z kopalni wapienia B – odpalanie ładunków MW<br>systemem elektronicznym <i>i-kon</i> .....                              | 166 |
| 6.2.4. Spektrum odpowiedzi drgań zarejestrowanych w otoczeniu kopalni<br>wapienia B – opóźnienie zadawane systemem elektronicznym <i>i-kon</i> ..... | 184 |
| 6.3. Podsumowanie .....                                                                                                                              | 194 |
| 7. Modelowanie numeryczne oddziaływań dynamicznych w górotworze .....                                                                                | 197 |
| 7.1. Podejście pseudostatyczne.....                                                                                                                  | 197 |
| 7.2. Podejście dynamiczne .....                                                                                                                      | 198 |

|                                                      |     |
|------------------------------------------------------|-----|
| 7.2.1. Obciążenia dynamiczne i warunki brzegowe..... | 199 |
| 7.2.2. Tłumienie mechaniczne .....                   | 201 |
| 7.2.3. Propagacja fal przez model .....              | 201 |
| 7.3. Analiza wyników obliczeń dynamicznych .....     | 202 |
| 7.4. Podsumowanie .....                              | 207 |
| 8. Wnioski końcowe.....                              | 208 |
| Bibliografia.....                                    | 208 |
| Spis rysunków .....                                  | 219 |
| Spis tabel .....                                     | 227 |
| Załączniki .....                                     | 228 |

# 1. Wstęp

Roboty strzałowe prowadzone w kopalniach odkrywkowych surowców skalnych to odpalanie dużych mas materiału wybuchowego (MW) w celu uzyskania urobku o żądanej granulacji. W wyniku detonacji MW, propagowana jest wewnątrz masywu skalnego<sup>1</sup> znaczna ilość energii, która skutkuje określonym poziomem intensywności drgań rejestrowanych w otoczeniu. W większości prac badawczych, dotyczących ograniczania poziomu drgań parasejsmicznych, brana jest przede wszystkim pod uwagę masa stosowanych ładunków MW i odległość prowadzonych robót od obiektów chronionych. Pozostałe czynniki (np. budowa geologiczna, stosowany system inicjacji i wielkość opóźnienia milisekundowego, itd.) są trudne do ogólnego zdefiniowania, dlatego też ich wpływ jest analizowany w danych warunkach lokalnych. Ważnym elementem prowadzonych badań jest dostosowanie parametrów prowadzonych robót strzałowych do własności ośrodka, w którym propagowane są drgania, tak aby zminimalizować oddziaływania drgań na konstrukcje obiektów budowlanych znajdujących się w otoczeniu.

Odpalanie ładunków w odstępach czasowych oznacza, że wyzwolona z MW energia dostarczana jest do masywu skalnego z określoną częstotliwością. W wyniku badań można stwierdzić, że częstotliwość odpalania ładunków MW jako odwrotność stosowanego opóźnienia (np. 25 ms  $\rightarrow$  40 Hz) i częstotliwość drgań charakterystyczna dla podłoża, skorelowane z sobą, mogą skutkować wzbudzeniem rezonansu, a w efekcie wzmocnieniem intensywności drgań. W takim przypadku, posadowiony w otoczeniu obiekt budowlany posiadający częstotliwości własne zbliżone do rezonansowych podłoża, jest zagrożony wystąpieniem uszkodzeń elementów konstrukcyjnych (Biessikirski i Winzer 2002, Maciąg 1998, Tatara 2002).

Problem oddziaływania drgań wzbudzanych robotami strzałowymi na obiekty w otoczeniu sprowadza się do czterech zagadnień:

---

<sup>1</sup> Ogólnie **górotworem** nazywa się obszar obejmujący zewnętrzne warstwy skorupy ziemskiej, w którym prowadzone są działania górnicze lub budowlane. Wykonywane są również prace naukowo-badawcze których celem jest poznanie mechanizmów procesów fizycznych zachodzących w górotworze.

**Masyw skalny** – jest elementem strukturalnym górotworu. Tworzy go zespół różnych złóż skalnych, uformowanych w wyniku różnorodnych procesów skałotwórczych i tektonicznych. W rozważanym ujęciu masyw skalny jest określonym obszarem górotworu, w którym to obszarze występują zjawiska fizyczne, związane z działalnością górniczą lub budowlaną, uformowanych w wyniku różnorodnych procesów skałotwórczych i tektonicznych. W rozważanym ujęciu masyw skalny jest określonym obszarem górotworu, w którym to obszarze występują zjawiska fizyczne, związane z działalnością górniczą lub budowlaną.

- źródło wzbudzania drgań – użycie określonej masy MW do urabiania skał może być sterowane,
- ośrodek skalny jako środowisko przez które propagowane są drgania – może w znaczący sposób zmieniać strukturę drgań,
- mechanizm przenoszenia drgań z podłoża do obiektu chronionego, który stanowi swoisty filtr górnozaporowy filtrujący wyższe częstotliwości,
- odpowiedź obiektu na wymuszenie kinematyczne.

Interakcja układu podłoże – obiekt budowlany oraz odpowiedź konstrukcji obiektu na wymuszenie zewnętrzne stanowią istotne uzupełnienie badań wpływu opóźnienia milisekundowego na intensywność drgań.

Wielkość opóźnienia musi być wyznaczona doświadczalnie w odniesieniu do danych warunków geologiczno – górniczych ponieważ jakiegokolwiek obliczenia nie pozwalają na uzyskanie jednoznacznych wyników. W przypadku kiedy mamy do czynienia z oceną oddziaływania drgań na obiekty budowlane znajdujące się w otoczeniu kopalni, konieczne również jest dokonywanie analizy składu częstotliwościowego rejestrowanych drgań, ponieważ częstotliwości decydują o zakwalifikowaniu drgań do grupy nieszkodliwych, odczuwalnych lub szkodliwych.

Wprowadzenie na rynek coraz precyzyjniejszych narzędzi, środków i sprzętu strzałowego, do zadawania opóźnienia milisekundowego, wymusza konieczność stosowania dokładniejszych analiz rejestrowanych drgań w celu dokładniejszego rozpoznania ich struktury. Jedną z takich analiz, która umożliwia poznanie składu częstotliwościowego drgań jest metoda spektrum odpowiedzi, szeroko stosowana w analizie trzęsień ziemi i wstrząsów górniczych. Dodatkową zaletą tej metody jest możliwość bezpośredniej oceny oddziaływania drgań na obiekt budowlany i na poszczególne jego elementy. Największą przewagą jej, nad innymi metodami analitycznymi, jest możliwość bezpośredniego zastosowania do projektowania nowych obiektów budowlanych i wprowadzania ewentualnych poprawek w obiektach już istniejących.

Analizując wyniki dotychczasowych badań w zakresie minimalizacji drgań przez zastosowanie opóźnienia milisekundowego można stwierdzić, że przedstawione hipotezy nie pozwalają na uogólnienie opisu mechanizmu odpalania milisekundowego. Tylko dalsze badania wpływu różnych parametrów robót strzałowych na efekt sejsmiczny mogą przyczynić się do rozwiązania tego problemu.

Spostrzeżenia te były podstawą do podjęcia badań mających na celu określenie wpływu, zastosowanych przy odpalaniu długimi otworami, opóźnień milisekundowych na spektrum odpowiedzi drgań podłoża i ochranianych obiektów.

### **Teza pracy:**

Wielkość opóźnienia milisekundowego jest jednym z czynników wpływających na zmianę struktury drgań wzbudzanych detonacją ładunków materiału wybuchowego. Parametry drgań parasejsmicznych, rozpoznane poprzez badanie zmienności spektrum odpowiedzi, mogą uwiarygodnić prognozę ich oddziaływania na obiekty budowlane.

### **Cel pracy:**

Precyzyjnie zadawany odstęp czasowy między detonacją poszczególnych ładunków modyfikuje charakterystyki częstotliwościowe drgań. Poznanie mechanizmu wpływu opóźnienia milisekundowego na spektrum odpowiedzi drgań, pozwoli ograniczyć powstawanie niepożądanych efektów oddziaływania na otoczenie.

### **Przedmiot pracy:**

Przedmiotem pracy jest określenie wpływu wielkości opóźnień milisekundowych, stosowanych w czasie odpalania ładunków MW, na spektrum odpowiedzi drgań wzbudzanych w masywie skalnym oraz w obiektach budowlanych posadowionych w otoczeniu. W czasie realizacji pracy wykonano analizy dotychczasowych wyników, zebranych w rezultacie wieloletnich pomiarów intensywności drgań w otoczeniu kopalni gipsu i wapienia, w czasie wykonywania robót strzałowych z zastosowaniem nieelektrycznego systemu inicjacji ładunków materiału wybuchowego. W kopalni wapienia przeprowadzono także badania w czasie wykonywania robót strzałowych z zastosowaniem nieelektrycznego i elektronicznego systemu inicjacji. Dokonano analiz czasowo-częstotliwościowych zarejestrowanych drgań podłoża oraz obiektów budowlanych posadowionych na tym podłożu. Wykonano również analizy wpływu zmiennych opóźnień na relacje podłoże – obiekt budowlany oraz na kształt krzywej pseudo-prędkościowego spektrum odpowiedzi.

## **2. Zastosowanie opóźnień milisekundowych do robót z użyciem MW**

Materiał wybuchowy znalazł szerokie zastosowanie przy wykonywaniu różnego typu prac, począwszy od użytku cywilnego, a kończąc na wojsku. W pracy cywilnych MW jest głównie używane w górnictwie podziemnym i odkrywkowym oraz w różnego rodzaju pracach inżynierskich takich jak likwidowanie obiektów budowlanych, wykonywanie niwelacji terenu, platerowanie itp.

### **2.1. Roboty strzałowe w górnictwie podziemnym**

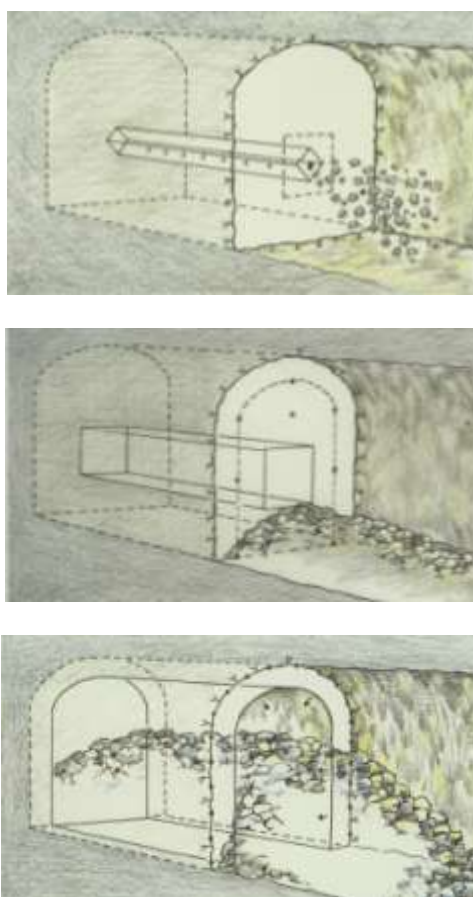
Wykonywanie robót strzałowych w wyrobiskach podziemnych różni się znacznie od robót strzałowych na powierzchni. Wykonywanie wyrobisk podziemnych odbywa się na ogół przy jednej powierzchni odsłonięcia. Technikę strzelniczą stosuje się w miejscach gdzie kombajny nie są w stanie urobić calizny. W kopalniach węgla kamiennego, MW wykorzystywane są do drażenia wyrobisk przygotowawczych i udostępniających (chodników pod i nadścianowych, sztolni, szybów, upadowych, czy pochylni) drażonych w skałach płonnych. W kopalniach rud metali roboty strzałowe, oprócz drażenia wyrobisk, wykorzystywane są na szeroka skalę do urabiania calizny, w celu pozyskania urobku.

Otwory strzałowe zazwyczaj wiercone są prostopadle do czoła przodka lub pod pewnym niewielkim kątem do tej powierzchni. Ze względu na funkcje dzieli się je na: włomowe, pomocnicze, urabiające i obrysowe. Czasem otwór włomowy wykonuje się podczas osobnej serii i usuwa się z niego urobek, tworząc dodatkowe powierzchnie odsłonięcia dla pozostałych otworów, a tym samym poprawia się warunki urabiania calizny przez MW (Rys. 2.1). Czasy opóźnień zapalników zwłocznych rozmieszczane są kolejno: najniższe na otwory włomowe, większe opóźnienie na otwory pomocnicze i urabiające, a na samym końcu odpalane są otwory obrysowe (Rys. 2.2). W celu uzyskania dodatkowej, wyraźnej powierzchni odsłonięcia, do otworów włomowych ładuje się większe ilości MW, w stosunku do otworów urabiających. Najmniej MW ładowane jest do otworów obrysowych, aby nie spowodować nadmiernych spękań masywu poza obrysem urabianego pola. Długość otworów, w warunkach polskiego górnictwa podziemnego przy pracach eksploatacyjnych, zazwyczaj nie przekracza 6 metrów.

Oprócz robót strzałowych prowadzonych przy eksploatacji, MW jest również wykorzystywany do profilaktyki tapaniowej. W ramach tej działalności wyróżniamy roboty strzałowe wstrząsowe (zwane również odprężającymi lub kamufletowymi) i torpedujące w kopalniach węglowych oraz prowokujące w kopalniach rud.

Roboty strzałowe wstrząsowe charakteryzują się długością otworów do 12 m i wypełniane są MW nie więcej niż do połowy ich długości licząc od dna otworu. Resztę stanowi przybitka. Zadaniem tego typu odpalania ładunków MW jest prowokowanie wstrząsów górotworu oraz spowodowanie zmian własności strukturalnych pokładu, ograniczających skłonność węgla do tapanięć (Dubieński i Konopko 2000).

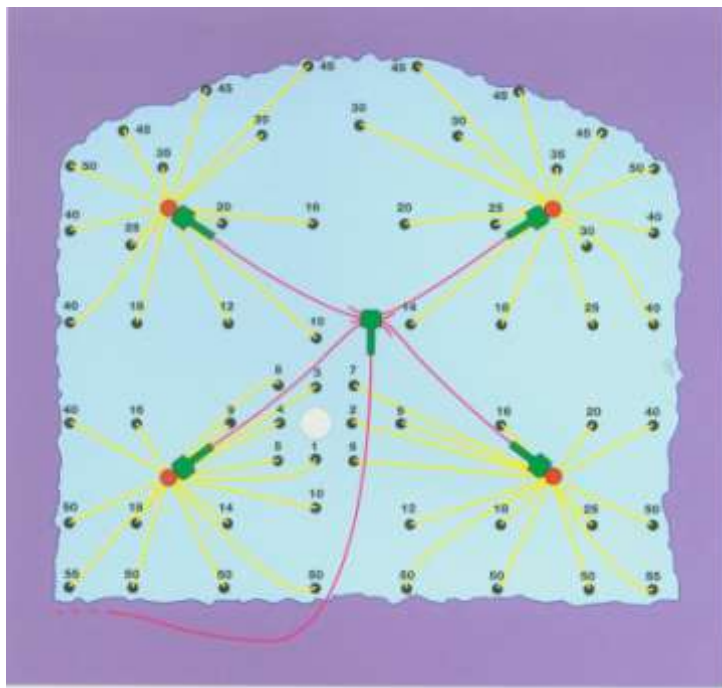
Roboty strzałowe torpedujące i prowokujące polegają na odwierceniach długich otworów w skałach otaczających pokład i wypełnieniu ich w połowie MW. Są one znacznie dłuższe niż w przypadku robót strzałowych wstrząsowych. W praktyce odpalane są ładunki od kilkuset kilogramów do kilku ton MW – w kopalniach rud miedzi. Celem tego typu robót jest prowokowanie wstrząsów górniczych i odprężenie górotworu (Dubieński i Konopko 2000).



Rys. 2.1. Schemat wykonywania wyrobiska korytarzowego (Poradnik Nonel 2003)

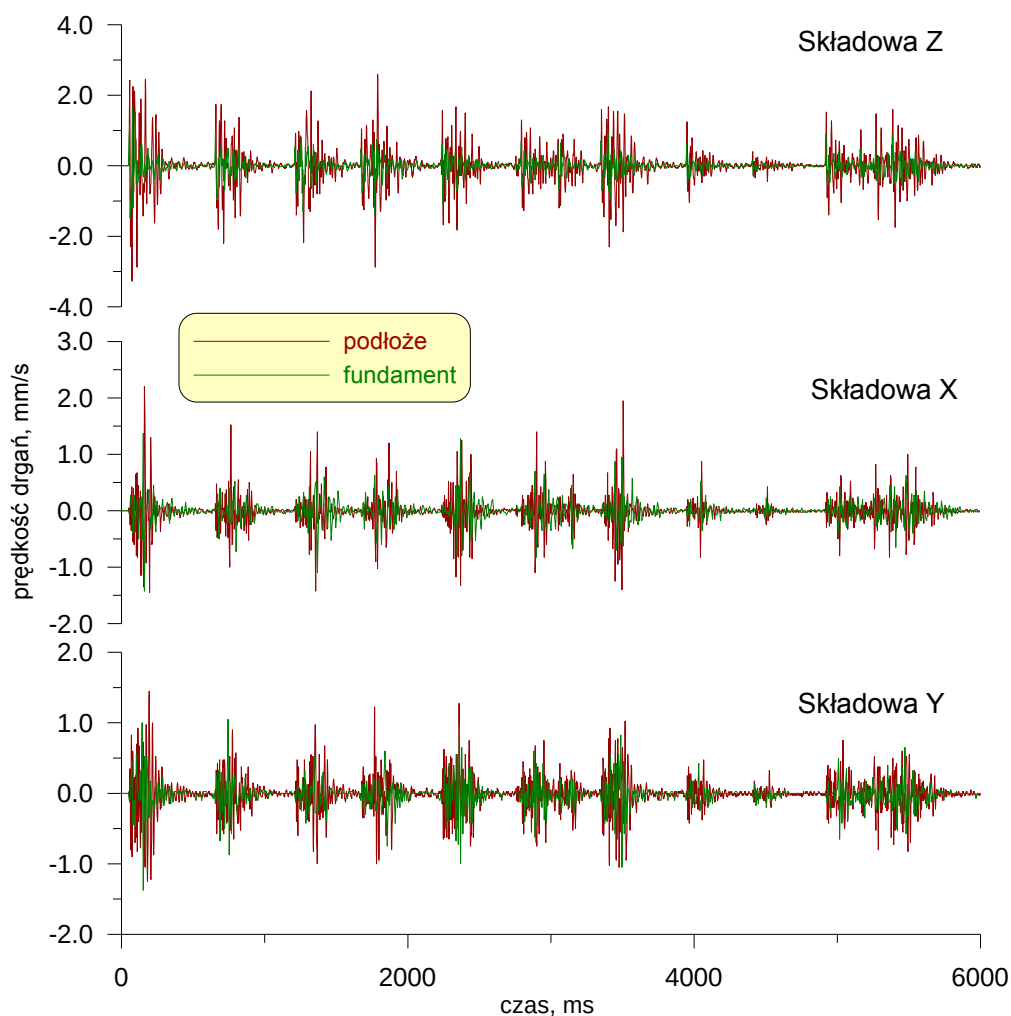


Roboty strzałowe wykonuje się zazwyczaj na dużych głębokościach i sygnał z detonacji MW nie dociera do powierzchni, niekiedy jednak prace prowadzone są bardzo blisko powierzchni i wtedy można się spodziewać oddziaływania na zabudowę powierzchniową. Opóźnienie czasowe, jakie wtedy jest używane może mieć wpływ na poziom rejestrowanych drgań.



**Rys. 2.2. Przykład rozmieszczenia stopni opóźnień przy wykonywaniu wyrobiska korytarzowego (Poradnik Nonel 2003)**

W warunkach polskich kopalń zazwyczaj stosuje się do odpalania zapalniczki półsekundowe, stąd też dla przykładu przedstawiono wyniki rejestracji drgań podczas prowadzenia prac strzałowych przy drażeniu upadowej transportowej z ich wykorzystaniem. Stanowiska pomiarowe zlokalizowano tak, by dawały obraz oddziaływania aktualnie prowadzonych robót, na podłoże i same obiekty na powierzchni. Na rysunku 2.3 przedstawiono przykładowy sejsmogram.



**Rys. 2.3. Przykładowy sejsmogram drgań wzbudzonych robotami strzałowymi w kopalni podziemnej**

Analizując zapis drgań przedstawionych na rysunku 2.3 można zauważyć, że drgania wzbudzone odpalaniem ładunków MW z opóźnieniem półsekundowym zostały praktycznie rozdzielone, czyli rejestrowany jest sygnał od pojedynczych ładunków MW (Biessikirski *at al.* 2006).

W górnictwie podziemnym stosowane opóźnienia mają odmienne zadanie, niż w górnictwie odkrywkowym. W celu prawidłowego przebiegu procesu urabiania musi być zachowana kolejność odpalania poszczególnych otworów, dlatego dobór opóźnienia milisekundowego jest ograniczony.

## **2.2. Roboty strzałowe w górnictwie odkrywkowym**

Roboty strzałowe, prowadzone w odkrywkowych zakładach górniczych, są bezpośrednio związane z uzyskaniem urobku i zalicza się do nich odpalanie długich oraz krótkich urabiających otworów strzałowych.

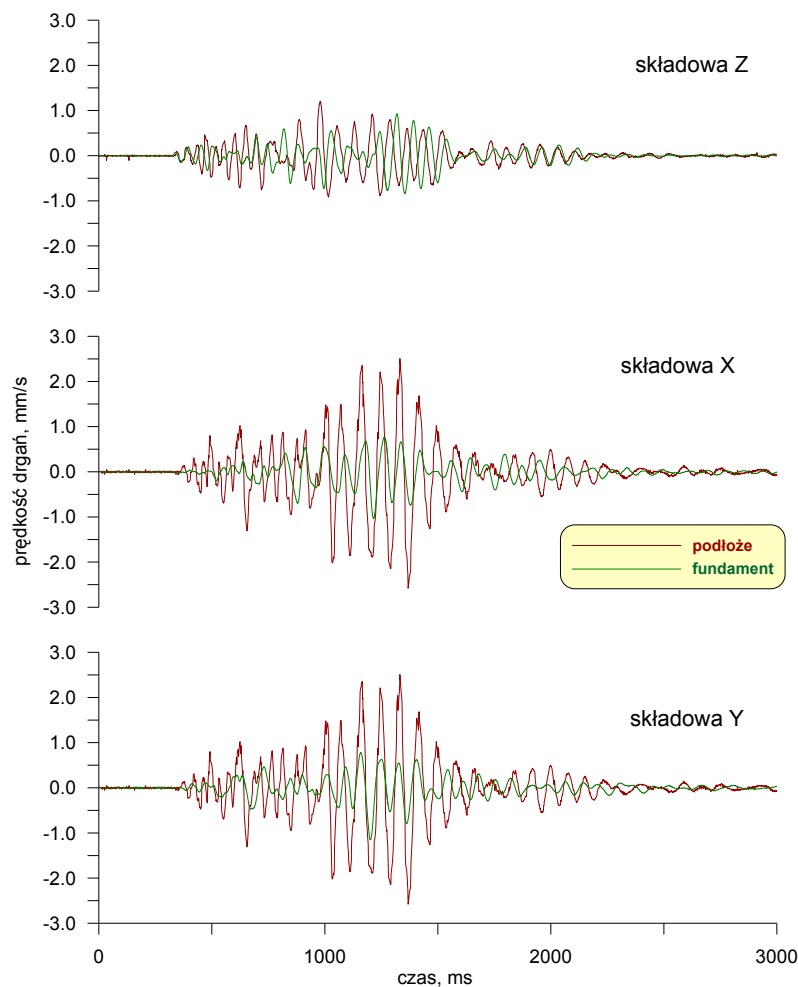
Urabianie długimi otworami polega na stosowaniu ładunków MW umieszczonych w otworach o długości powyżej 6 metrów. Stosowane średnice mieszczą się w przedziale  $70 \div 140$  mm. Główną zaletą tej metody jest jej efektywność i uzyskiwanie dużych mas równomiernie rozdrobnionego urobku. Nadaje się ona do wszystkich rodzajów skał, a ograniczenie stosowalności może być tylko wynikiem trudności w wydajnym wierceniu otworów o odpowiedniej długości. Metodą długich otworów urabia się piętra o wysokości od 6 do 30 m. Wysokość piętra zależy od rodzaju skały oraz maszyn ładujących urobek. Zbyt wysokie piętra w stosunku do wielkości tych maszyn stwarzają zagrożenie wypadkowe.

Podstawową zasadą poprawnego urabiania jest równoległe usytuowanie otworów w stosunku do powierzchni odsłonięcia, gdyż zapewnia to najlepsze wykorzystanie energii ładunku MW. Z tego względu wierce się otwory pionowe lub lekko odchylone od pionu. Pionowe otwory wierce się rzadko i tylko w przypadku wystąpienia szczególnych potrzeb, ponieważ stosowanie ich ma szereg wad związanych z efektywnością działania ładunków i bezpieczeństwem robót (przy wysokich piętrach wiercenie otworów, ładowanie MW, zbrojenie ładunków i wykonywanie sieci bezpośrednio pod ociosem jest dla wykonujących bardzo niebezpieczne) (Onderka 1992).

Parametry geometryczne do robót metodą długich otworów przedstawiono na rysunku 2.4:

- $H$  – wysokość piętra,
- $d$  – średnica otworu strzałowego,
- $z$  – zabiór,
- $a$  – odległość między otworami,
- $b$  – odległość między szeregami
- $l$  – długość otworu strzałowego,
- $l_w$  – długość przewiertu,
- $l_p$  – długość przebitki,
- $l_{MW}$  – długość MW,
- $\alpha$  – kąt odchylenia otworu od pionu.





**Rys. 2.5. Przykładowy sejsmogram drgań wzbudzanych robotami strzałowymi w kopalni odkrywkowej**

Analizując ten sejsmogram można zauważyć wyraźne obniżenie poziomu zarejestrowanych drgań na obiekcie. Drgania zostały wytłumione przy przejściu z podłoża na fundament obiektu, co widać na zapisie drgań składowych poziomych. Na składowej pionowej nastąpiło tylko niewielkie tłumienie.

## 2.3. Roboty inżynierskie z użyciem MW

Roboty strzałowe oprócz wykorzystania w górnictwie znalazły również szereg zastosowań w przemyśle, z czego najszerzy zakres obejmuje roboty inżynierskie (wyburzeniowe z użyciem MW i roboty niwelacyjne).

Technologia likwidacji obiektów z użyciem MW związana jest ściśle ze znajomością mechaniki i wytrzymałości materiałów, ponieważ użycie MW ma za zadanie naruszenie konstrukcji obiektu, a tym samym jego stateczności, co w konsekwencji powoduje jego destrukcję z wykorzystaniem naturalnej siły ciężkości. Technologia likwidacji obiektów z użyciem MW jest zawsze indywidualna dla każdego przypadku, ponieważ nigdy nie ma dwóch takich

samych obiektów znajdujących się w identycznych warunkach lokalnych. Szczegółowe zasady likwidacji poszczególnych rodzajów obiektów można znaleźć w literaturze (Lewicki *at al.* 2003, Lewicki 2004, Maciąg *at al.* 2009).

W Polsce w zasadzie nie prowadzi się kompleksowych i długotrwałych badań w zakresie wpływu robót strzałowych wyburzeniowych na otoczenie — w ograniczonym zakresie (do danego zadania) badania takie prowadzi Akademia Górniczo - Hutnicza. Ideę ochrony otoczenia przed skutkami robót wyburzeniowych sformułowano w AGH w latach osiemdziesiątych i rozwijano w latach dziewięćdziesiątych. Dzięki temu, aktualnie przystępując do wyburzenia określonego obiektu, ocenia się wpływ robót wyburzeniowych na otoczenie, a technologię robót wyburzeniowych podporządkowuje się bezpieczeństwu otoczenia. Zmuszało to do poszukiwania odpowiednich narzędzi pozwalających na prawidłowe prognozowanie skutków działań wyburzeniowych, w tym głównie przez adaptację pewnych działań i metod zapożyczonych z górnictwa. Ochrona otoczenia wymusiła rozwój takich technologii robót wyburzeniowych, by były one bezpieczne dla otoczenia z uwagi na:

- rozrzut,
- drgania parasejsmiczne,
- upadek dużych mas,
- kierunek padania (precyzję),
- parametry powietrznej fali uderzeniowej.

Tym samym zmienił się kierunek rozwoju: technologię poprawną pod względem wykonawstwa zadania zastąpiła technologia równie skuteczna, ale i bezpieczna dla otoczenia (Lewicki 2004).

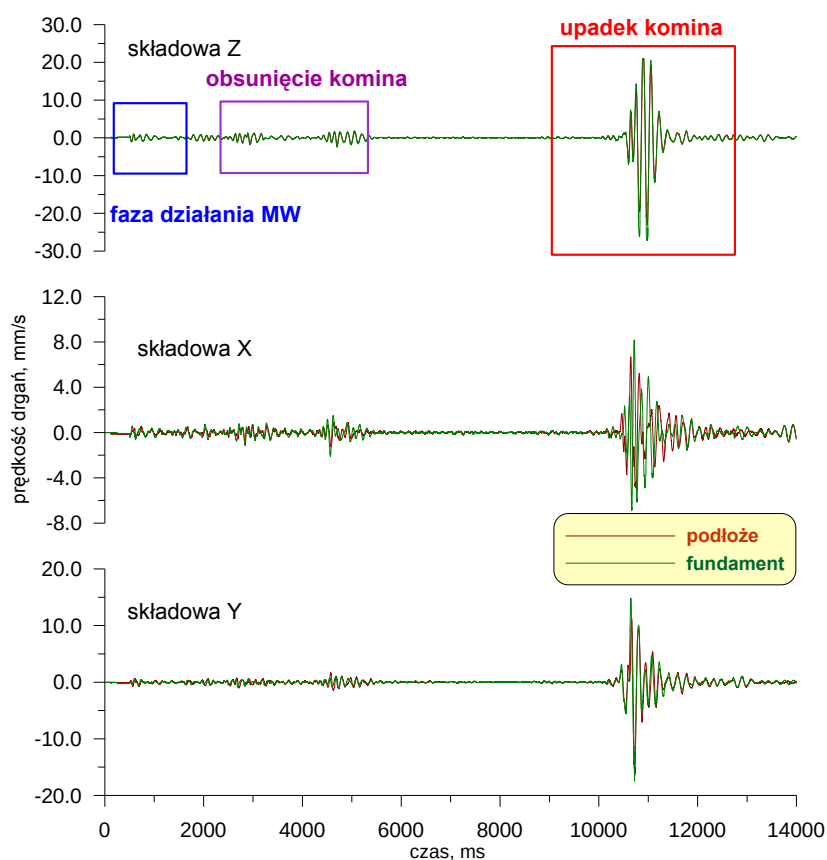
Podczas robót wyburzeniowych występują dwa główne źródła drgań (Lewicki 2004):

- 1) drgania pochodzące od detonacji wielu ładunków MW,
- 2) drgania pochodzące od upadku dużych mas.

Przy likwidacji obiektów (Lewicki *at al.* 2003) wielkoprzestrzennych, o masie nieraz kilkudziesięciu tysięcy ton, występuje swoiste nakładanie się skutków parasejsmicznych, pochodzących od robót strzałowych (detonacji MW) i od upadku dużych mas. Można wówczas wydzielić trzy grupy oddziaływań:

- 1) skutki pochodzące tylko od detonacji MW;
- 2) skutki pochodzące od oddziaływań detonacji MW i upadku mas;
- 3) skutki pochodzące tylko od upadku mas.

W efekcie na sejsmogramach (Rys. 2.6) można wydzielić pewne fragmenty zapisu dotyczące działania MW oraz drgania wzbudzone upadkiem dużych mas.

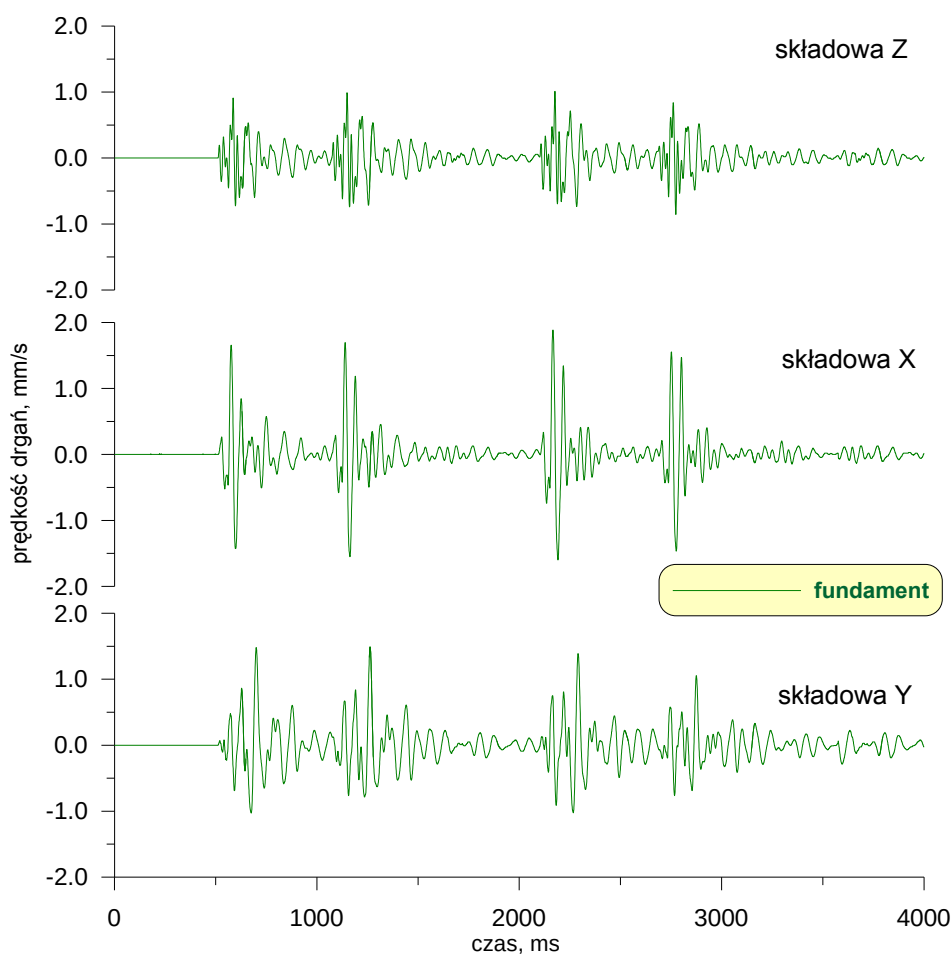


**Rys. 2.6. Przykładowy sejsmogram drgań – wyburzenie komina żelbetowego**

Z rysunku 2.6 wyraźnie widać, że poziom rejestrowanych drgań wzbudzonych użyciem MW jest znacznie mniejszy od drgań wzbudzonych upadkiem dużej masy, a zastosowane opóźnienie w ogóle nie ma wpływu na poziom rejestrowanych drgań. W przypadku robót wyburzeniowych opóźnienia międzystrzałowe służą do kontroli kolejności odpalania poszczególnych ładunków, a tym samym wpływają na kierunek obalania. Nasuwa się zatem stwierdzenie, że zastosowane opóźnienie milisekundowe w tego typu pracach ma znikome znaczenie dla intensywności wzbudzanych drgań. Poważniejsze zagrożenie stanowi masa obalanej konstrukcji (Maciąg *et al.* 2009).

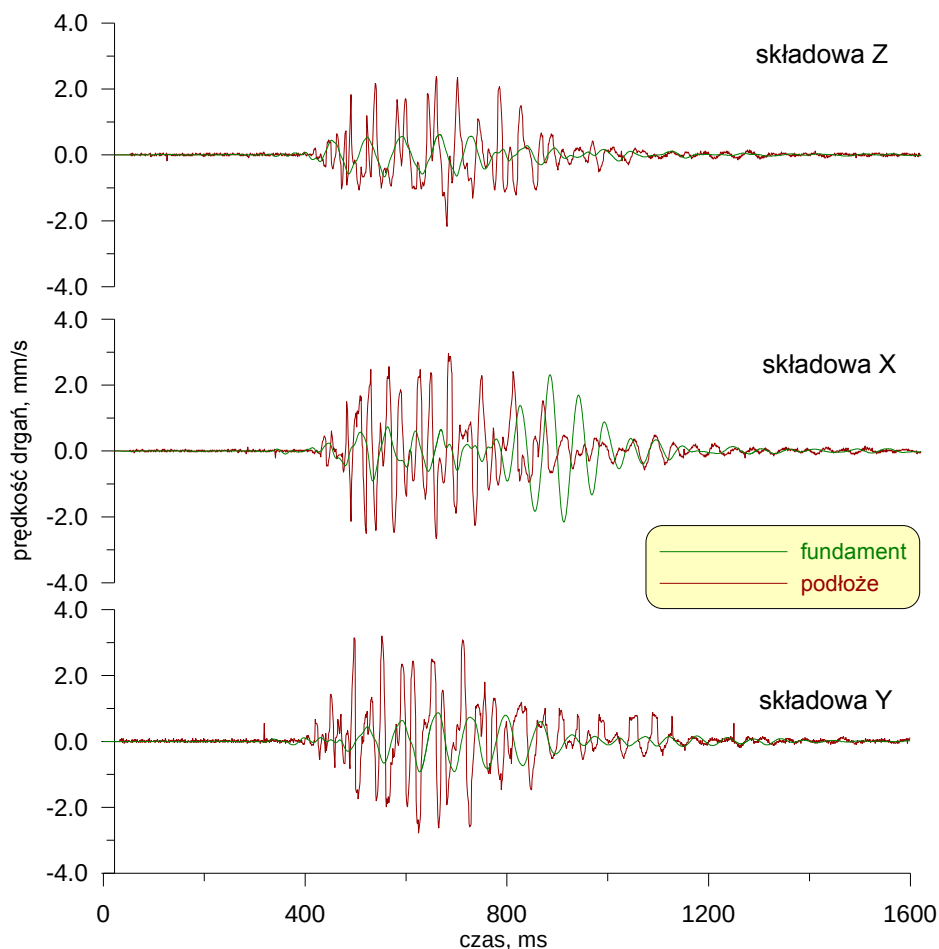
Prace makroniwelacyjne mają swój charakter bardzo zbliżony do prowadzenia robót strzałowych w kopalniach odkrywkowych. Roboty strzałowe prowadzone są najczęściej metodą krótkich otworów, jednak zdarzają się przypadki gdzie wysokość urabianego piętra przekracza 6 metrów. W praktyce jednak unika się tak wysokich pięter ponieważ niesie to ze sobą

konieczność stosowania większych ładunków w otworach. Masa używanych ładunków MW jest znacznie ograniczona z uwagi na fakt, że zazwyczaj w bezpośrednim sąsiedztwie (niekiedy kilka lub kilkanaście metrów) znajdują się obiekty chronione. W celu ograniczenia masy odpalanego ładunku MW używa się opóźnienia półsekundowego (Rys. 2.7), ale również opóźnienia milisekundowego (Rys. 2.8).



**Rys. 2.7. Przykładowy sejsmogram drgań zarejestrowanych podczas prac makroniwelacyjnych – odpalenie półsekundowe**





**Rys. 2.8. Przykładowy sejsmogram drgań zarejestrowanych podczas prac makroniwelacyjnych – odpalenie milisekundowe 75 ms**

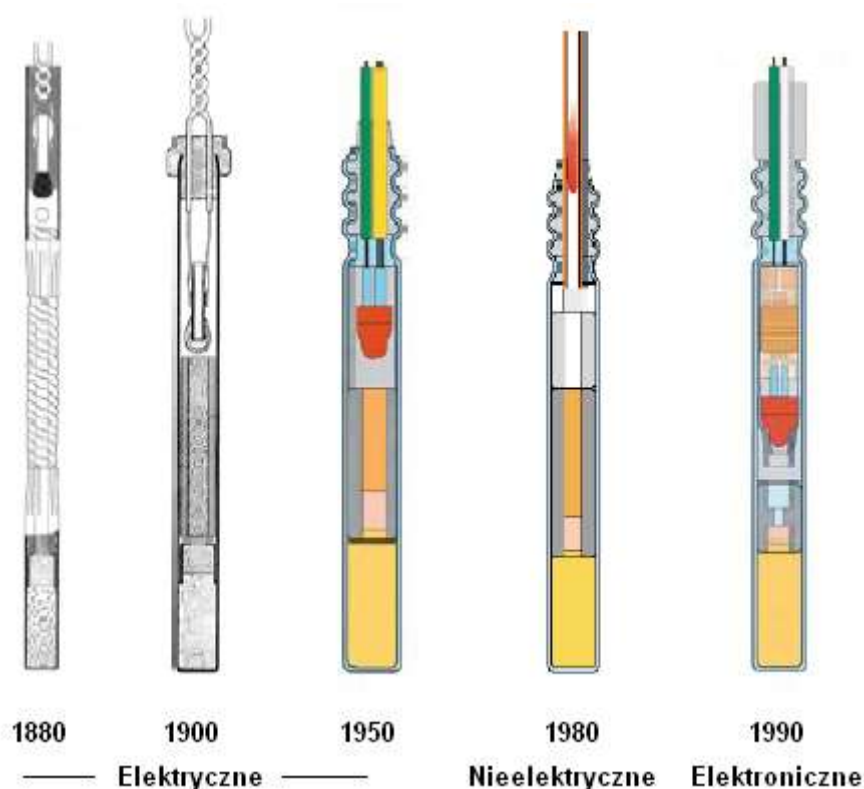
Rysunki 2.7 i 2.8 przedstawiają przykładowe sejsmogramy drgań zarejestrowanych podczas wykonywania prac niwelacyjnych pod budowę kanalizacji. Sejsmometry były przy mocowane w podłożu i na fundamencie obiektu znajdującego się najbliżej miejsca wykonywania robót strzałowych. Do inicjacji ładunków umieszczonych w krótkich otworach (około 3 m) użyto zapalników elektrycznych półsekundowych i milisekundowych. Z rysunku 2.7 wynika wyraźnie, że poziom rejestrowanych drgań od poszczególnych ładunków różni się od siebie. Nie ma współpracy między poszczególnymi otworami, a precyzja zadawania opóźnienia jest bardzo mała – zróżnicowane są odległości czasowe pomiędzy poszczególnymi wejściami sygnału.

W związku z dużym podobieństwem prowadzenia tego typu prac do robót strzałowych w górnictwie odkrywkowym problem wpływu opóźnienia milisekundowego na spektrum odpowiedzi drgań, zostanie dla tego typu robót pominięty i nie będzie stanowił problematyki niniejszej pracy.

## 2.4. Odpalanie milisekundowe w górnictwie odkrywkowym

Opóźnienie międzystrzałowe umożliwia kontrolę nad efektami robót strzałowych czyli rozdrobnieniem urobku, jego prawidłowym usypem oraz intensywnością drgań parasejsmicznych. Zbyt małe opóźnienie zastosowane pomiędzy poszczególnymi ładunkami może zadziałać jak odpalanie natychmiastowe serii otworów. Spowoduje to ograniczone wytworzenie się dodatkowych powierzchni odsłonięcia i wzrost intensywności drgań, ale za to lepsze rozdrobnienie urobku. Za duże opóźnienie powoduje dobre wykształcenie się powierzchni odsłonięcia, nie do końca kontrolowany efekt sejsmiczny (może w niektórych przypadkach dojść do wzmocnienia drgań), niezadawalające rozdrobnienie urobku (brak współdziałania ze sobą sąsiadujących ładunków w otworach), a także w niektórych przypadkach pogorszenie stanu ociosu (Onderka 2001).

Precyzyjne zadanie opóźnienia międzystrzałowego jest kluczowe dla minimalizacji intensywności drgań wzbudzanych robotami strzałowymi. Dlatego też na przełomie lat zmieniały się systemy inicjowania, poczynając od elektrycznego, poprzez nieelektryczny aż do ostatnio wdrażanego systemu elektronicznego (Biessikirski 1991, Biessikirski 1996, Reinders i Hammelmann 2004, Sulima Samujłło 1968) (Rys. 2.9).



Rys. 2.9. Rozwój zapalników (Reinders i Hammelmann 2004)

Wszystkie udoskonalenia zmierzały w kierunku uzyskania precyzyjnego opóźnienia z jednoczesnym poszerzeniem możliwości doboru opóźnienia. Bardzo ważnym efektem zmian było również podniesienie bezpieczeństwa wykonywania robót.

Zanim weszły na rynek systemy nieelektryczny i elektroniczny, na szeroką skalę stosowany był system elektryczny. W systemie elektrycznym główną część stanowiły zapalniki, które ze względu na rodzaj (podział ze względu na czas zadziałania) dzieliły się zgodnie z normą PN-C-86017:1994 na:

- *mikrosekundowe* (U) – o czasie zadziałania poniżej 1 ms
- *natychmiastowe* (N) – o czasie zadziałania od 1 do 10 ms
- *milisekundowe* (M) – o znamionowym czasie zadziałania stopnia pierwszego od 11 do 100 ms
- *półsekundowe* (P) – o znamionowym czasie zadziałania stopnia pierwszego 0,5 s.

W górnictwie odkrywkowym stosuje się głównie zapalniki milisekundowe, których znamionowy czas zadziałania zmieniał się na przestrzeni lat i obecnie wynosi 25 ms. W latach 60 ÷ 70 ubiegłego stulecia były stosowane krajowe zapalniki KZnPT-30/70, które składały się z 11 stopni opóźnienia, pierwsze 5 po 30 ms, a pozostałe po 70 ms. W tym samym czasie były dostępne czeskosłowackie zapalniki Dem-Cu zawierające np. 22 zapalniki w serii (0÷21) z opóźnieniem międzystrzałowym 23 ms dla 18 pierwszych zapalników i 30 ms dla pozostałych (Gliński 1969a).

Wprowadzenie systemu nieelektrycznego rozszerzyło gamę stosowanych opóźnień przez zastosowanie powierzchniowych opóźniaczy zwanych konektorami, a zastosowanie systemu elektronicznego umożliwiło dobór opóźnienia z zakresu od 0 do 15 000 ms z krokiem co 1 ms. Zatem istnieje możliwość zastosowania praktycznie dowolnego opóźnienia. Można, znaleźć prace (Rorke 2007) w których autorzy zwracają uwagę na konieczność zastosowania bardziej precyzyjnych opóźnień i postulują większą swobodę w doborze opóźnienia.

#### **2.4.1. System inicjowania elektrycznego**

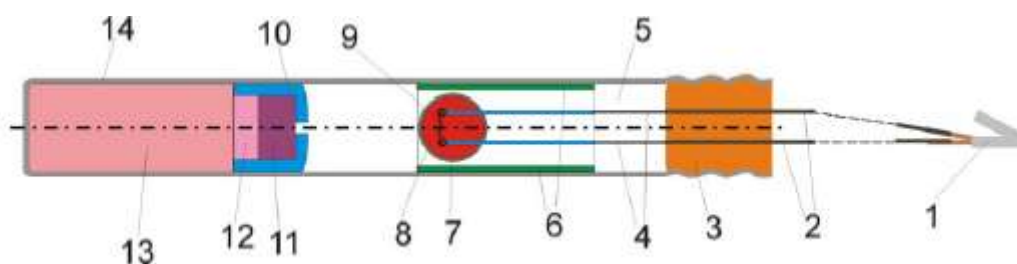
Odkąd w Stanach Zjednoczonych zaczęto produkować pierwsze zapalniki elektryczne od razu stały się one bardzo popularne i są stosowane masowo do robót strzałowych przemysłowych i inżynierskich.

W Polsce produkowane są zapalniki elektryczne skalne, węglowe i metanowe z opóźnieniem czasowym 25 ms. W zależności od producenta, liczba stopni kolejnych opóźnień wynosi najczęściej  $12 \div 20$ , a na specjalne życzenie odbiorcy może dochodzić do 30 stopni opóźnień.

System elektryczny inicjowania ładunków MW składa się z trzech podstawowych elementów:

- zapalnika elektrycznego,
- przewodów strzałowych,
- źródła prądu.

*Zapalnik elektryczny* – składa się z dwóch części: zapalczej i spłonkowej. Prąd elektryczny przepływający przez cienki drucik żarowy, ogrzewa go w wyniku czego następuje zapłon niewielkiej ilości specjalnej masy palnej, która spalając się wytwarza płomień inicjujący część spłonkową zapalnika; a następnie ta inicjuje zasadniczy ładunek MW, umieszczony w zapalniku (Rys. 2.10).



1 – szybkozłącze, 2 – przewody stalowe ocynkowane lub miedziane izolowane, 3 – trudnopalny korek gumowy uszczelniający, 4 – przewody odizolowane, 5 – komora powietrza, 6 – osłonka izolowana, 7 – główka zapalczą, 8 – masa palna, 9 – mostek żarowy, 10 – czapeczka z otworkiem, 11 – ładunek pierwotny, 12 – ładunek pośredni (podsypka pentrytowa), 13 – ładunek wtórny, 14 – łuska miedziana, aluminiowa lub cynkowa

**Rys. 2.10. Budowa zapalnika elektrycznego**

*Przewody strzałowe* – są to stalowe lub miedziane izolowane przewody o zadanej oporności służące do łączenia zapalarki z siecią zapalników.

*Zapalarka elektryczna* – to urządzenia służące do odpalania zapalników elektrycznych. Są źródłami krótkiego impulsu elektrycznego dużej mocy.

Do najważniejszych zalet systemu elektrycznego należą:

- możliwości sprawdzenia poprawności połączenia sieci strzałowej z jednego miejsca za pomocą przyrządu pomiarowego,
- prostota sieci strzałowej.

Najważniejsze wady systemu elektrycznego to:

- zawodność elementów elektrycznych zapalnika,
- brak odporności na prądy błądzące i elektryczność statyczną,

- niska precyzja opóźnień,
- ograniczona ilość stopni opóźnień.

Niektóre wady systemu elektrycznego, takie jak mała dokładność opóźnień i ograniczona ich ilość, starano się wyeliminować stosując jako źródło odpalania zapalarki milisekundowe. W połowie lat siedemdziesiątych, w Zakładzie Techniki Strzelniczej Instytutu Górnictwa Odkrywkowego AGH, prowadzone były prace nad konstrukcją zapalarki milisekundowej. Efektem prac był prototypowy egzemplarz zapalarki ZT-480t (Biessikirski 1991), na bazie którego zebrano doświadczenia praktyczne. Zupełnie nowa konstrukcja to zapalarka Explo 201 dla zakładów górniczych. Jest to zapalarka która umożliwia odpalenia nawet do 60 zapalników (zależne od klasy zapalnika, rodzaju i długości przewodów zapalnika) z opóźnieniem  $0 \div 99$  ms co 1 ms (Rys. 2.11) (Biessikirski 1996).



Rys. 2.11. Zapalarka milisekundowa EXPLO-201 (Biessikirski 1996)

#### 2.4.2. System inicjowania nieelektrycznego

Pierwszy nieelektryczny system inicjowania został wprowadzony na rynek w roku 1973 przez firmę NITRO Nobel i nosił nazwę *NONEL* (Biessikirski *at al.* 2001, Poradnik Nonel 2001, Poradnik Nonel 2003, Oloffson 1990). Podstawowym elementem tego systemu był przewód sygnałowy, mający postać rurki plastikowej wypełnionej substancją reaktywną o prędkości transmisji fali uderowej wynoszącej około 2100 m/s, co daje opóźnienie rzędu 0,5 ms/m bieżący. Dzięki zamknięciu reakcji detonacji w rurce system ten uzyskał przewagę nad systemem inicjowania lontem detonującym, w którym reakcja detonacji jest otwarta. Powoduje to powstawanie niepożądanych zjawisk takich jak: powietrzna fala uderzeniowa i efekt dźwiękowy.

Firma NITRO Nobel opracowała trzy różne systemy oparte na technologii *NONEL* (Poradnik Nonel 2001, Poradnik Nonel 2003):

- *NONEL MS* – oparty na tradycyjnym systemie elektrycznym, o 25 milisekundowych interwałach czasowych między poszczególnymi numerami opóźnienia (zaczyna się od numeru opóźnienia 3, a kończy na 20) Inicjacji dokonuje się na powierzchni przy użyciu łączników natychmiastowych, a opóźnienie zadawane jest przez element opóźniający w zapalniku.
- *NONEL LP* – systemem inicjowania przeznaczonym do robót strzałowych prowadzonych pod ziemią, gdzie są wymagane duże opóźnienia dla odpowiedniego urobienia i wyrzutu odspojonej skały z przodka. Zapalniki mają numery od 0 do 60 i mieszczą się w przedziale od 25 ms do 6000 ms, przy czym wzrost opóźnienia nie jest jednostajny (25, 100, 200, ..., 1000, 1110, 1235, ... 5500, 6000 ms).
- *NONEL UNIDET* – wszystkie zapalniki w sieci mają takie same opóźnienie, a sekwencja inicjowania jest wyznaczana na powierzchni za pomocą łączników opóźniających (Onderka i Winzer 2001).

Specyfikacja robót strzałowych prowadzonych w górnictwie odkrywkowym powoduje, że systemem najchętniej stosowanym jest *NONEL UNIDET*, w skład którego wchodzi:

- zapalniki Unidet,
- łączniki powierzchniowe Snapline,
- linia Dynoline
- zapalarka DynoStart (Rys. 2.12).



Rys. 2.12. Elementy systemu inicjacji *NONEL UNIDET* (Poradnik Nonel 2003)



*Zapalnik Unidet* – zapalnik typu NPED (ang. *Non Primary Explosive Detonator*) nie zawiera pierwotnego materiału wybuchowego (np. azydku ołowiu). W połączeniu z kształtką trotylową, heksogenowo – trotylową lub innym MW w naboju, stanowi nabój udarowy, który rozpoczyna reakcję detonacji ładunku MW umieszczonego w otworze strzałowym. Zapalniki są produkowane z opóźnieniami 400, 425, 450, 475 i 500 ms).

*Łącznik powierzchniowy (konektory) Snapline lub Eclip*– zapalnik umieszczony w specjalnej kształtce z tworzywa sztucznego umożliwiającej podłączenie, w zależności od typu, do 5 lub do 8 rurek *Dynoline* od innych zapalników lub konektorów, które są inicjowane w obu kierunkach (Rys. 2.13).

| Opóźnienie ms | Kolor łącznika |
|---------------|----------------|
| 0/2           | Zielony        |
| 9             | Fioletowy      |
| 17            | Żółty          |
| 25            | Czerwony       |
| 4             | Biały          |
| 67            | Niebieski      |
| 109           | Czarny         |
| 176           | Pomarańczowy   |
| 285           | brązowy        |



Rys. 2.13. Łączniki powierzchniowe Eclip (Poradnik Nonel 2003)

*Linia Dynoline* – rurka składa się z 3 warstw wykonanych w taki sposób, że jest ona odporna na obciążenie wzdłużne, osiowe i na zamakanie. Przewód typu *Nonel*, pomimo zawartości niewielkiej ilości MW (około 20 mg pentrytu na metr bieżący rurki), jest niewrażliwy na uderzenia, działanie termiczne i tarcie, a zachodząca w nim reakcja przewodzenia fali udarowej, ze względu na swoją niską energię, nie powoduje żadnego zagrożenia dla człowieka i otoczenia.

*Zapalarka DynoStart* – jest zapalarką iskrową wysokiej temperatury rozpoczynającej detonację MW nasyconego w rurce *Dynoline* (Poradnik Nonel 2001, Poradnik Nonel 2003).

Obecnie na rynku jest kilka systemów inicjowania nieelektrycznego, które są wykonywane na bazie systemu *NONEL*. Należą do nich między innymi systemy produkowane przez:

- czeską firmę Austin – *Indetshock*,
- polską firmę Nitroerg – *NITRONEL*,

- francuską firmę EPC GROUP – *Euronel*,
- amerykańską firmę Davey Bickford – *Daveynel*,
- australijską firmę Orica Mining Service – *Exel*.

Do zalet systemu *NONEL* należą:

- całkowita odporność na prądy błędzące i elektryczność statyczną,
- brak pierwotnego materiału wybuchowego w zapalnikach typu *NPED*,
- łatwe i szybkie łączenie sieci,
- wysoka precyzja opóźnień,
- duży wybór stopni opóźnień czasowych, a przy odpalaniu milisekundowym możliwość doboru dowolnego opóźnienia,
- możliwość budowania dowolnych sieci strzałowych,
- brak ograniczeń wynikających z określonej ilości opóźnień.

Wady systemu nieelektrycznego to:

- brak możliwości sprawdzenia poprawności połączenia sieci strzałowej z jednego miejsca za pomocą przyrządu pomiarowego – połączenia można sprawdzić jedynie wizualnie i manualnie,
- rurki *Nonel* są jednorazowego użytku, dlatego zachodzi konieczność utylizowania odpadów.

#### **2.4.3. System inicjowania elektronicznego**

Na świecie coraz większą popularność zdobywają systemy elektroniczne, które zbudowane zostały w wyniku współpracy firmy Orica i Dynamit-Nobel (Münczer *at al.* 2000, Pietkiewicz *at al.* 2007). W Polsce, system inicjowania elektronicznego *i-kon* po raz pierwszy został zademonstrowany na pokazie zorganizowanym przez Stowarzyszenie Polskich Inżynierów Strzałowych oraz firmę Orica Poland w dniu 14 czerwca 2008 roku, w Centralnym Laboratorium Techniki Strzelniczej i Materiałów Wybuchowych AGH w Regulicach.

Elementami składowymi systemu *i-kon* przeznaczonego do używania wszędzie tam, gdzie nie ma zagrożenia wybuchem pyłu węglowego i mieszaniny powietrza z metanem są (Cichoń *at al.* 2007, Lovitt i Degas 2003, Mat. Rek. Orica 2007):

- *i-kon Logger* – poręczne urządzenie logujące i testujące z wbudowaną pamięcią, służy do programowania zapalników (do 200) nadając opóźnienie z zakresu od 0 do 15 000 ms z interwałem czasowym co 1 ms (Rys. 2.14),



- zapalarki *Blaste 400* i *Blaster 2400S* – to ręczne urządzenia przeznaczone do cyfrowego inicjowania zapalników *i-kon*. Pierwsza z nich obsługuje 2 Loggery i może odpalić 400 zapalników, druga zaś obsługuje 12 Loggerów i może odpalić 2400 zapalników (Rys. 2.15),

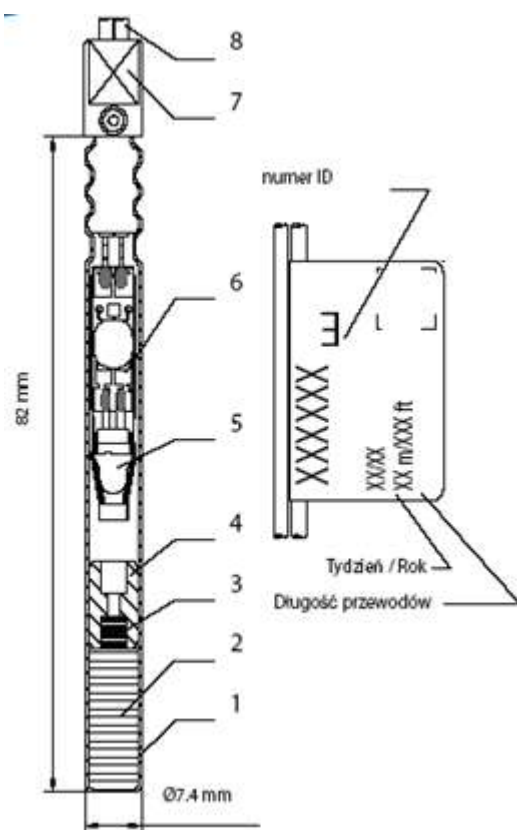


Rys. 2.14. Urządzenie logujące - *i-kon Logger* (Mat. Rek. Orica 2007)



Rys. 2.15. Zapalarka *Blaster 400* (Mat. Rek. Orica 2007)

- zapalnik elektroniczny *i-kon* – jest w pełni programowalny, posiadający wbudowany cyfrowy układ czasowy oraz przechowujący energię. Umożliwia to niezależne działanie w momencie, gdy zostanie przesłany sygnał inicjujący (Rys. 2.16). Do połączenia zapalników w sieć używane są przewody obwodowe,
- przewody obwodowe – miedziane przewody o przekroju 0,6 mm na szpulach o długości 200 i 400 m.



Części składowe:

1. łuska,
2. ładunek wtórny,
3. ładunek pierwotny,
4. tulejka ładunku pierwotnego,
5. główka zapalcza,
6. układ scalony z elektronicznym chipem,
7. uszczelka,
8. przewody zapalnika

Rys. 2.16. przekrój przez zapalnik *i-kon* (Mat. Rek. Orica 2007)

Oprogramowanie komputerowe *SHOTPlus-i* wspomaga projektowanie sekwencji opóźnień systemu inicjacji *i-kon*. Umożliwia w prosty i konwencjonalny sposób projektowanie, analizę i optymalizowanie robót strzałowych przy użyciu zapalników *i-kon*. Pozwala przesyłać dane do Loggera integrując proces projektowania planu inicjacji.

Odpalanie ładunków MW z zastosowaniem systemu *i-kon* może odbywać się dwoma sposobami: pierwszy zalecany do większych ilości ładunków MW, rozmieszczonych w sposób niekonwencjonalny, polega na zaprojektowaniu całej serii strzałowej komputerowo celem uniknięcia pomyłki. Drugi, stosowany w górnictwie odkrywkowym przy nieskomplikowanych siatkach otworów, polega na zaprogramowaniu zapalników bezpośrednio na miejscu wykonywania robót strzałowych.

Zapalniki programuje się przy pomocy Loggera, do którego pamięci wprowadzane są numery identyfikacyjne podłączanych zapalników i przypisywane im opóźnienia. Logger nie posiada zaprogramowanej zdolności tworzenia planu inicjacji, uzbrajania zapalników oraz wysyłania sygnału inicjacji, dzięki czemu nie jest w stanie przypadkowo zainicjować zapalników. W celu odpalenia serii podłącza się jedną z zapalarek, która komunikuje się z Loggerami, z ich wykorzystaniem ładuje kondensatory zapalników i wprowadza do ich pamięci opóźnie-

nie (programowanie zapalników). Zapalarka wysyła prąd odpalenia, kod (klucz cyfrowy), który umożliwia zainicjowanie zapalników (Cichoń *et al.* 2007).

W Polsce oprócz systemu *i-kon Electronic Detonators*, jest również dostępny system firmy Nitroerg – *NITRONIC* (Sobala 2007) oraz systemy *HotShot*, produkowane przez firmę DetNet i dostępny za pośrednictwem firmy EPC Polska. Ponadto na świecie dostępnych jest wiele odmian elektronicznych systemów inicjacji np.: *A\*Star*, *DigiShot*, *SmartShot*, *QuickShot*, *UniTronic*, *eDev*, *Deveytronic*.

Do zalet systemu elektronicznego należą:

- odporność na prądy błędzące i elektryczność statyczną,
- łatwe i szybkie łączenie sieci,
- wysoka precyzja opóźnień,
- nieograniczona ilość stopni opóźnień,
- możliwość zdalnego odpalania sieci,
- monitorowanie ciągłości sieci strzałowej podczas procesu zadawania (programowania) opóźnień i bezpośrednio przed odpaleniem,
- możliwość sterowania efektami robót strzałowych,
- możliwość zaprojektowania robót strzałowych komputerowo,
- wysokie bezpieczeństwo zapalników (zapalnik nie zdetonuje bez unikalnego kodu aktywacji, zapalniki posiadają zabezpieczenia przepięciowe, w stanie spoczynku nie posiadają w sobie żadnej energii (Sobala 2007)).

Jedyną wadą systemu elektronicznego jest wysoka cena zapalników.

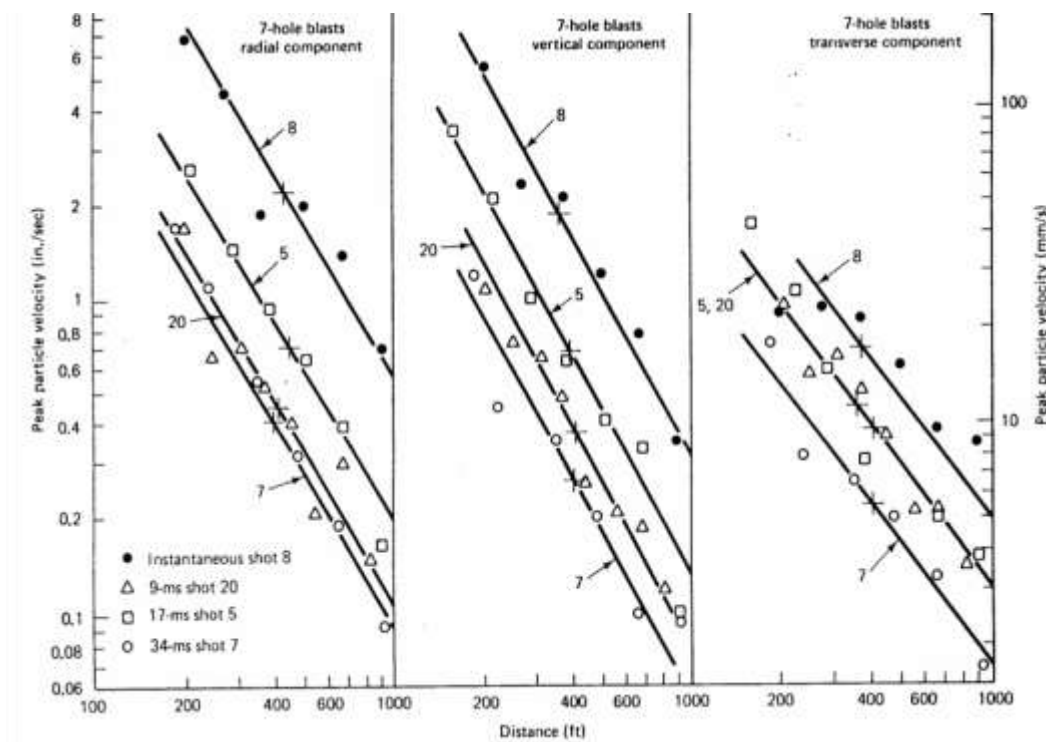
## **2.5. Badania związane z opóźnieniem milisekundowym**

### **2.5.1. Doświadczenia zagraniczne i krajowe**

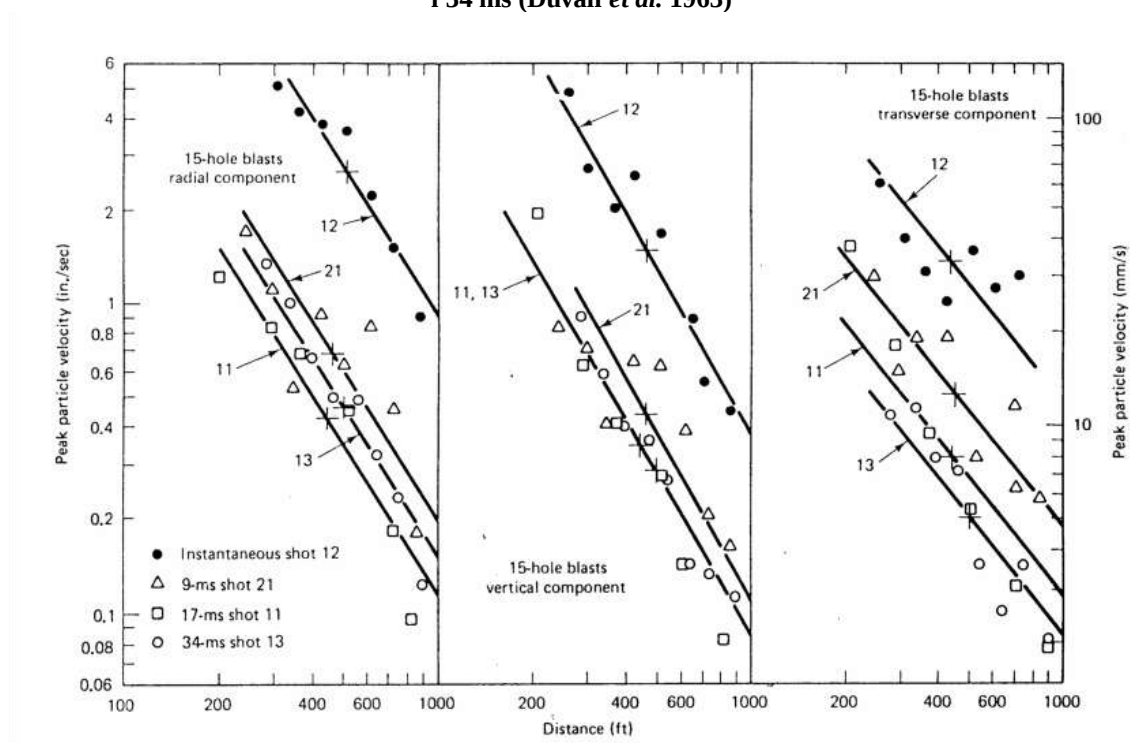
Odkąd pojawiła się możliwość zmiany opóźnienia między ładunkami odpalanymi w poszczególnych otworach, zaczęto badać wpływ wielkości czasu pomiędzy ładunkami na efekt robót strzałowych. Już w latach 1940 ÷ 1950, w wyniku badań prowadzonych w Stanach Zjednoczonych, uznano odpalenie milisekundowe za technikę wykonywania robót strzałowych zmniejszającą drgania oraz pozwalające na uzyskanie urobku o pożądanym rozdrobnieniu (Duvall *et al.* 1963, Nicholson *et al.* 1971).

Siskind (2005) o kryterium 8 ms, jako minimalnym czasie pomiędzy ładunkami, dzięki któremu można mówić o odpalaniu milisekundowym. Nadmienia również, że geneza tego

kryterium jest nie do końca zrozumiała i przytacza wyniki badań (Duvall *et al.* 1963), w których używano opóźnień: 0, 9, 17 i 34 ms (Rys.2.17 i 2.18).



Rys. 2.17. Wynik rejestracji intensywności drgań przy odpaleniu 7 otworów z opóźnieniami 0, 9, 17 i 34 ms (Duvall *et al.* 1963)



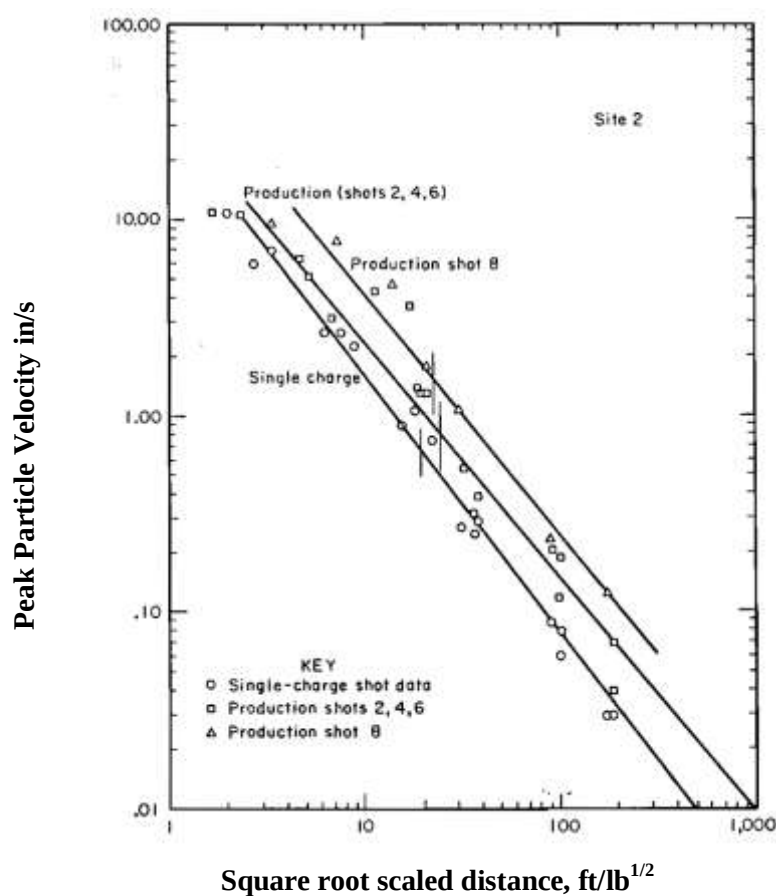
Rys. 2.18. Wynik rejestracji intensywności drgań przy odpaleniu 15 otworów z opóźnieniami 0, 9, 17 i 34 ms (Duvall *et al.* 1963)

peak particle velocity – szczytowa wartość prędkości

distance – odległość

Z rysunków 2.17 i 2.18 jednoznacznie wynika, że przez zastosowanie opóźnień milisekundowego zmniejszył się poziom rejestrowanych drgań i dla serii 7 i 15 otworowej najlepszym opóźnieniem było 34 ms, natomiast dla serii 15 otworowej redukcja rejestrowanych drgań była mniejsza w porównaniu do serii 7 otworowej, co autorzy tłumaczyli zmniejszającą się precyzją zapalników o wyższym numerze opóźnienia.

W pracach (Siskind *at al.* 1987, Siskind *at al.* 1988, Siskind *at al.* 1989) autorzy udowadniają, że kryterium 8 ms, nie we wszystkich przypadkach jest uzasadnione. W podłożu, w którym dominują niskie częstotliwości około 10 Hz, opóźnienie bliskie 8 ms powoduje wzrost intensywności rejestrowanych drgań (Rys. 2.19), a rzeczywiste opóźnienie powinno wynosić około 60 ms.



**Rys. 2.19. Porównanie intensywności drgań od pojedynczego otworu (o) z seriami odpalanymi milisekundowo (□, △) (Siskind *at al.* 1989)**

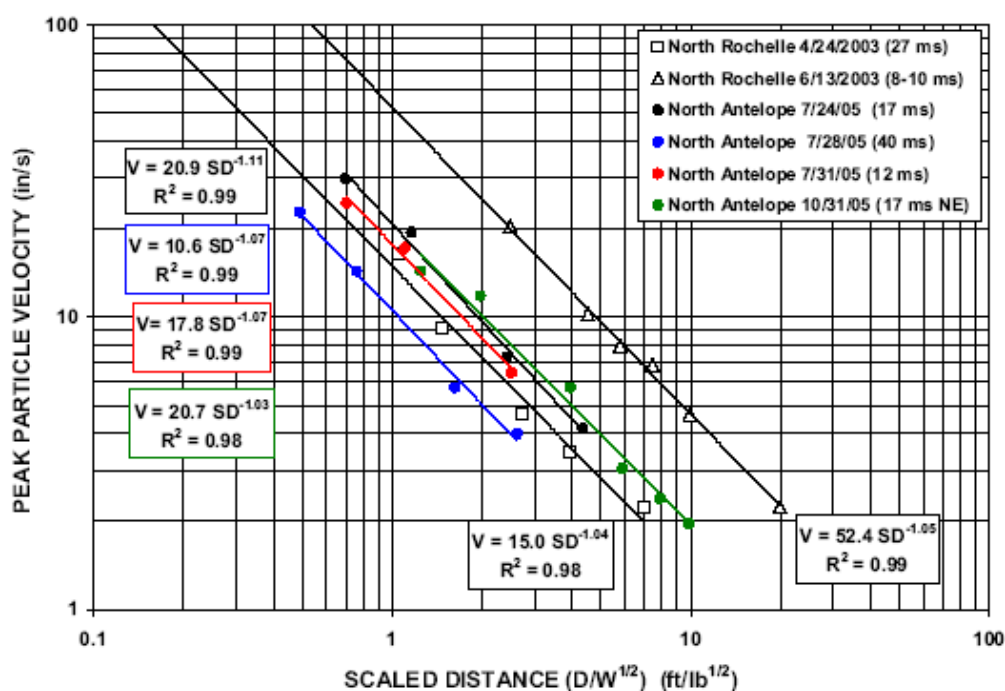
*peak particle velocity – szczytowa wartość prędkości*

*square root scaled distance – pierwiastek kwadratowy odległości skalowanej*

Siskind *at al.* (1989) podają, że opóźnienie powinno estymować w granicach wartości połowy okresu drgań o dominującej częstotliwości, natomiast Siskind (2005), który jest rów-

niez współautorem pracy (Siskind *at al.* 1989) podaje, że opóźnienie nie powinno być mniejsze niż jedna czwarta okresu drgań o dominującej częstotliwości.

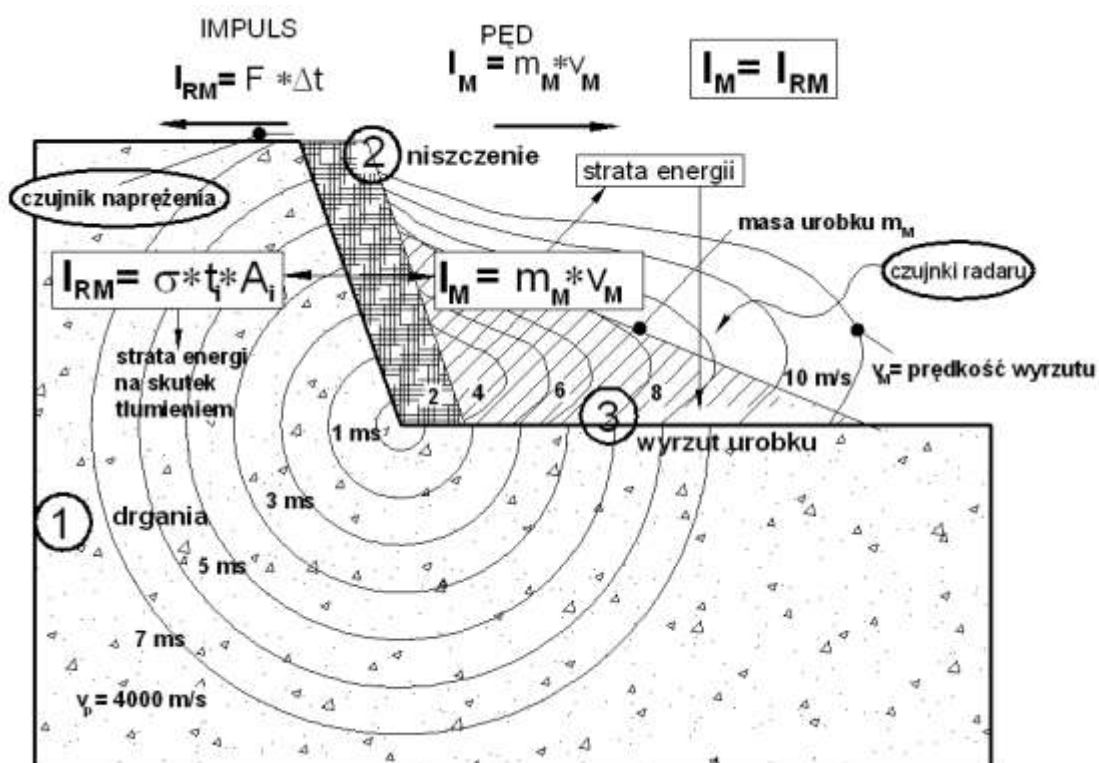
Po wprowadzeniu na rynek światowy systemów nonelektrycznego i elektronicznego, badania nad wpływem opóźnienia były kontynuowane. Dla przykładu Vallejo (2006) pokazuje częściowe wyniki badań, ze swojego projektu badawczego, w którym zajmuje się między innymi tematyką opóźnień (Rys. 2.20).



**Rys. 2.20. Porównanie równań propagacji dla różnych opóźnień (Vallejo 2006)**  
scaled distance – odległość skalowana

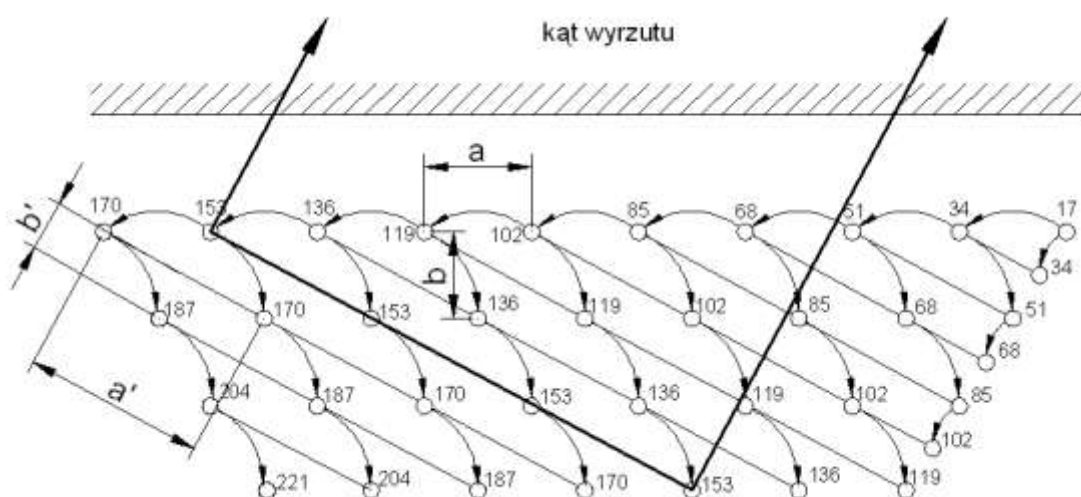
Z rysunku 2.20 wyraźnie widać, że zastosowanie różnych opóźnień milisekundowych, do prowadzenia robót strzałowych w kopalni węgla, wpłynęło na poziom rejestrowanych drgań. Opóźnienie przy którym intensywność drgań była najmniejsza wynosi 40 ms, zadawane systemem elektronicznym. Pewne wątpliwości może budzić, uzyskany przez autora, bardzo wysoki współczynnik korelacji (0,98 lub 0,99), rzadko spotykany w przypadku badań terenowych.

Autorzy prac (Müller i Böhnke 2003, Müller i Böhnke 2005, Müller *at al.* 2007) korzystają z zasady zachowania pędu do optymalizacji doboru opóźnienia milisekundowego. Zgodnie z tą zasadą, dokonuje się pomiaru prędkości wyrzutu masy, z wykorzystaniem Radarów Dopplera, oraz naprężeń wywołanych falą uderzeniową w nienaruszonym masywie skalnym (rys. 2.21). Zgodnie z zasadą zachowania pędu, wywołana wyrzutem rozdrobnionej masy, zmiana pędu musi być równa popędowi siły w czasie.



Rys. 2.21. Uproszczony model teorii pędu (impulsu) (Müller i Böhnke 2003)

Zgodnie z założeniami teorii pędu, w celu lepszej fragmentacji urobku i zmniejszenia intensywności drgań, należy odpalać kilka otworów na jeden stopień opóźnienia i ukierunkowywać działanie impulsu (rys. 2.22)



Rys. 2.22. Przykład schematu inicjowania w serii z czterema szeregami (Müller i Böhnke 2003)

Z rysunku 2.22 wyraźnie widać, że w tym samym czasie odpalane są cztery ładunki umieszczone w osobnych otworach. W warunkach polskich kopalni odkrywkowych mogą wystąpić problemy z prowadzeniem tego typu robót strzałowych. Związane jest to z faktem, że rzadko

się zdarza aby kopalnia miała dopuszczony większy ładunek na stopień opóźnienia niż maksymalny, jaki może być użyty w otworze długim oraz że odpalanie wieloszeregowe nie znajduje zwolenników szczególnie w skałach osadowych.

W wyniku analiz cytowanych powyżej badań, wskazano czynniki jakie należy brać pod uwagę przy wyborze czasu opóźnienia:

- prędkość fali podłużnej w ośrodku skalnym,
- prędkość powstawania spękań w ośrodku skalnym,
- ilość powierzchni odsłonięcia w caliznie,
- orientację powierzchni odsłonięcia względem ruchu masywu skalnego w wyniku detonacji,
- częstotliwość rezonansową ośrodka skalnego,
- cel prowadzonych robót – fragmentacja czy strzelanie wygładzające,

Ogólne zasady stosowania opóźnień milisekundowych z uwzględnieniem powyższych czynników zestawiono w tabeli 2.1.

**Tabela 2.1. Uwagi na temat wyboru czasu opóźnienia pomiędzy ładunkami lub szeregami (Müller i Böhnke 2005)**

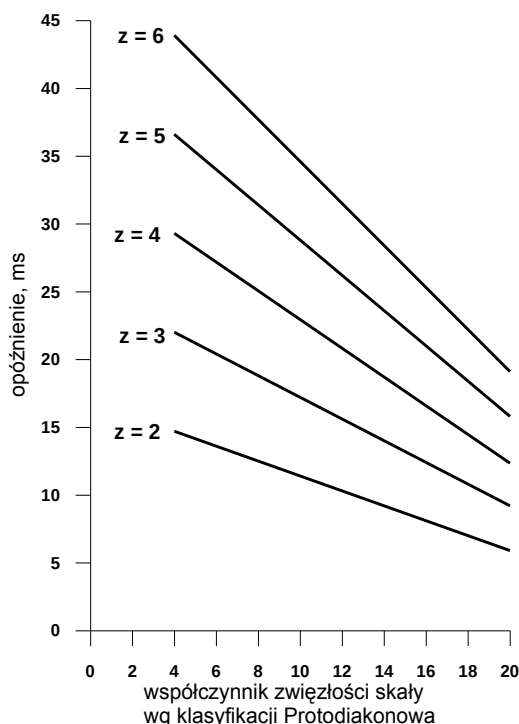
| <b>Natychmiastowe odpalanie lub taki sam czas odpalania pomiędzy otworami w jednym szeregu przy:</b>                                                                                                                                                                                             | <b>&lt;20 ms czas opóźnienia niski pomiędzy poszczególnymi ładunkami lub szeregami przy:</b>                                                                                                                                                                                  | <b>&gt;20 ms czas opóźnienia wysoki pomiędzy poszczególnymi ładunkami lub szeregami przy:</b>                                                                                                                                                                              |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>– strzelaniu wygładzającym w jednym szeregu:</li> <li>a) dobra fragmentacja przy stosowaniu odpalania wieloszeregowego,</li> <li>b) wysoka fragmentacja przy stosowaniu jednoczesnego odpalania ładunków na dole i na górze otworu strzałowego</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>– dużej liczbie ciosów,</li> <li>– wysokiej prędkości fali P,</li> <li>– dużej prędkości pęknięcia, wyznaczenie częstotliwości rezonansowej masy skalnej celem rozpoznania rezonansu (za pomocą zapalników elektronicznych)</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>– małej liczbie ciosów,</li> <li>– małej prędkości fali P,</li> <li>– małej prędkości pęknięcia, wyznaczenie częstotliwości rezonansowej masy skalnej celem rozpoznania rezonansu (za pomocą zapalników elektronicznych)</li> </ul> |

Upowszechnienie elektronicznego systemu inicjacji na świecie zaowocowało licznymi pracami (Bartley *at al.* 2003, Chavez i Chantry 2003, Floyd 2003, Kahriman *at al.* 2009, Migairou 2009), w których autorzy potwierdzają zaletę wyboru dowolnego opóźnienia milisekundowego w tym systemie, a tym samym lepszą kontrolę nad efektami i skutkami robót strzałowych.

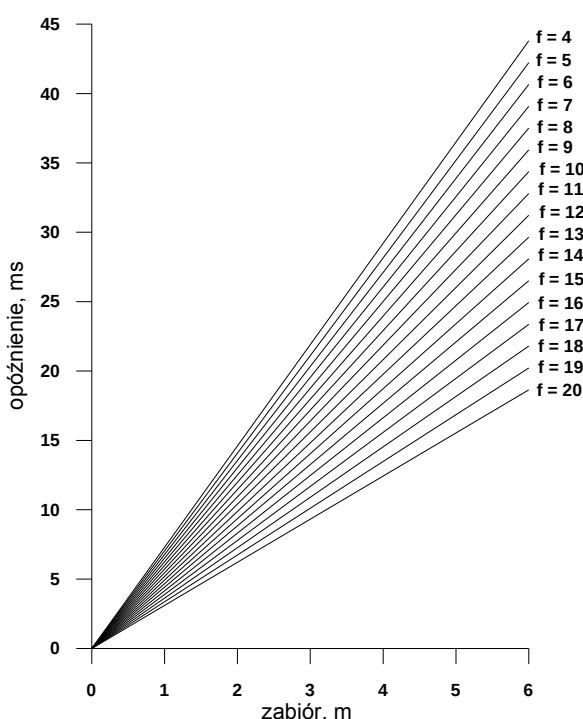
W Polsce również były i są prowadzone badania nad wpływem opóźnienia milisekundowego na wielkość i charakterystykę rejestrowanych drgań. Pierwsze wyniki badań można znaleźć w pracach (Gliński 1969a i b, Gozdowski 1972, Słowik 1969), w których autorzy



zauważają, że czas opóźnienia zależy od szeregu czynników, a następnie podają nomogramy zależności opóźnienia od zabioru  $z$  (Rys. 2.23) i zwięzłości skały  $f$  (Rys. 2.24).



Rys. 2.23. Zależność opóźnienia od zwięzłości skały dla różnych zabiorów (Gliński 1969a)



Rys. 2.24. Zależność opóźnienia od zabioru dla różnych rodzajów zwięzłości skał (Gliński 1969a)

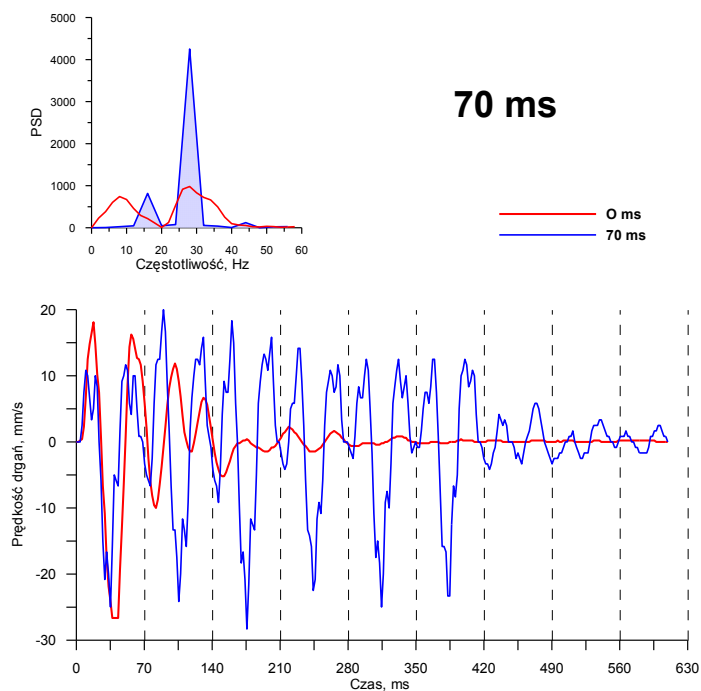
W pracach tych zwrócono szczególnie uwagę na brak możliwości zmiany stopnia opóźnienia w szerszym zakresie niż wielokrotność 25 ms, co wynikało z możliwości technicznych systemu elektrycznego.

W latach 1987 – 1990 były prowadzone prace (Onderka 1990), w kilkunastu kopalniach odkrywkowych różnych surowców, z wykorzystaniem zapalarki milisekundowej *ZT – 480t*, a następnie od roku 1996 zapalarki milisekundowej *EXPLO-201*.

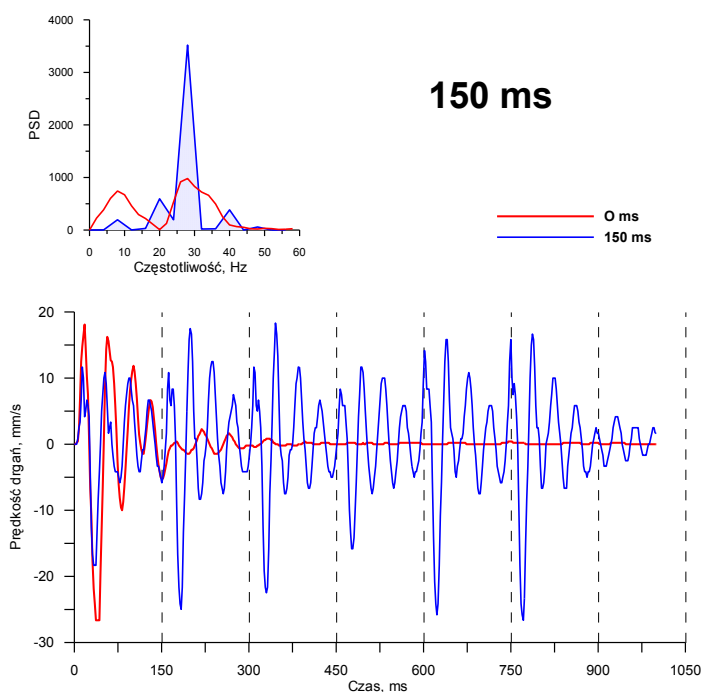
Odpalono kilkanaście serii doświadczalnych przy zachowaniu, w miarę stałych, jak na roboty strzałowe eksploatacyjne, parametrów siatki otworów strzałowych i użytych ładunków MW na stopień opóźnienia i całkowitego w serii. Zmieniane było tylko opóźnienie z przedziału  $0 \div 150$  ms. W wyniku badań, prowadzonych w jednej z kopalń gipsu, z wykorzystaniem zapalarki *ZT – 480t* stwierdzono, że im większe opóźnienie tym mniejsza amplituda drgań, większy czas trwania impulsu, aż do rozgraniczenia pełnego cyklu ruchu drgającego (Rys. 2.20 i 2.21) (Onderka 1990). Podobne stwierdzenie można znaleźć w pracy (Onderka 1998) w której opisano wyniki badań dla złoża wapienia, w których były używane opóźnienia: 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50 i 60 ms. Ze względu na poziom rejestrowanych drgań najko-

rzystniejsze było 60 ms, ale ze względu na pogorszenie stopnia rozdrobnienia urobku pozostano przy opóźnieniu 40 ms.

W przypadku kiedy nie jest możliwe obniżenie intensywności drgań, przez zastosowanie mniejszych czasów opóźnienia, uzyskanych z pojedynczego ładunku MW, można intensywność rejestrowanych drgań utrzymać na poziomie pojedynczego ładunku, przez zastosowanie dużego czasu opóźnienia wydzielającego impuls (Rys. 2.25 i 2.26).



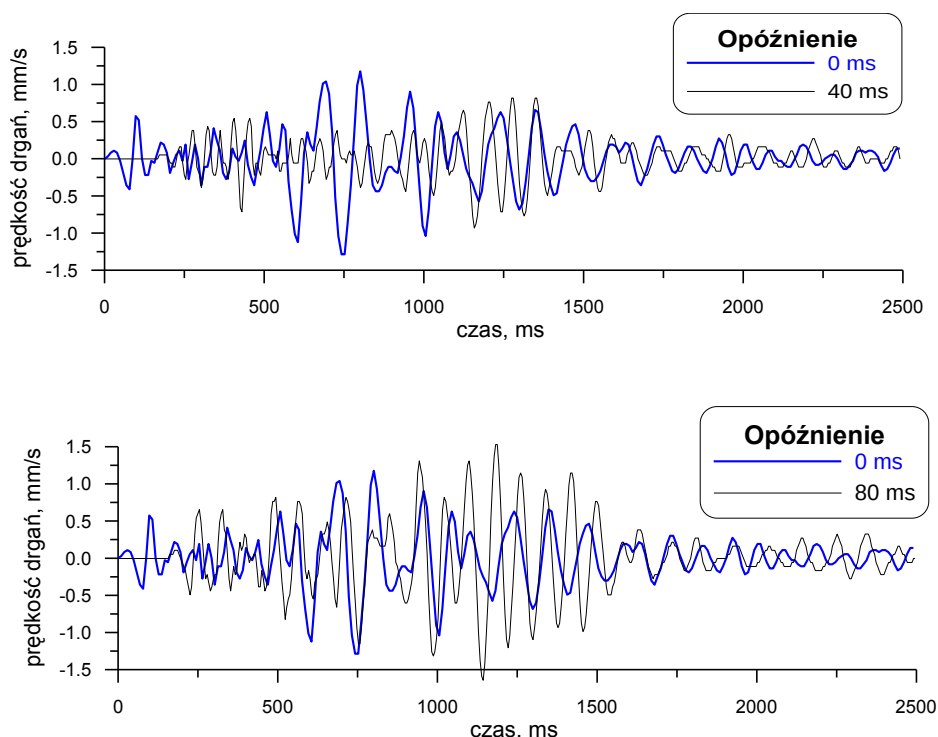
**Rys. 2.25. Częściowe wydzielenie impulsu przy zastosowaniu opóźnienia 70 ms**



**Rys. 2.26. Całkowite wydzielenie impulsu przy zastosowaniu opóźnienia 150 ms**

Z rysunków 2.25 i 2.26 widać, jak impuls zarejestrowany z odpalenia pojedynczego ładunku MW, można częściowo lub w całości wydzielić z sygnału serii 6 otworów odpalanych z opóźnieniami 70 i 150 ms. Jednocześnie widać, że w obu przypadkach struktura częstotliwościowa drgań nie zmieniła się, a częstotliwość dominująca utrzymuje się w granicach 30 Hz.

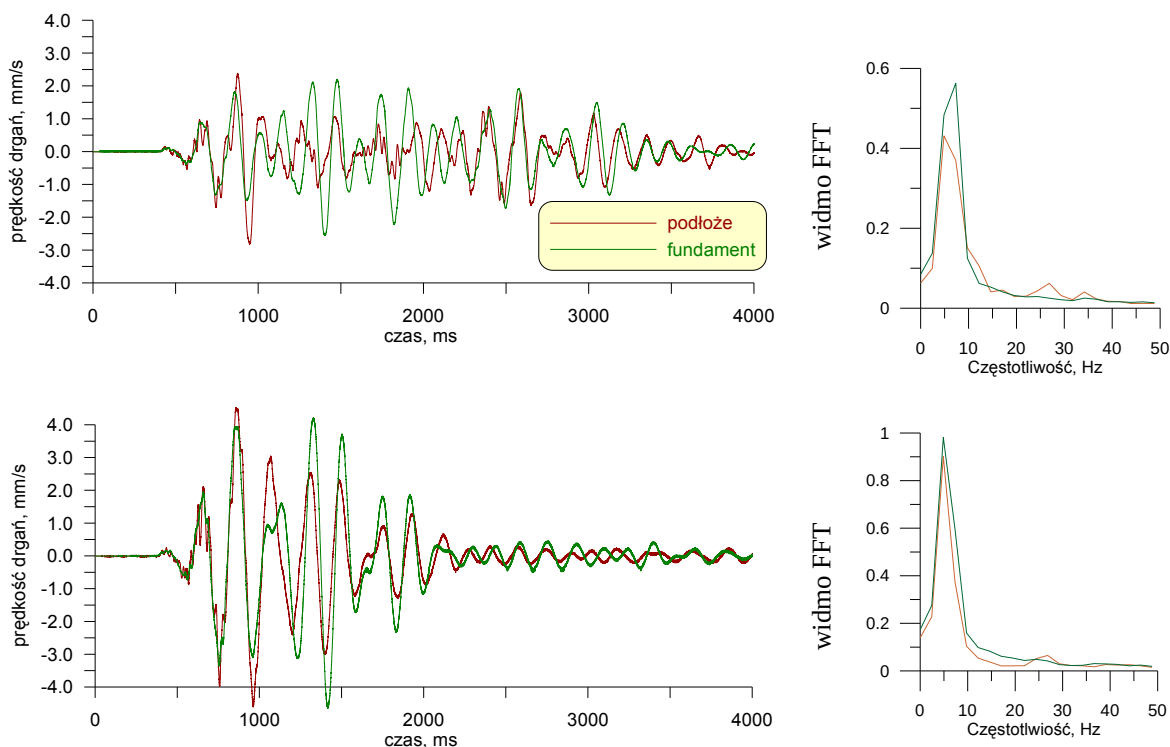
Biessikirski i Winzer (1996) przedstawiają wyniki badań w jednej z kopalń gipsu, na podstawie których stwierdzono, że źle dobrane opóźnienie może spowodować intensyfikację rejestrowanych drgań (Rys. 2.27)



**Rys. 2.27. Porównanie poziomu rejestrowanych drgań od odpalenia pojedynczego ładunku i serii z różnym opóźnieniem (Biessikirski i Winzer 1996)**

Z rysunku 2.27 wynika wyraźnie, że zastosowanie opóźnienia 80 ms spowodowało wzrost poziomu rejestrowanych drgań w porównaniu z poziomem uzyskanym przy odpaleniu pojedynczego ładunku. Dla opóźnienia 40 ms, uzyskany poziom drgań jest mniejszy niż dla pojedynczego otworu. Jednocześnie Biessikirski i Winzer (1996) stwierdzają, że generalnie należy analizować opóźnienia nie większe niż 60 ms, ponieważ do tej wartości można uzyskać drgania mniejsze niż uzyskiwane od pojedynczego otworu.

W pracach (Biessikirski i Winzer 2008, Winzer 2004) autorzy przedstawiają porównanie prędkości drgań rejestrowanych, dla jednej z kopalń dolomitu, od odpalania ładunków z opóźnieniem 500 ms i 25 ms (Rys. 2.28).

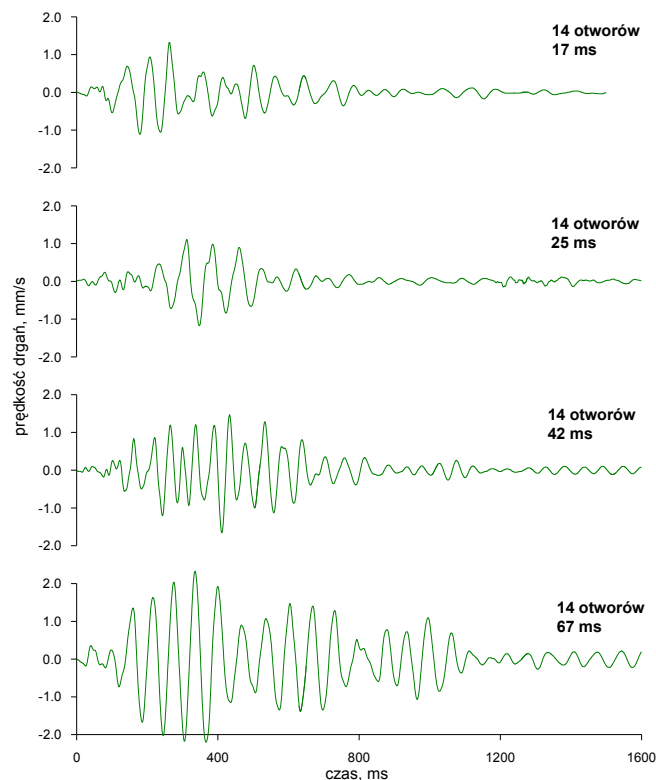


**Rys. 2.28. Porównanie poziom rejestrowanych drgań od odpalenia serii ładunków z opóźnieniem 500 ms i 25 ms (Biessikirski i Winzer 2008)**

Z rysunku 2.28 widać, że poziom rejestrowanych drgań przy odpalaniu ładunków MW z opóźnieniem 25 ms jest znacznie większy, niż dla opóźnienia 500 ms. Na uwagę zasługuje fakt, że mimo różnych opóźnień, nie zmieniła się charakterystyka częstotliwościowa<sup>2</sup> zarejestrowanych drgań zarówno w podłożu jak i na fundamencie obiektu.

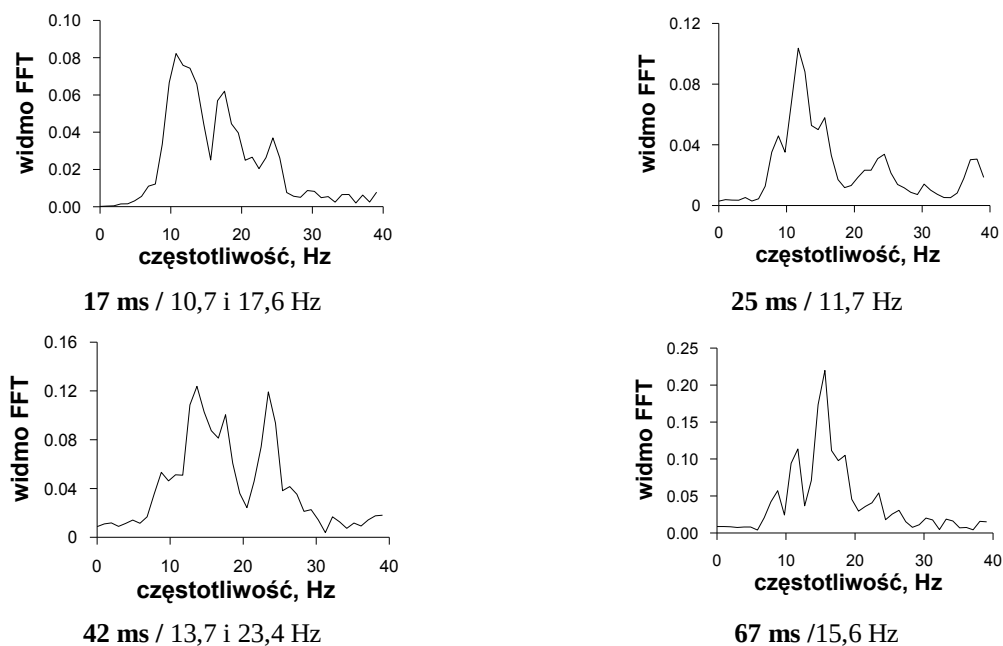
Po wprowadzeniu do Polski systemu nieelektrycznego kontynuowano badania nad wpływem opóźnienia milisekundowego na intensywność rejestrowanych drgań (Biessikirski *at al.* 2008, Modrzejewski 2006, Onderka 2003, Winzer 2004). Dla przykładu Biessikirski *at al.* (2008) przedstawiają jak zmienia się poziom rejestrowanych drgań, czas trwania i częstotliwość. Na rysunku 2.29 przedstawiono sejsmogramy drgań zarejestrowanych na fundamencie obiektu przy odpalaniu 6 serii o tej samej ilości otworów i masie MW, różniących się tylko zastosowanym opóźnieniem milisekundowym. Otwory w seriach 1 do 4 ułożone były w jednym szeregu i zastosowano stałe opóźnienie milisekundowe 17, 25, 42 i 67 ms.

<sup>2</sup> Szybka transformata Fouriera (ang. *Fast Fourier Transform*) przedstawia widmo amplitudowe sygnału, czyli ilustruje zależność amplitud poszczególnych składowych sygnału od częstotliwości. Takie proste przekształcenie Fouriera pozwala na przeniesienie analizy przebiegu z dziedziny czasu w dziedzinę częstotliwości. Szerzej omówione w rozdziale 4.1.



**Rys. 2.29. Sejsmogramy drgań zarejestrowanych w czasie odpalania 14 ładunków MW (Biessikirski *at al.* 2008)**

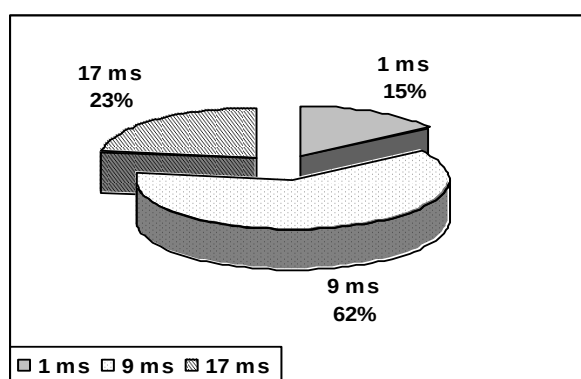
Z rysunku 2.29 widać wyraźnie zmianę intensywności rejestrowanych drgań i czas trwania, im większe opóźnienie tym dłuższy czas trwania rejestrowanego sygnału. Zauważalna jest też zmiana struktury częstotliwościowej drgań co potwierdza analiza częstotliwościowa (Rys. 2.30).



**Rys. 2.30. Wyniki analizy widmowej (FFT) dla drgań przedstawionych na rysunku 2.29 (Biessikirski *at al.* 2008)**

Małe opóźnienia 17 i 25 ms wzbudzają drgania o stosunkowo niższych częstotliwościach, natomiast opóźnienia 42 i 67 ms o częstotliwościach wyższych, ale wyraźnie związanych z częstotliwością odpalania ładunków. Opóźnienie 42 ms – częstotliwość 23,4 Hz, a 67 ms – 15,6 Hz.

Biessikirski *at al.* (2008) zwracają również uwagę na rzeczywiste czasy odpalania, przy stosowaniu nieelektrycznego systemu, w przypadku siatek wieloszeregowych. Zastosowane opóźnienia nie odpowiadają czasom rzeczywistym w jakich odpalane są poszczególne ładunki MW. Dla przykładu na rysunku 2.31 przedstawiono rozkład rzeczywistych opóźnień milisekundowych, jaki otrzymano w czasie odpalania serii dwuszeregowych z opóźnieniami 17 i 25 ms.



Rys. 2.31. Rzeczywiste opóźnienia milisekundowe dla serii dwuszeregowej (Biessikirski *at al.* 2008)

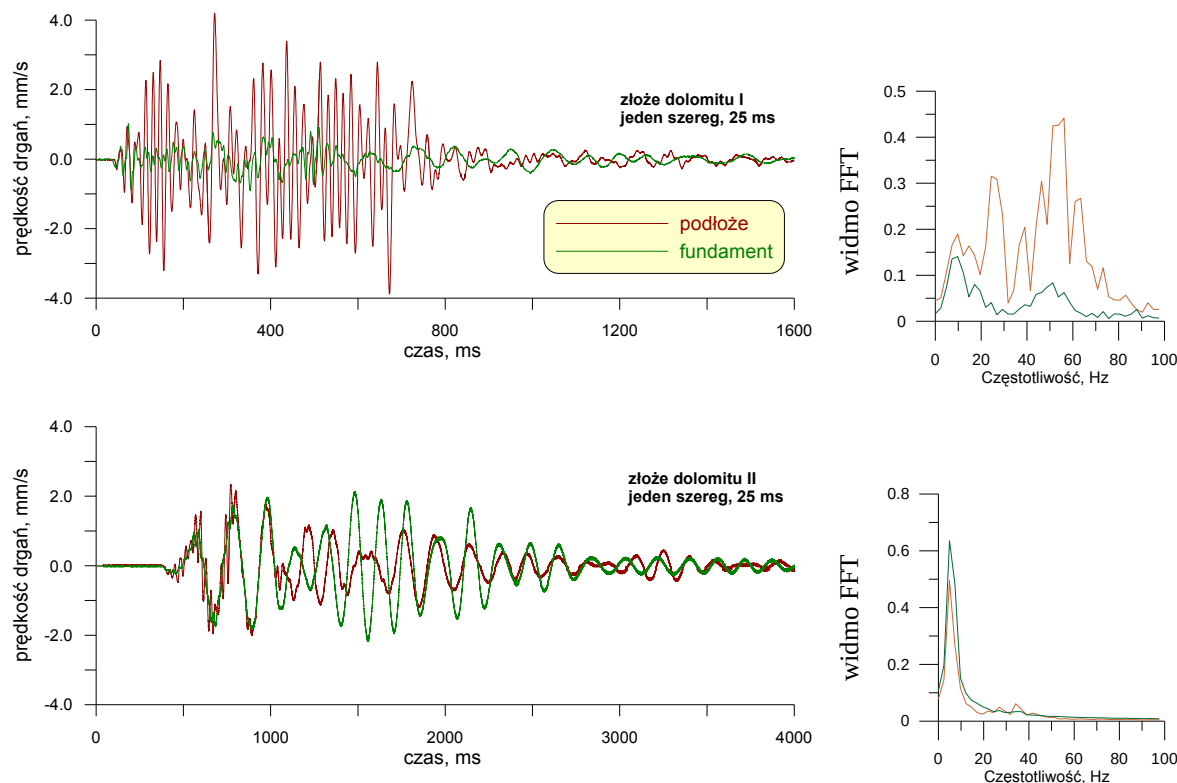
Jak widać rzeczywiste opóźnienia między ładunkami MW nie mają wiele wspólnego z zastosowanymi opóźniaczami czasowymi (konektorami).

Natomiast Modrzejewski (2006) przedstawia rozważania na temat metody określenia optymalnego czasu opóźnienia i szereg zasad jakimi należy się kierować przy obliczaniu optymalnego opóźnienia milisekundowego. Rekomendowano również opóźnienia, jakie powinny być stosowane przy wykonywaniu robót strzałowych dla poszczególnych rodzajów skał (Tab. 2.2).

Tabela 2.2. Rekomendowane opóźnienie dla danego rodzaju skały (Modrzejewski 2006)

| Lp. | Rodzaj skały | Rekomendowane opóźnienie, ms |
|-----|--------------|------------------------------|
| 1.  | Bazalt       | 42, 67                       |
| 2.  | Dolomit      | 25, 42                       |
| 3.  | Granit       | 17, 25, 42                   |
| 4.  | Granitognejs | 25, 42, (67)                 |
| 5.  | Melafir      | 25, 42, 67                   |
| 6.  | Wapień       | 42, 67, 109                  |

Jako zaprzeczenie powyższych rezultatów można przedstawić wyniki badań, zamieszczone w pracach (Biessikirski i Winzer 2008, Winzer 2004), w których wykazano rozbieżności po zastosowaniu tego samego opóźnienia dla tego samego rodzaju skały, lecz dla różnych złóż (Rys. 2.32)



**Rys. 2.32. Porównanie poziom rejestrowanych drgań przy odpaleniu ładunków MW z opóźnieniem 25 ms dla różnych złóż dolomitu (Biessikirski i Winzer 2008)**

Z rysunku 2.32 widać różnice w zapisie sygnału drgań przy odpaleniu serii ładunków MW z tym samym opóźnieniem milisekundowym wynoszącym 25 ms. W złożu dolomitu I drgania rejestrowane w podłożu mają znaczną intensywność, lecz przy przejściu do obiektu nastąpiła redukcja, natomiast w przypadku złoża dolomitu II, poziom rejestrowanych drgań w podłożu i na fundamencie obiektu są takie same. Różnica jest również w strukturze częstotliwościowej drgań. W pierwszym przypadku dominują wysokie częstotliwości koło 55 Hz, które są odfiltrowane i na obiekcie występują tylko częstotliwości 10 Hz. W drugim przypadku zarówno w podłożu jak i na fundamencie dominują częstotliwości niskie poniżej 10 Hz, które nie ulegają filtracji przy przejściu z podłoża do fundamentu.

Autorzy prac (Modrzejewski i Ślęzak 1998, Modrzejewski 2006, Onderka 2003, Ślęzak i Modrzejewski 2001), powołują się na McKenzie (1993), w której podaje wzór na wielkość optymalnego opóźnienia milisekundowego  $\tau$  w zależności od odległości między ładunkami  $a$ , która powinna wynosić:

dla odpalania jednoszeregowego:

$$\tau = (2,5 \div 4,5) \cdot a \text{ [ms]} \quad (2.1)$$

dla odpalania wieloszeregowego:

$$\tau = (5 \div 15) \cdot a \text{ [ms]} \quad (2.2)$$

oraz zależność intensywności od ilości odpalanych ładunków z opóźnieniem milisekundowym:

$$u = u' [1 + (n - 1) \cdot 0,05] \quad (2.3)$$

gdzie:

$u'$  – prędkość drgań zmierzona przy odpalaniu jednego ładunku mm/s,

$u$  – obliczona prędkość drgań mm/s,

$n$  – liczba ładunków.

Ponadto Onderka (2003) przyjmuje model drgań jako ruch harmoniczny prosty i z warunku na interferencję fal pochodzących od kolejnych ładunków, zakłada że opóźnienie powinno być w przedziale:

$$T > \tau > T/2 \quad (2.4)$$

gdzie:

$T$  – okres drgań, s,

$$T = 1/f,$$

$f$  – częstotliwość, Hz.

Onderka (2003) podaje również, że należy unikać opóźnień mniejszych niż 18 ms, a najkorzystniejsze efekty ograniczenia drgań parasejsmicznych uzyskuje się dla opóźnień z przedziału 25 ÷ 50 ms.

Podsumowując wyniki z dotychczasowych badań, związanych z doбором opóźnienia milisekundowego do odpalania długich otworów w kopalniach odkrywkowych, należy zauważyć że:

- nie ma możliwości korzystania z wzorów empirycznych,
- opóźnienie niekoniecznie musi być czynnikiem minimalizującym poziom drgań,



- stosując opóźnienia milisekundowe można obniżyć efekt sejsmiczny nawet poniżej intensywności wzbudzonej pojedynczym ładunkiem MW,
- zbyt duże opóźnienie międzystrzałowe nie zawsze wpływa na zmniejszenie drgań, a nawet może przyczynić się do ich intensyfikacji,
- zbyt małe opóźnienie, w niektórych przypadkach, powoduje gwałtowny wzrost intensywności, porównywalny z efektem odpalania natychmiastowego,
- opóźnienie milisekundowe wpływa na charakterystyki częstotliwościowe rejestrowanych drgań,
- nie można przypisywać opóźnienia dla konkretnego rodzaju skały lecz raczej dla konkretnych warunków lokalnych.

Wielkość opóźnienia powinna być wyznaczona doświadczalnie w odniesieniu do danych warunków geologiczno – górniczych, ponieważ jakiegokolwiek obliczenia nie pozwalają na uzyskanie jednoznacznych wyników. W przypadku kiedy mamy do czynienia z oceną oddziaływania drgań na obiekty budowlane, znajdujące się w otoczeniu kopalni, konieczne jest również dokonywanie analizy składu częstotliwościowego rejestrowanych drgań, ponieważ częstotliwości decydują o zakwalifikowaniu drgań do grupy nieodczuwalnych, odczuwalnych lub szkodliwych. Przy wyborze optymalnego opóźnienia należy brać pod uwagę cały proces przekazywania drgań do obiektu chronionego: źródło – propagacja drgań – odbiornik.

### 2.5.2. Wzory stosowane do wyznaczania opóźnienia milisekundowego

W literaturze naukowej (Chanukajew 1974, Gliński 1969b, Langeforst i Kihlstrom 1968, Onderka 1990) przedstawionych jest szereg wzorów empirycznych do wyznaczenia optymalnego opóźnienia międzystrzałowego. Nie mają one jednak większego ogólnego zastosowania, ponieważ najczęściej odnoszono się do warunków lokalnych (doświadczalnych). Poniżej zestawiono kilka z nich:

- wzór Turuty:

$$\tau = k_1 \cdot z \cdot (24 - f) \quad (2.5)$$

gdzie:

- $z$  – zabiór, m
- $f$  – współczynnik zwięzłości skał wg klasyfikacji Protodiakonowa,
- $k_1$  – współczynnik szczelinowatości.

- wzór Johansona i Langeforsa:

$$\tau = 3,3 \cdot k \cdot z \quad (2.6)$$

gdzie:

$k$  – współczynnik proporcjonalności zależny od odległości między otworami, rodzaju skały i MW ( $k = 2 \div 3$ ),

- wzór Mosinca:

$$\tau = \frac{a \cdot \rho \cdot v}{(20 \div 30) \cdot \sigma_c \cdot g} \quad (2.7)$$

gdzie:

$a$  – odległość między otworami, m,

$\rho$  – gęstość skały, kg/m<sup>3</sup>,

$\sigma_c$  – wytrzymałość skały na ściskanie, kg/m<sup>2</sup>,

$v$  – prędkość przebiegu fali ściskającej w skałe, m/s,

$g$  – przyspieszenie ziemskie 9,81 m/s<sup>2</sup>.

- wzór Chanukajewa:

$$\tau = k \cdot \frac{z \cdot \sqrt{\rho}}{\sqrt{q}} \quad (2.8)$$

gdzie:

$q$  – jednostkowe zużycie MW, kg/m<sup>3</sup>,

- wzór Fadiejewa:

$$\tau = 2 \cdot \left( \frac{\rho_s}{q} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.9)$$

gdzie:

$\rho_s$  – gęstość skały, Mg/m<sup>3</sup>

– wzór Pokrowskiego 1:

$$\tau = \frac{a_s}{u_{sp}} + \frac{\sqrt{Q}}{2000} \quad (2.10)$$

gdzie:

$a_s$  – odległość między ładunkami, m,

$Q$  – masa ładunku MW odpalonego w pierwszej kolejności, kg,

$u_{sp}$  – prędkość powstawania spękań,  $u_{sp} = (0,20 \div 0,40) \cdot c_p$ ,

$c_p$  – prędkość fali podłużnej, m/s

– wzór Pokrowskiego 2:

$$\tau = \frac{a}{D} + (2000 \cdot q)^{1/2} \quad (2.11)$$

gdzie:

$a$  – odległość między otworami w szeregu, m,

$D$  – prędkość detonacji MW, m/s,

– wzór Jewstropowa:

$$\tau = \frac{2 \cdot k \cdot z}{c_p} \quad (2.12)$$

gdzie:

$k$  – współczynnik proporcjonalności  $1 \leq k \leq 2$ ,

– wzór Protodiakonowa:

$$\tau = \frac{31,5 \cdot z}{\sqrt[4]{\rho_s \cdot c_p}} - 6 \cdot \sqrt[4]{\rho_s \cdot c_p} + 9,6 \quad (2.13)$$

ponieważ  $\rho_s \cdot c_p = 3,8 \cdot \sqrt{f}$

$$\tau = \frac{31,5 \cdot z}{\sqrt[4]{1,3 \cdot f}} - 6 \cdot \sqrt[4]{1,3 \cdot f} + 9,6 \quad (2.14)$$

– wzór Sojuzwzrywpromu:

$$t = K \cdot z_0 \quad (2.15)$$

gdzie:

$K$  – współczynnik uwzględniający gęstość akustyczną urabianej skały (dla skał bardzo mocnych  $K = 3$ , dla skał słabych  $K = 6$ ),

$z_0$  – zasięg obliczeniowy, m,

– wzór Rzewskiego:

$$\tau = k \cdot z \quad (2.16)$$

gdzie:

$k$  – współczynnik zależny od warunków strzelania,  $k = 1 \div 5$

– wzór Diadieczkina:

$$\tau = \frac{z}{0,14 \cdot \sqrt[4]{f}} \quad (2.17)$$

Jak widać z powyższych wzorów, cały czas dąży się do minimalizacji efektu sejsmicznego robót strzałowych i próbuje się wziąć pod uwagę jak największą liczbę czynników, jednak stanowią one cząstkowe rozwiązania i nie pozwalają na uogólnienie mechanizmu robót strzałowych i efektu sejsmicznego. Dlatego istnieje potrzeba prowadzenia dalszych badań, mających na celu powiązanie wszystkich czynników wpływających na intensywność drgań wzbudzanych detonacją MW, aby wyznaczyć optymalne warunki prowadzenia tych robót i czas opóźnienia międzystrzałowego.

### **3. Oddziaływanie na otoczenie drgań wzbudzanych detonacją MW**

Urabianie calizny skalnej z wykorzystaniem MW jest źródłem drgań, które mogą oddziaływać na obiekty budowlane zlokalizowane w pobliżu wyrobiska. Sam fakt wystąpienia drgań nie oznacza ich szkodliwego wpływu na lokalną zabudowę, jednak wymusza na kopalni konieczność prowadzenia działań profilaktycznych w otoczeniu. Rozpoznanie stopnia intensywności drgań i kierunków ich propagacji jest istotne, szczególnie ze względu na ochronę istniejących bądź projektowanych obiektów budowlanych w sąsiedztwie prowadzonych robót strzałowych. Problemy oceny oddziaływania drgań są wciąż aktualne, gdyż brak jest jednoznacznych i ujednoliconych procedur, co skutkuje rozbieżnościami w ocenach, a to często znajduje finał w sądzie (Winzer 2008).

#### **3.1. Charakterystyka drgań**

Źródła drgań są pochodzenia naturalnego i antropogenicznego. Do źródeł naturalnych zaliczamy drgania, wywołane ruchem płyt tektonicznych oraz wybuchy wulkanów. Natomiast do źródeł antropogenicznych zaliczamy wstrząsy wywołane działalnością człowieka np.: roboty strzałowe, wstrząsy powodowane działalnością górniczą, ruch komunikacyjny, przejazd ciężkiego sprzętu, roboty budowlane i wszelkie inne.

W wyniku detonacji ładunku MW, w caliznie skalnej rozprzestrzeniają się w ośrodku skalnym sztucznie wytworzone fale sprężyste, czyli fale parasejsmiczne. Ośrodek skalny charakteryzuje się własnościami sprężystymi i w teorii ruchu fal sejsmicznych przyjmuje się, że jest on jednorodny i izotropowy. W rzeczywistości ośrodek skalny jest niejednorodny i anizotropowy, lecz cechy te są trudne do opisanie wzorami matematycznymi i pomijane są w praktyce (Fajklewicz 1972).

Sejsmologia wyróżnia dwie podstawowe grupy fal sejsmicznych: fale przestrzenne i fale powierzchniowe (Drzęźła *at al.* 1995, Kowalczyk 1970, Onderka *at al.* 2003).

Fale przestrzenne dzielą się na dwa rodzaje:

- fale podłużne (*P*),
- fale poprzeczne (*S*).

Fale podłużne w ośrodku izotropowym są falami kulistymi, a ruch ich polega na zmianie objętości (proces okresowych zagęszczeń i rozrzedzeń cząsteczek ośrodka), ruch cząstek ośrodka zachodzi w kierunku równoległym do kierunku propagacji fali. Fale te mają największą prędkość propagacji i są rejestrowane jako pierwsze na sejsmogramie. Prędkość propagacji określa zależność 3.1:

$$v_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \quad (3.1)$$

gdzie:

$\lambda, \mu$  – stałe Lamé'go,  
 $\rho$  – gęstość ośrodka.

Fale poprzeczne są wynikiem przenoszenia się zmian postaci cząsteczek ośrodka, a ruch cząstek jest prostopadły do kierunku propagacji fali. Na sejsmogramie pojawiają się jako druga grupa. Fale poprzeczne dzielą się na dwie spolaryzowane prostopadle względem siebie fale: fala poprzeczna o pionowych drganiach *SO* (*SV*) i fala poprzeczna o poziomych drganiach *SP* (*SH*). Prędkość propagacji fali *S* określa zależność 3.2:

$$v_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (3.2)$$

Literatura z zakresu geofizyki (Fajklewicz 1972, Kowalczyk 1970), w celu otrzymania równań dla małych drgań sprężystych, rozpatruje ruch punktu materialnego według zależności:

$$m \frac{d^2 \vec{U}(uvw)}{dt^2} = \sum F \quad (3.3)$$

gdzie:

$\vec{U}$  – wektor przemieszczenia punktu ( $u, v, w$  – składowe przemieszczenia),  
 $\sum F$  – suma wszystkich sił działających na punkt.

Dokonując szeregu podstawień i przekształceń matematycznych dochodzi się do równania różniczkowego drgań sprężystych w ośrodku jednorodnym i izotropowym w postaci:

$$\rho \frac{d^2 \bar{U}}{dt^2} = (\lambda + \mu) \text{grad} \theta + \mu \nabla^2 \bar{U} \quad (3.4)$$

gdzie:

$\theta$  – oznaczenie kąta.

Różniczkując wyrażenie 3.4 względem odpowiednich zmiennych otrzymano:

- równanie fal podłużnych (rów. 3.5):

$$\rho \frac{d^2 \theta}{dt^2} = (\lambda + 2\mu) \nabla^2 \theta \quad (3.5)$$

- równanie fal poprzecznych (rów. 3.6):

$$\rho \frac{\partial^2 \omega_{yz}}{\partial t^2} = \mu \nabla^2 \omega_{yz}$$

$$\rho \frac{\partial^2 \omega_{zx}}{\partial t^2} = \mu \nabla^2 \omega_{zx} \quad (3.6)$$

$$\rho \frac{\partial^2 \omega_{xy}}{\partial t^2} = \mu \nabla^2 \omega_{xy}$$

gdzie (rów. 3.7):

$$\omega_{yz} = 1/2 (\partial \omega / \partial y - \partial v / \partial z)$$

$$\omega_{yz} = 1/2 (\partial u / \partial z - \partial \omega / \partial x) \quad (3.7)$$

$$\omega_{yz} = 1/2 (\partial v / \partial x - \partial u / \partial y)$$

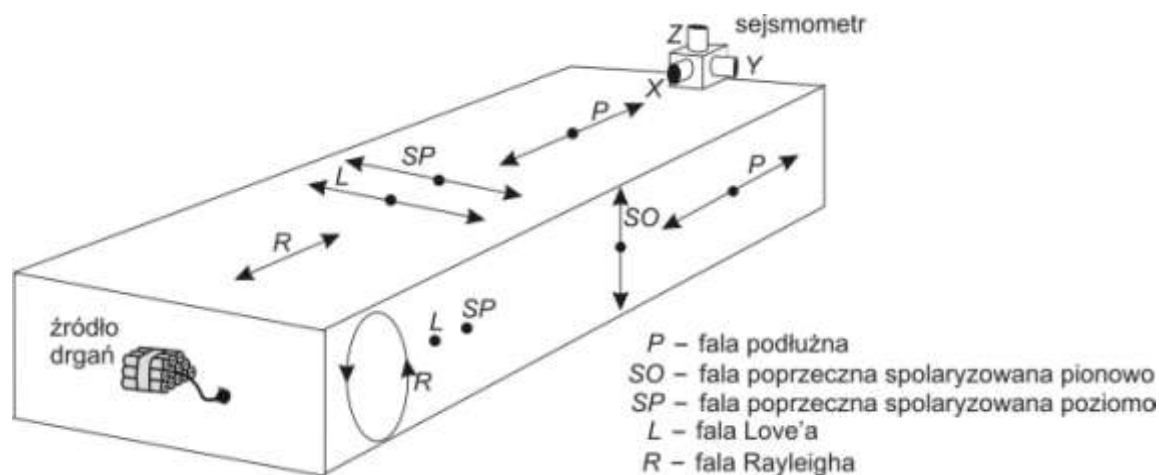
Drugą grupę stanowią fale powierzchniowe, których rozchodzenie obserwuje się na granicy dwóch ośrodków, a szczególnie na powierzchni Ziemi. Odznaczają się one znacznie większą energią niż fale przestrzenne i rozchodzą się w przestrzeni dwuwymiarowej nie przenikając w głąb Ziemi (Fajkiewicz 1972). Należą do nich:

- fale Rayleigha ( $R$ ),
- Love'a ( $L$ ).

Fale Rayleigha związane są z obecnością sprężystej spójności. Powstają w wyniku sprzężenia fal  $P$  i  $SO$ . Prędkość propagacji jest nieco mniejsza od prędkości fali poprzecznej.

Fale Love'a mogą powstać w warstwie leżącej na półprzestrzeni. Powstają w wyniku nałożenia się wielokrotnych odbić fal  $SP$  od stropu i spągu tej warstwy.

Schematycznie wszystkie wymienione fale przedstawia rysunek 3.1.



Rys. 3.1. Podstawowe rodzaje fal sejsmicznych (Onderka *at al.* 2003)

W ośrodku skalnym, w którym rozchodzi się fala podłużna, można wyróżnić strefy zgęszczenia i strefy rozrzedzenia. W pobliżu źródła drgań można wyróżnić trzy obszary (Fajkiewicz 1972, Onderka *at al.* 2003):

- wewnętrzną strefę kulistą, w której przesunięcia cząstek ośrodka wywołane źródłem są ustalone,
- kulisty pierścień, w którym aktualnie zachodzą przesunięcia cząstek,
- zewnętrzną część ośrodka, do której przesunięcia cząstek jeszcze nie dotarły.

Intensywność fali  $I$ , czyli ilość energii przechodząca przez jednostkę powierzchni w jednostce czasu, można wyznaczyć z zależności 3.8:

$$I = \frac{\pi}{2} A^2 f^2 Z_a \quad (3.8)$$

gdzie:

- $A$  – amplituda fali sprężystej,  
 $f$  – częstotliwość drgań fali,  
 $Z_a$  – impedancja akustyczna, która wynosi (rów. 3.9):

$$Z_a = \rho v \quad (3.9)$$



gdzie:

- $\rho$  – gęstość skały,
- $v$  – prędkość rozchodzenia się fali sprężystej w skale.

Dla uproszczenia oceny oddziaływania drgań na obiekty, za intensywność przyjmuje się wartość maksymalnych przemieszczeń, prędkości lub przyspieszenia (Winzer 2004). Innym parametrem opisującym intensywność jest wektor, jako suma geometryczna składowych, pozbawiony jest on charakterystyki częstotliwościowej, jednakże dobrze opisuje zmianę intensywności z odległością (Biessikirski i Winzer 2008).

Skały są ciałami niejednorodnymi i niezupełnie sprężystymi i dlatego fale sejsmiczne nie rozchodzą się w nich tak jak w ciałach idealnie sprężystych i jednorodnych. W utworach skalnych zachodzi zjawisko pochłaniania i rozpraszania fal sejsmicznych (Bierzon *at al.* 1962).

Powstające przy detonacji kolejnych ładunków MW fale parasejsmiczne mogą się dodatkowo nakładać, odbijać i załamywać, komplikując obraz drgań na sejsmogramie.

### **3.1.1. Czynniki wpływające na intensywność drgań wzbudzanych robotami strzałowymi**

Literatura naukowa (Batko 1993, Batko 1994, Batko 2002, Batko 2004, Biessikirski *at al.* 2001, Biessikirski *at al.* 2007, Crum i Siskind 1993, Dojcar 1996, Dubiński i Mutke 2008, Egorov i Glozman 1997, Kelly i White 1993, Korzeniowski i Onderka 2006, Kuzu i Hudaverdi 1005, Maciąg 1979, Maciąg *at al.* 2007, Modrzejewski 2004a i b, Modrzejewski 2006, Müller i Böhnke 2003, Oloffson 1990, Onderka *at al.* 2003, Onderka i Sieradzki 2004, Pyra 2008, Siskind 1976, Winzer *at al.* 2006, Winzer i Pyra 2007), na temat drgań wzbudzanych użyciem MW w odkrywkowych zakładach górniczych, podaje szereg czynników mających wpływ na intensywność drgań, do których należą:

- budowa geologiczna w miejscu prowadzonych robót strzałowych i na drodze przechodzenia fal sprężystych,
- prędkości fali podłużnej jako rzeczywistej charakterystyki skał w miejscu wykonywania robót i pomiaru,
- rodzaj i charakterystyka materiału wybuchowego oraz konstrukcja ładunku w otworze,
- parametry geometryczne siatki otworów strzałowych (długość otworów, zabiór, odległość między otworami i szeregami, przewiert, średnica otworów strzałowych),

- masa ładunków MW: w serii otworów ( $Q_c$ ) przypadającego na pojedyncze opóźnienie międzystrzałowe ( $Q_z$ ) oraz ładunku otworu ( $Q_1$ ),
- kolejność odpalania ładunków MW oraz wielkość stosowanego opóźnienia międzystrzałowego,
- odległość punktu pomiarowego do źródła drgań,
- system inicjowania, precyzja zapalników,
- warunki atmosferyczne.

Ponadto do czynników, które dodatkowo wpływają na intensywność drgań w obiekcie chronionym należą:

- konstrukcja obiektu,
- stan techniczny obiektu,
- budowa podłoża pod ochranianymi obiektami,
- rodzaj i głębokość posadowienia fundamentów,
- charakterystyka przenoszenia drgań z podłoża do obiektu,
- częstotliwość drgań własnych obiektu,
- usytuowanie obiektu względem odpalanej serii.

Z wymienionych czynników na niektóre w ogóle nie mamy wpływu, natomiast pozostałe można w pewnym zakresie kontrolować. Autorzy licznych prac zwracają jednak uwagę na fakt, że głównymi czynnikami wpływającymi na drgania wzbudzone detonacją MW są: odległość od miejsca wykonywania robót strzałowych, budowa geologiczna na drodze rozchodzenia się fal, ładunek MW przypadający na opóźnienie (Kuzu i Hudaverdi 2005) i wielkość opóźnienia (Dick *at al.* 1983).

### 3.1.2. Wpływ drgań parasejsmicznych na obiekty budowlane

Głównym powodem, dla którego dokonywane są pomiary intensywności drgań jest ich negatywny wpływ na obiekty budowlane znajdujące się w sąsiedztwie wyrobiska górniczego, w którym eksploatacja prowadzona jest z użyciem MW. W Polsce, w celu stwierdzenia oddziaływania drgań parasejsmicznych na obiekty, zgodnie z obowiązującą normą *Ocena szkodliwości drgań przekazywanych przez podłoże na budynki* PN-B-02170:1985 pomiaru dokonuje się na obiekcie, na wysokości poziomu terenu, a zarejestrowane drgania nanosi się na skalę wpływu dynamicznego *SWD I* lub *SWD II* (w zależności od konstrukcji obiektu).

Ogólnie odporność obiektów na oddziałujące drgania podłoża, dla przeciętnych obiektów (wyznaczona według skali *SWD*) zawiera się w granicach  $v = 0,15 \div 0,35$  cm/s. Dla

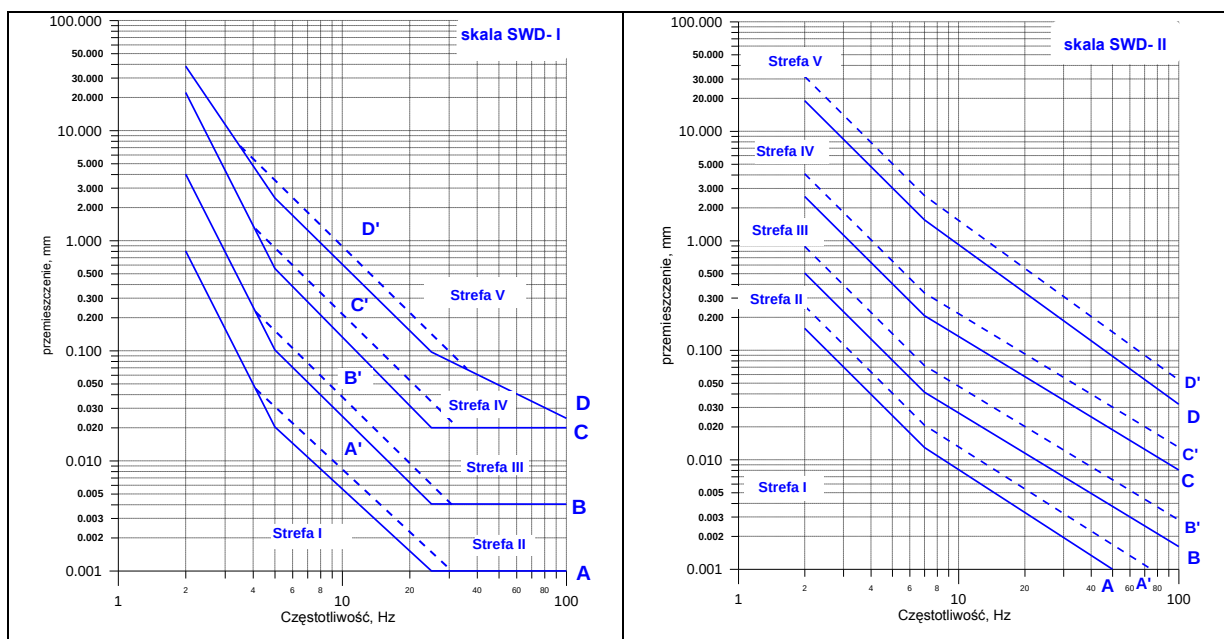
porównania normatywy czeskie (CSNI) przewidują jako bezpieczną granicę dla obiektów przemysłowych na poziomie  $v = 1 \text{ cm/s}$  (Modrzejewski 2004). American Bureau of Mines (Amerykańskie Biuro Górnicze) podaje, że niewielkie uszkodzenia powstają przy prędkościach  $v = 1,27 \text{ cm/s}$ , a większe przy prędkościach powyżej  $v = 1,92 \text{ cm/s}$  (Onderka *at al.* 2003). Z danych Canadian Building Digest wynika, że granica uszkodzenia wskutek oddziaływania drgań sejsmicznych wzbudzanych robotami strzałowymi wynosi  $v = 0,75 \text{ cm/s}$ , przy pomiarze na ścianie nośnej w miejscu położonym najbliżej wybuchu. Badania szwedzkie w zakresie uszkodzeń obiektów budowlanych posadowionych na podłożu skalnym, wykazują powstanie minimalnych szkód przy prędkościach  $v = 0,75 \text{ cm/s}$ , lekkie uszkodzenia przy  $v = 1 \text{ cm/s}$ , a średnie przy  $v = 1,5 \text{ cm/s}$  (Oloffson 1990). W Niemczech obowiązuje norma DIN 4150, według której za bezpieczne przyjmuje się  $v = 0,35 \div 0,8 \text{ cm/s}$  (DIN 4150-3). W Austrii obowiązująca jest norma ÖNORM S 9020 która przyjmuje dla obiektów zabytkowych wartość bezpiecznej prędkości wynoszącą  $v = 0,5 \text{ cm/s}$ , a dla obiektów mieszkalnych  $v = 2,0 \text{ cm/s}$ . Zbliżone wartości do normy Austriackiej, podaje norma Szwajcarska SN 640 312 a, dla obiektów zabytkowych  $v = 0,75 \text{ cm/s}$ , a dla mieszkalnych  $v = 1,5 \text{ cm/s}$ . Odmierna jest skala stosowana w Anglii według której poniżej krzywej (w układzie prędkość – częstotliwość) łączącej punkty  $f = 4 \text{ Hz}$ ,  $v = 0,9 \text{ cm/s}$  i  $f = 0 \text{ Hz}$ ,  $v = 0,23 \text{ cm/s}$  brak jest oddziaływania na obiekty (Onderka *at al.* 2003). Według hiszpańskiej normy UNE 22-381-93 1993 dla obiektów mieszkalnych przy niskich częstotliwościach (do 15 Hz) dopuszczalna prędkość wynosi  $v = 0,9 \text{ cm/s}$  i wraz ze wzrostem częstotliwości poziom dopuszczalnej prędkości wzrasta aż do 4,5 cm/s dla częstotliwości 100 Hz i wyższych. Australijska norma AS 2187.2-1993 rozgranicza dopuszczalny próg dla domów mieszkalnych  $v = 1 \text{ cm/s}$  i dla obiektów przemysłowych  $v = 2,5 \text{ cm/s}$ .

Duże różnice w ocenie mogą być powodowane stanem budownictwa w poszczególnych krajach, ale należy również zwrócić uwagę na fakt, **czego dotyczą parametry graniczne drgań: podłoża czy obiektu oraz na sposób analizy drgań**. W tym miejscu można zacytować opinię z pracy (Dubiński i Mutke 2001): „(...) *nie można wykorzystywać do oceny skutków, skal odnoszących się do fundamentu czy budynku wówczas, gdy dysponuje się prognozą drgań gruntu; nie można również czynić na odwrót, czyli stosować skale, które odnoszą się do drgań gruntu w sytuacji, gdy dysponuje się pomiarami drgań budynku (...)*”.

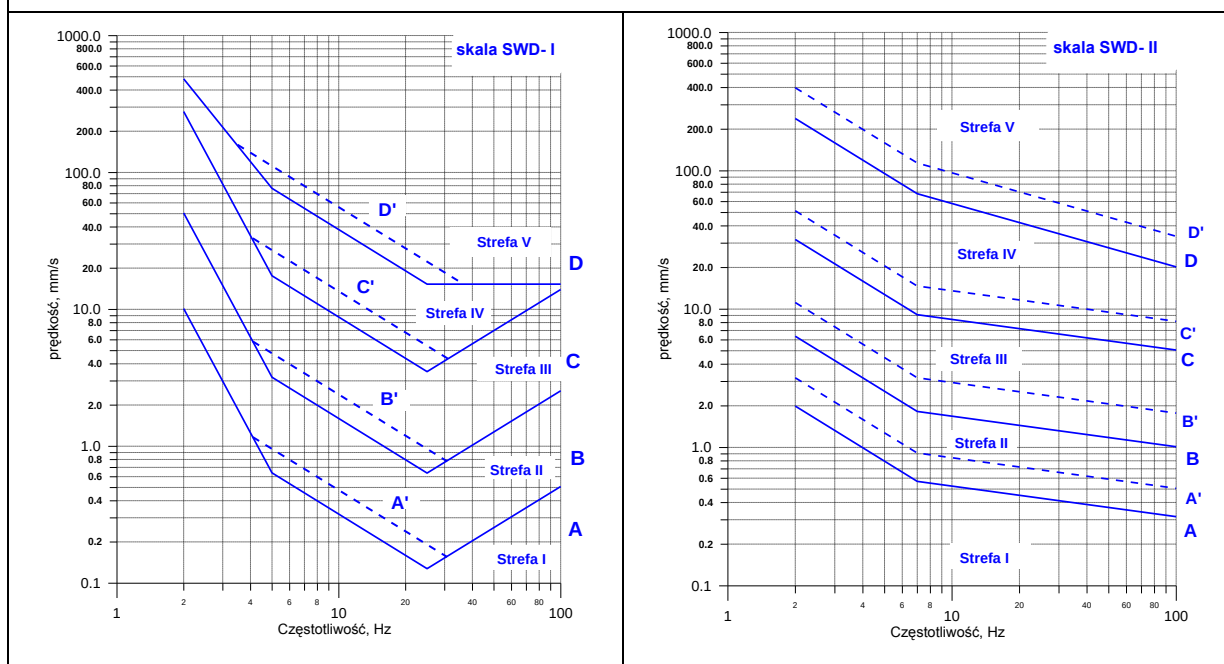
Przedmiotem polskiej normy (PN-B-02170:1985) jest ocena szkodliwości drgań przekazywanych na obiekty budowlane z podłoża oraz na urządzenia i aparaturę umieszczoną w tych obiektach. Normę stosuje się przy diagnostyce szkodliwości wpływów drgań na istnie-

jące obiekty budowlane, oraz przy projektowaniu obiektu jeśli przewiduje się, że będzie on poddawany drganiom przekazywanym przez podłoże (PN-B-02170:1985).

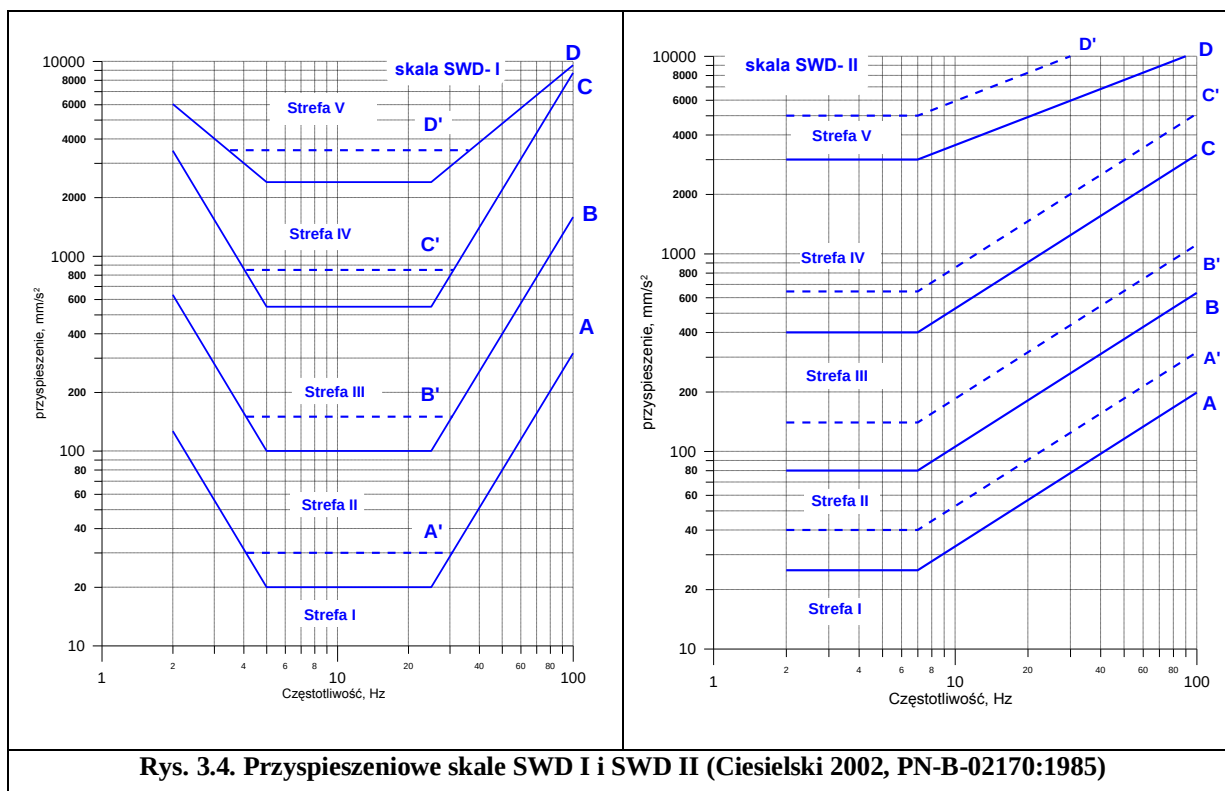
Skale SWD przedstawione są w postaci wykresów logarytmicznych, w których częstotliwością na osi poziomej odpowiadają dopuszczalne amplitudy maksymalnych drgań poziomych na osi pionowej. Mają one pięć stref (I, II, III, IV, V) oddzielonych czterema liniami granicznymi (A, B, C i D). Skale SWD przedstawiono graficznie na rysunkach 3.2 ÷ 3.4.



**Rys. 3.2. Przemieszczeniowe skale SWD I i SWD II (Ciesielski 2002, PN-B-02170:1985)**



**Rys. 3.3. Prędkościowe skale SWD I i SWD II (Ciesielski 2002, PN-B-02170:1985)**



Przyjęto następujące kryteria podziału strefy szkodliwości (PN-B-02170:1985):

- V. - drgania powodujące walenie się murów, spadanie stropów itp., występuje pełne zagrożenie bezpieczeństwa ludzi;
- granica D** - **granica stateczności budynku**, powyżej której może dojść do uszkodzenia całego budynku;
- IV. - drgania o dużej szkodliwości dla budynku, powstają liczne spękania, lokalne zniszczenia murów i innych pojedynczych elementów budynku;
- granica C** - **granica wytrzymałości pojedynczych elementów budynku, dolna granica ciężkich szkód budowlanych;**
- III. - drgania szkodliwe dla budynku, które powodują lokalne zarysowania i spękania, przez co osłabiają konstrukcję budynku i zmniejszają jego nośność oraz odporność na dalsze wpływy dynamiczne; może nastąpić odpadanie zapraw i tynków;
- granica B** - **granica sztywności budynku, dolna granica powstawania zarysowań i spękań w elementach konstrukcyjnych;**
- II. - drgania odczuwalne, ale nieszkodliwe, następuje tylko szybsze zużycie budynku;

**granica A - dolna granica odczuwalności drgań przez budynek oraz uwzględniania wpływów dynamicznych;**

I. - drgania nieodczuwalne przez budynki.

Każda granica podana jest w dwóch wariantach, co uzależnione jest od oceny stanu budynku, typu podłoża i rodzaju drgań. O zaliczeniu do odpowiedniego wariantu decyduje przeważająca liczba odpowiednich cech zgrupowanych poniżej:

1. według stanu budynku:

- *granica niższa* (linia ciągła) – budynki stare, z uszkodzeniami (mogą to być np. istniejące spękania), budynki przerabiane lub wzmacniane,
- *granica wyższa* (linia przerywana oznaczona literą ze wskaźnikiem w indeksie górnym, np. A') – budynki nieuszkodzone, bez przeróbek konstrukcyjnych;

2. według materiałów i konstrukcji:

- *granica niższa* (linia ciągła) – budynki z cegły lub kamienia, o niestarannym wykończeniu, albo budynki żelbetowe, nie mające odpowiednich fundamentów, o stropach nie stężających budynku (brak wieńców lub zakotwień), o stropach sklepionych, z wieloma otworami w ścianach lub z otworami nieregularnymi,
- *granica wyższa* (linia przerywana) – budynki z cegły pełnej, starannie wykonane z prawidłowym wiązaniem, na zaprawie wapiennej lub wapienno cementowej, o stropach masywnych, z wieńcem stropowym, fundamentami żelbetowymi lub betonowymi;

3. według typu podłoża i sposobu posadowienia:

- *granica niższa* (linia ciągła) – podłoże o dużym module podatności (o małej sztywności – piaski pylaste, luźne) i posadowienie nieciągłe (np. na różnych wysokościach) lub pośrednie (pale, studnie),
- *granica wyższa* (linia przerywana) – podłoże sztywne (np. iły i gliny twardoplastyczne), posadowienie płaskie;

4. według rodzaju drgań, przebiegu i powtarzalności:

- *granica niższa* (linia ciągła) – drgania długotrwałe albo występujące stale,
- *granica wyższa* (linia przerywana) – drgania występujące sporadycznie i wstrząsy, drgania o przebiegach regulowanych i drgania ciągłe, lecz z dużymi przerwami.

Skale SWD zostały opracowane przy założeniu, że drgania oddziałujące na obiekty są długotrwałe (np. kilka godzin dziennie) i uwzględniają efekt zmęczenia.

Diagnozę o wpływie drgań na obiekty opiera się na nanoszeniu pomierzonych maksymalnych wartości prędkości w korelacji z przynależnymi częstotliwościami. Są dwie metody prowadzenia analizy.

*Metoda bezpośrednia* – stosowana jest dla drgań o charakterystyce bliskiej harmonicznej, gdzie dwa parametry, mające istotny wpływ na szkodliwość drgań, prędkość i częstotliwość mogą być określane przez:

1. naniesienie wyników pomiarów w postaci maksymalnych wartości prędkości i odpowiadającej jej w czasie częstotliwości na skalę szkodliwości *SWD I* i lokalizację tych wyników w poszczególnych strefach oddziaływania dynamicznego. Jest to analiza na podstawie wartości szczytowych (maksymalnych),
2. zastosowanie filtrów korekcyjnych (załącznik do normy PN-B-02170:1985) i naniesienie wyników rejestracji drgań na zmodyfikowaną skalę szkodliwości. Filtrowanie korekcyjne polega na proporcjonalnym przeliczaniu zarejestrowanych wartości prędkości w zależności od częstotliwości lokalnych. Zastosowanie przelicznika korekcyjnego ułatwia w dużym stopniu analizę, gdyż dotyczy wartości całości przebiegu czasowego, jakim jest sejsmogram. Przedstawienie maksymalnych wartości prędkości po korekcji na skali daje dodatkowe informacje, które są brane pod uwagę przy analizie szkodliwości,
3. analizę energetyczną drgań *PSD* (*ang. Power Spektrum Density*) czyli określenie w jakim stopniu poszczególne częstotliwości biorą udział w budowaniu obrazu drgań. Do tej analizy stosuje się algorytmy *FFT* (*ang. Fast Fourier Transform*). Analiza ta dotyczy również całego przebiegu czasowego, czyli eliminuje się dodatkowo czynnik przypadkowości (szerzej omówiono w rozdziale 4.1).

*Metoda pośrednia* – stosowana dla drgań o charakterze impulsu, a do takich zaliczane są drgania wzbudzone robotami strzałowymi. W takim przypadku do oceny ich wpływu, według skal *SWD*, wymagane są rejestracje pełnych zapisów drgań składowych poziomych drgań. Analizę pełnych sejsmogramów składowych *x*, *y* przeprowadza się przez filtrowanie sygnału filtrem tercjowym (Adamczyk i Targosz 2002, Ciesielski 2004, Ciesielski i Maciąg 1990, Maciąg i Tatara 1999, Maciąg i Tatara 2000, Winzer i Mężyk 2004) (szerzej omówiono w rozdziale 4.1). Tak otrzymane wyniki jako wielkości prędkości odpowiadającej częstotliwości środkowej pasma tercjowego, nanoszone są na skalę *SWD* z przypisaniem im skutków odpowiadających danej strefie. Jest to druga metoda analizy na podstawie której dokonywana jest ostateczna ocena.

### 3.2. Profilaktyka stosowana przez przedsiębiorstwa górnicze

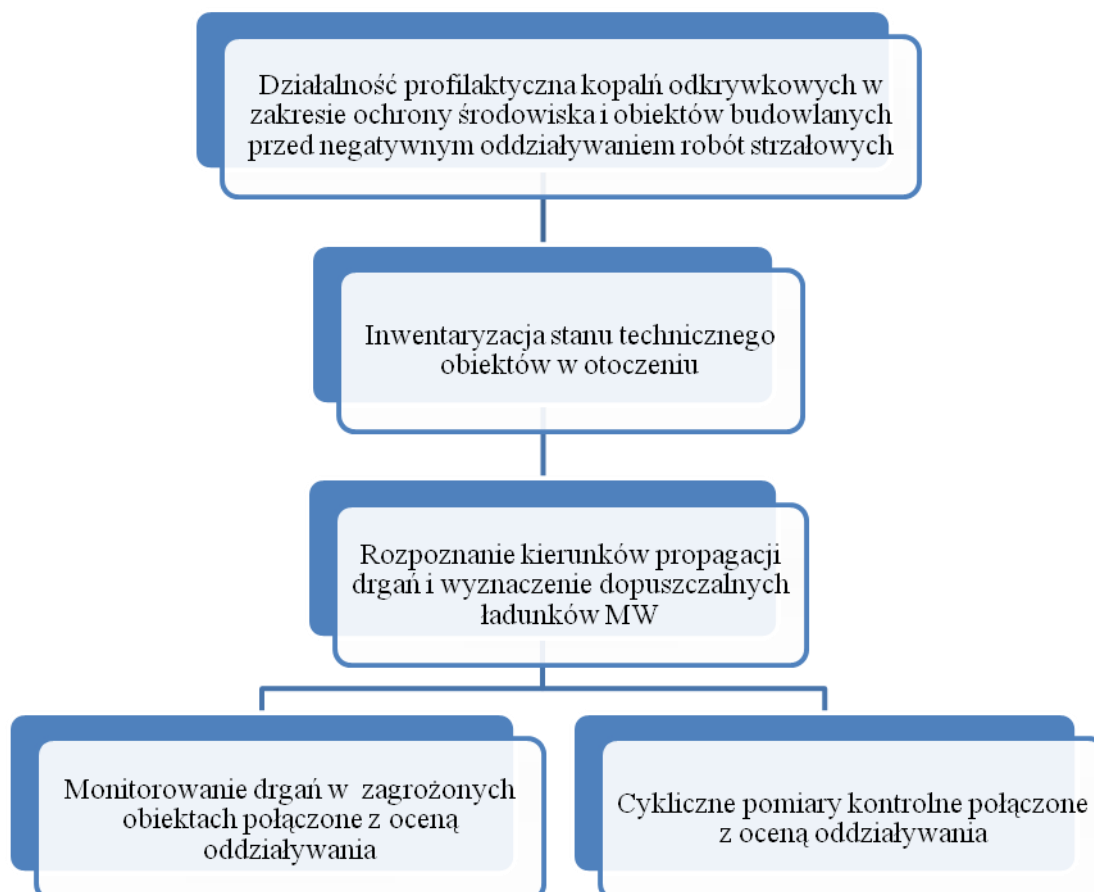
Zakład wydobywający kopalinę, zgodnie z Prawem ochrony środowiska (POŚ 2001) oraz Prawem geologicznym i górnictwem (PGiG 1994), ma obowiązek ochrony otoczenia kopalni przed negatywnymi skutkami prowadzonej eksploatacji. Dotyczy to tym samym wpływu drgań wzbudzonych robotami strzałowymi na obiekty budowlane i ludzi. Konieczność dokumentowania poziomu intensywności jest związana z faktem, że na jego podstawie można stwierdzić wpływ lub jego brak, a tym samym można skutecznie chronić otoczenie jak również racje zakładu górnictwa.

Ważnym elementem działań profilaktycznych opisywanych w literaturze (Biessikirski i Winzer 2002, Grothe i Reinders 2007, Kuzu i Hudaverdi 2005, Müller *at al.* 2007, Winzer *at al.* 2001, Winzer i Biessikirski 2002, Winzer i Sieradzki 2002, Winzer 2006, Winzer i Sieradzki 2007, Winzer *at al.* 2008) jest możliwość określenia źródła drgań i zagrożenia, czyli charakterystyka prowadzonych robót strzałowych i analiza poziomu rejestrowanych drgań pod kątem skutków oddziaływania na obiekty chronione. Dopiero ujęcie zagadnienia jako *przyczyna – skutek* zapewnia przyjęcie właściwej profilaktyki.

Prowadzona działalność profilaktyczna w tym zakresie powinna obejmować (Rys. 3.5) (Winzer *at al.* 2001, Winzer i Biessikirski 2002):

- inwentaryzację i udokumentowanie stanu technicznego obiektów w otoczeniu,
- rozpoznanie kierunków propagacji drgań i stopnia ich intensywności w otoczeniu wyrobiska górnictwa, na podstawie których to wyznacza się warunki bezpiecznego dla otoczenia prowadzenia robót strzałowych,
- prowadzenie okresowych pomiarów kontrolnych,
- w szczególnych przypadkach monitorowanie drgań w obiektach (Sieradzki 1997, Winzer i Sieradzki 2002).





Rys. 3.5. Działalność profilaktyczna kopalń – schemat blokowy (Winzer *at al.* 2006)

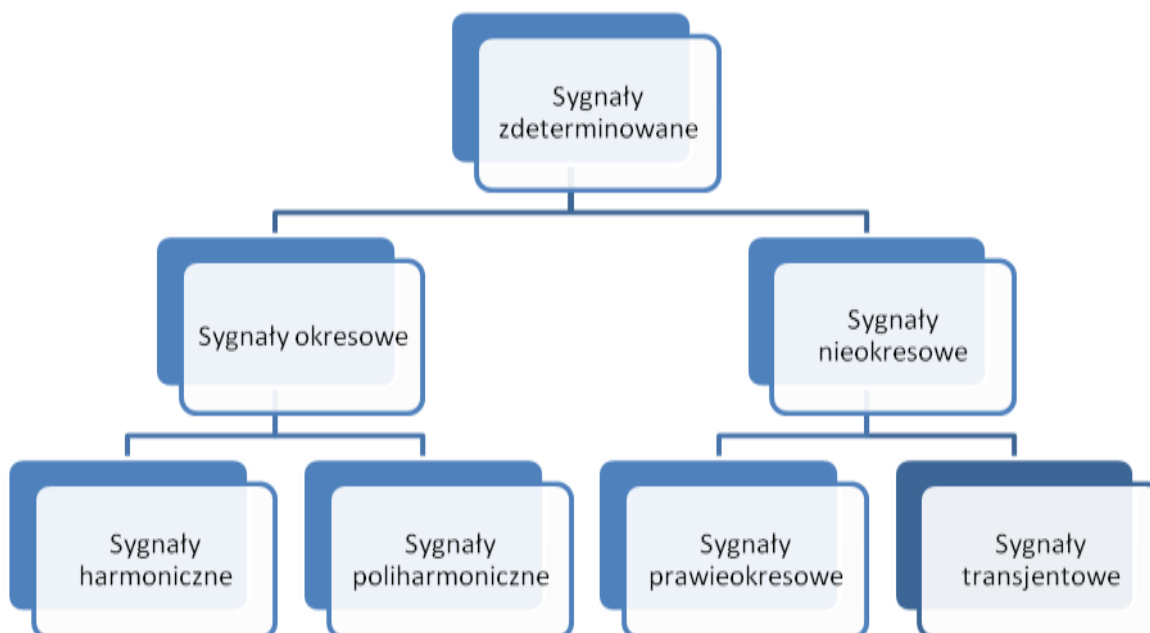
Wybór metody prowadzenia działalności profilaktycznej kopalń w zakresie minimalizacji oddziaływania robót strzałowych jest podyktowany przede wszystkim:

- stopniem zagrożenia znajdujących się w otoczeniu kopalni obiektów budowlanych, ich liczbą i przeznaczeniem (obiekty przemysłowe, budownictwo mieszkalne i gospodarcze, obiekty zabytkowe),
- częstością wykonywania robót strzałowych,
- sposobem prowadzenia robót strzałowych (Winzer *at al.* 2001, Winzer i Biessikirski 2002).

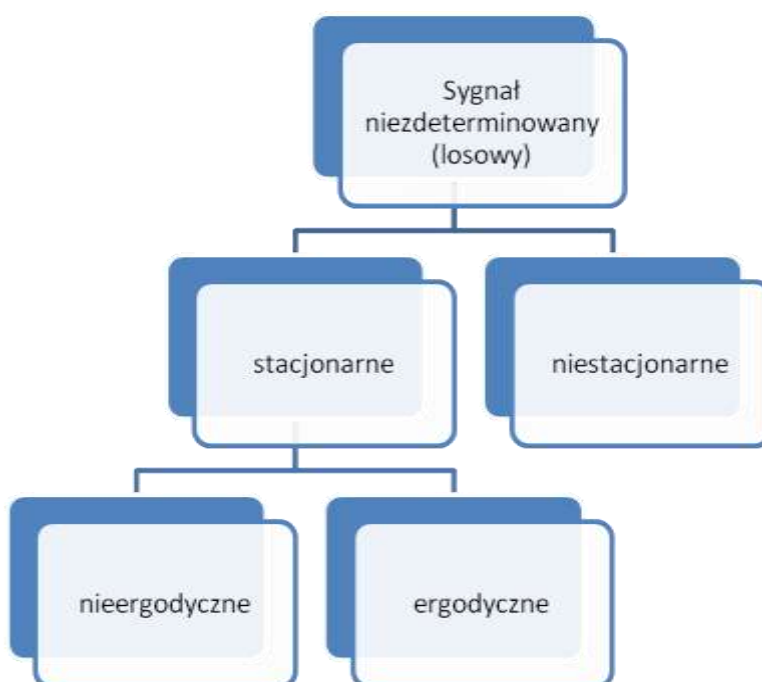
### 3.3. Drgania parasejsmiczne jako sygnał

W najprostszym ujęciu jako sygnał rozumie się zmienność dowolnej wielkości fizycznej, która może być opisana za pomocą funkcji jednej zmiennej  $f(x)$  lub wielu zmiennych  $f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ . W praktyce najczęściej sygnały są funkcjami czasu (Lyons 2000, Zieliński 2007).

Sygnały ogólnie można podzielić na zdeterminowane i niezdeterminowane. Sygnały zdeterminowane to takie, które dają opisać się analitycznie. Sygnały niezdeterminowane, nazywane też sygnałami losowymi, nie dają opisać się zależnościami matematycznymi. Klasyfikację sygnałów zdeterminowanych przedstawiono na rysunku 3.6, a niezdeterminowanych na rysunku 3.7.



**Rys. 3.6. Klasyfikacja sygnałów zdeterminowanych**



**Rys. 3.7. Klasyfikacja sygnałów losowych**

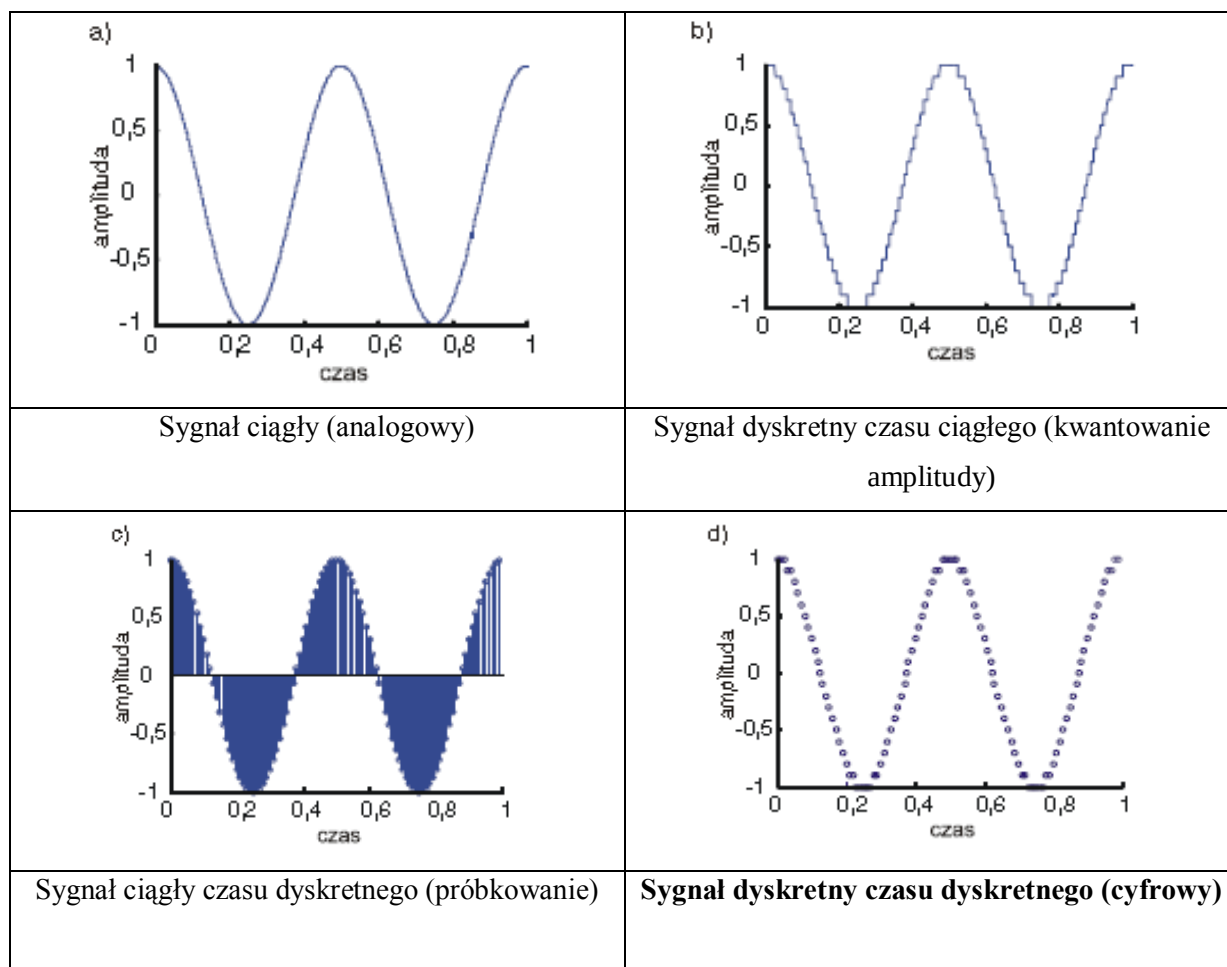
Sygnały transjentowe obejmują szeroką grupę zdeterminowanych sygnałów nieokresowych i można opisać je za pomocą odpowiednich funkcji zmiennych w czasie. Ich charakterystyczną cechą jest zmienna w czasie amplituda, o charakterze narastania lub zanikania, oraz to że ich widmo jest ciągle i można je wyznaczyć za pomocą całki Fouriera.

Losowym zjawiskom fizycznym przyporządkowane są różne sygnały losowe, których nie da się opisać analitycznie w sposób jednoznaczny, ponieważ w kolejnych przedziałach obserwacji danego zjawiska rejestruje się różne względem siebie zapisy czasowe.

Do grupy sygnałów losowych o charakterze transjentowym zaliczane są sygnały drgań wzbudzanych detonacją ładunków MW.

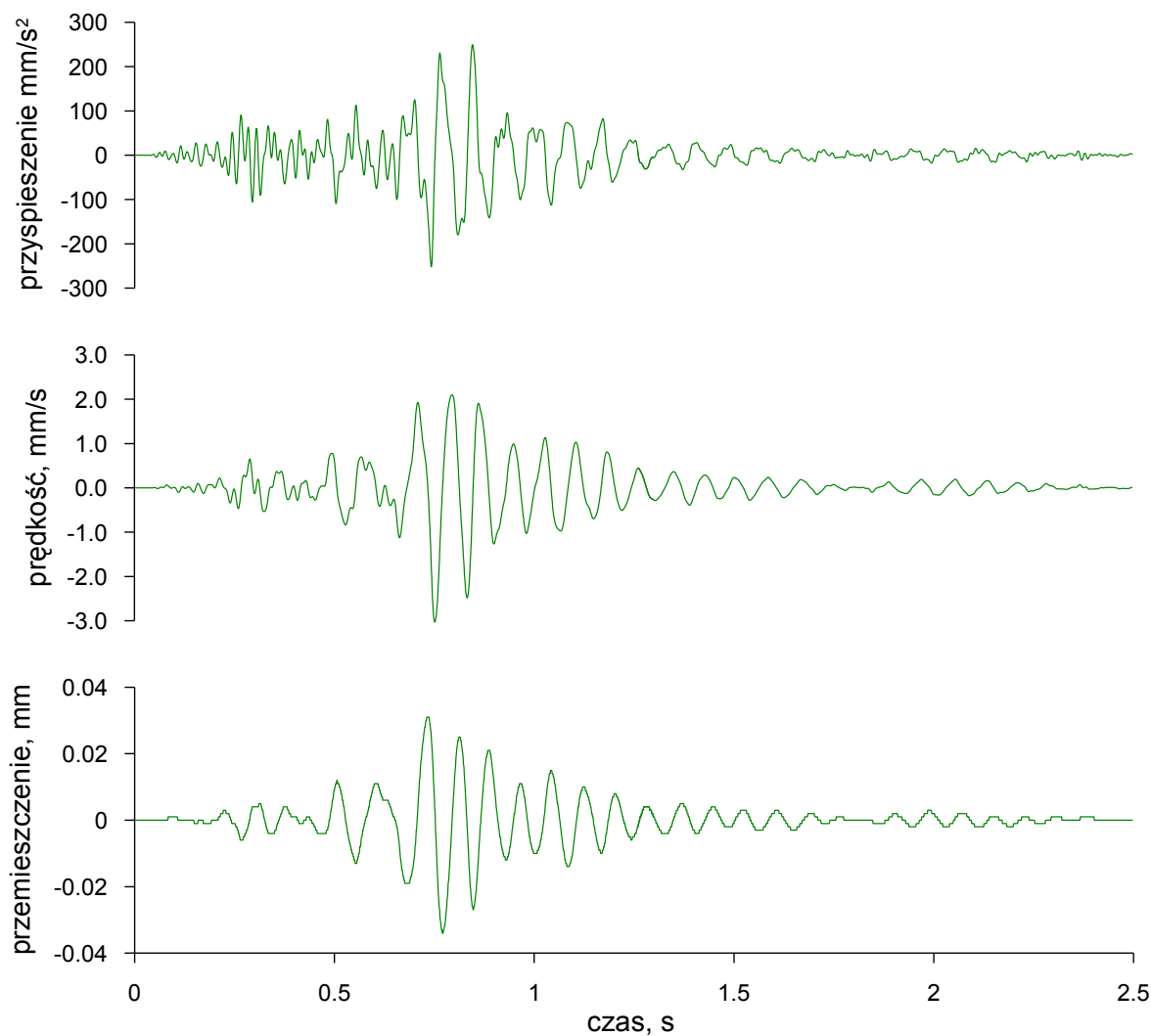
Generalnie sygnały są ciągłe, przyjmujące pewne wartości w każdej chwili czasu. Odczytanie wartości chwilowej sygnału w sposób ciągły jednak jest niemożliwe i dlatego też odczyt wartości chwilowej następuje najczęściej w regularnych odstępach czasu. Jest to tak zwane próbkowanie sygnału (dyskretyzacja). Odstęp czasu pomiędzy dwoma sąsiednimi próbkami nazywa się okresem próbkowania, a jego odwrotność szybkością (częstotliwością) próbkowania. W wyniku próbkowania otrzymuje się sygnał, którego wartości są znane tylko w kolejnych, dyskretnych chwilach czasu (Wicher *at al.* 2005).

Próbkowanie sygnału jest tylko jednym z elementów przetwarzania analogowo – cyfrowego sygnału. Kolejnym istotnym elementem tego procesu jest tzw. kwantowanie sygnału. Kwantowanie sygnału polega na przyporządkowaniu wartościom chwilowym sygnału liczb z pewnego, ustalonego z góry zakresu. Zakres ten zależy od rozdzielczości przetwarzania. Kwantowanie niesie za sobą pewne błędy przetwarzania, których wartość zależy od rozdzielczości: im większa rozdzielczość, tym mniejszy błąd. W praktyce błędy te są pomijane jeśli tylko przetwarzanie jest większe, lub równe 16 bitów. Zatem sygnał drgań parasejsmicznych jest traktowany jako sygnał cyfrowy czyli sygnał dyskretny czasu dyskretnego (Rys.3.8).



**Rys. 3.8. Graficzne przedstawienie dyskretyzacji i kwantowania sygnału (Zieliński 2007)**

Drgania parasejsmiczne można określić mianem sygnałów jako wielkości mierzalne zmieniające się w czasie i niosące informacje o naturze badanego zjawiska, np. sejsmicznego związanego z detonacją materiału wybuchowego. Drgania opisuje zmiana położenia, prędkości, przyspieszenia cząstek ośrodka w przestrzeni w zależności od czasu. Najczęściej dokonuje się pomiaru jednej reprezentacji ruchu np. prędkości, a pomierzone sygnały przetwarza się (różniczkuje lub całkuje), co pozwala uzyskać pozostałe reprezentacje ruchu w domenie czas – przemieszczenie i czas – przyspieszenie (Rys. 3.9).



**Rys. 3.9. Przykładowy zapis prędkości drgań oraz jego przetworzenie (zróżniczkowanie i całkowanie)**

Drgania parasejsmiczne rejestrowane w określonych warunkach ich wystąpienia, wymagają bardzo indywidualnego podejścia i szczegółowych analiz (rozkład pewnej całości na składowe elementarne), w celu uzyskania jak największej ilości informacji zawartych w sygnale.

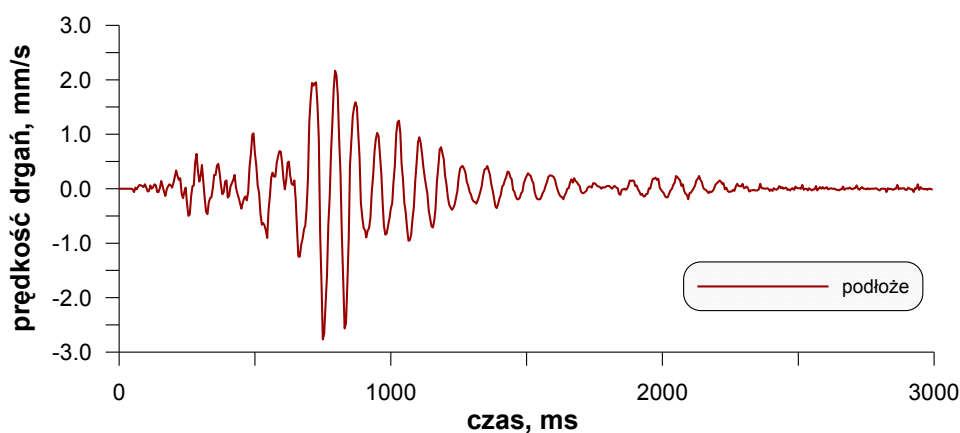
## 4. Wybrane metody analizy sygnałów

### 4.1. Najpopularniejsze metody analizy sygnału drgań parasejsmicznych

W celu lepszego scharakteryzowania struktury zarejestrowanych drgań (sygnałów) wykonuje się różnego rodzaju analizy, m. in.:

- analiza w dziedzinie czasu,
- analiza w dziedzinie częstotliwości – Transformacja Fouriera (*Fourier Transform*),
- filtrowanie sygnału czasowego – Analiza tercjowa,
- krótkoczasowa transformata Fouriera (STFT) – *Short Time Fourier Transform*
- analiza w dziedzinie czasu i częstotliwości – Transformata *falkowa* (*Wavelet Transform*),

Przebieg różnych sposobów analizy omówiono poniżej dla sygnału czasowego przedstawionego na rysunku 4.1.



Rys. 4.1. Oryginalny zarejestrowany sygnał

#### *Analiza w dziedzinie czasu*

Analiza tylko w dziedzinie czasu daje zbyt mało informacji o charakterystyce drgań. Każdy złożony sygnał w rzeczywistości składa się z wielu podstawowych przebiegów harmonicznym, czyli prostszych drgań opisanych przykładowo częstotliwościami. Takich informacji nie uzyska się opisując sygnał tylko na podstawie jego zapisu w czasie. Z takiej analizy otrzymuje się informacje o wartości maksymalnej mierzonego parametru np. prędkości drgań, tzw. *Particle Peak Velocity (PPV)*. Wartość *PPV* jest najczęściej brana pod uwagę przy opisywaniu intensywności drgań parasejsmicznych. Opierając się jednak tylko na *PPV* można

zawyżyć intensywność. Należałoby się więc zastanowić, czy w przypadku tak skomplikowanych drgań wartość *PPV* oddaje rzeczywisty ich charakter i stopień oddziaływania w otoczeniu. Dostępne aktualnie w górnictwie systemy inicjowania pozwalają na odpalanie dużych mas MW rozłożonych w dłuższym czasie. Również badania oddziaływania wstrząsów górniczych na zabudowania zlokalizowane na powierzchni wykazują istotny wpływ czasu trwania na stopień szkodliwości dla obiektów (Dubiński *at al.* 2009). Oznacza to, że analizy pomiarów drgań winny być prowadzone z uwzględnieniem czasu trwania, ich struktury i energii dyssypowanej w otoczeniu.

W pierwszej kolejności do opisu drgań zastosowano analizy częstotliwościowe pozwalające na badanie struktury drgań.

#### *Transformacja Fouriera (TF) - Fourier Transform*

Analiza w dziedzinie częstotliwości (tzw. analiza widmowa) pozwala głębiej poznać strukturę drgań (Ozimek 1985, Winzer 2004). Polega ona na dekompozycji oryginalnego sygnału (szeregu czasowego) na podstawowe funkcje sinus i cosinus o różnych częstotliwościach i określeniu, które z nich są najbardziej istotne w budowaniu obrazu drgań. Jedną z metod analizy sygnałów czasowych w dziedzinie częstotliwości jest ciągłe i dyskretne przekształcenie Fouriera. Wynikiem tego procesu jest transformata Fouriera zwana również całką Fouriera w postaci wykładniczej. Ciągła postać transformaty Fouriera jest zdefiniowana równaniem (4.1):

$$S(f) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \cdot e^{-j2\pi ft} dt \quad (4.1)$$

gdzie:

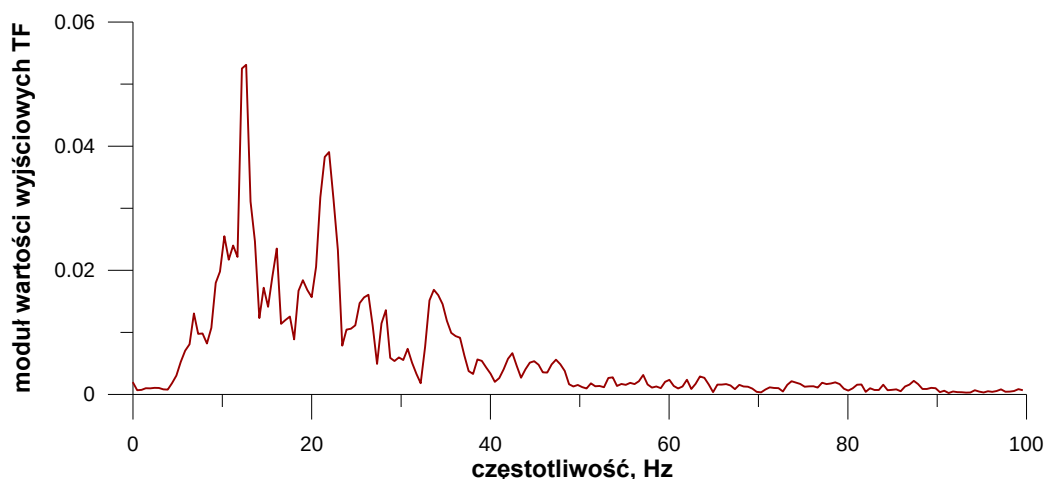
$j$  – jednostka urojona ( $j^2 = -1$ ),

$f$  – częstotliwość, Hz,

$t$  – czas, s.

Całka Fouriera przedstawia widmo amplitudowe funkcji  $s(t)$ , czyli ilustruje zależność amplitud poszczególnych składowych sygnału określonego funkcją  $s(t)$  od częstotliwości. Takie proste przekształcenie Fouriera pozwala na przeniesienie analizy sygnału opisanego funkcją  $s(t)$  z dziedziny czasu w dziedzinę częstotliwości.

Przebieg amplitudy w zależności od częstotliwości nazywa się widmem amplitudowym lub też spektrum częstotliwości (Rys. 4.2).



Rys. 4.2. Widmo amplitudowe przebiegu czasowego przedstawionego na rys. 4.1

Ponieważ w wyniku ciągłej  $TF$  uzyskuje się dużą ilość informacji, nie zawsze przydatnej, w praktyce stosuje się często dyskretną postać przekształcenia Fouriera, tzw. *Discrete Fourier Transform (DFT)*, opisaną równaniem (4.2):

$$S(m) = \sum_{n=0}^{N-1} s(n) \cdot e^{-\frac{j2\pi nm}{N}} \quad (4.2)$$

gdzie:

$S(m)$  – dyskretna transformata Fouriera w  $m$ -tym punkcie,

$N$  – liczba próbek wziętych do obliczenia  $DFT$ ,

$s(n)$  –  $n$ -ta próbka zdyskretyzowanego przebiegu w czasie,  $n \in [0, N-1]$

Jeżeli zastosowana zostanie zależność Eulera:

$$e^{j\Phi} = \cos(\Phi) - j\sin(\Phi) \quad (4.3)$$

wówczas równanie (4.2) przyjmie postać:

$$S(m) = \sum_{n=0}^{N-1} s(n) \cdot [\cos(2\pi nm/N) - j \cdot \sin(2\pi nm/N)] \quad (4.4)$$

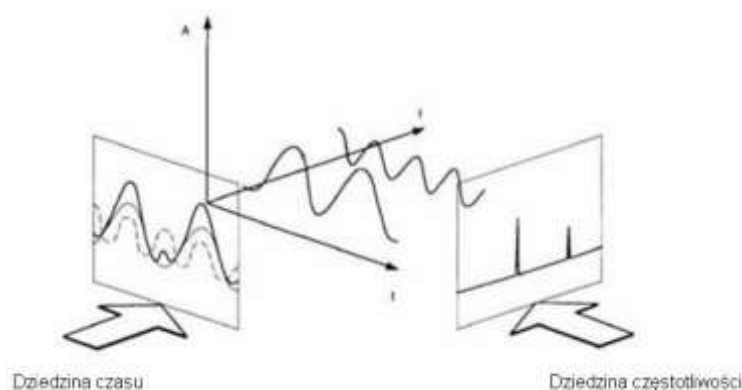
Ta postać równania opisuje rozkład sygnału na sumę przebiegów cosinusoidalnych i sinusoidalnych (4), determinując częstotliwości biorące udział w budowie danego sygnału. Analiza widmowa służy więc do badania struktury harmonicznego szeregu czasowego.

Niestety analiza sygnału za pomocą  $TF$  ma istotną wadę - przedstawia sygnał w postaci składowych harmonicznym dając informację o występujących częstotliwościach, ale równocześnie zatracą informację o czasie występowania tych częstotliwości w sygnale.



Chcąc przejść do postaci sygnału w dziedzinie czasu należy wykonać odwrotną transformatę Fouriera, ale wtedy traci się informacje o zawartych w sygnale częstotliwościach. Nie jest to zatem metoda dająca w pełni zadowalające wyniki.

Niedostatki analiz prowadzonych albo w dziedzinie czasu albo dziedzinie częstotliwości przyczyniły się do poszukiwania metod, które analizowałyby oba parametry jednocześnie (Rys. 4.3).



**Rys. 4.3. Schemat ideowy analizy sygnałów (Winek 2009)**

Konieczność stosowania bardziej szczegółowych analiz zauważył już Onderka (2001), który napisał:

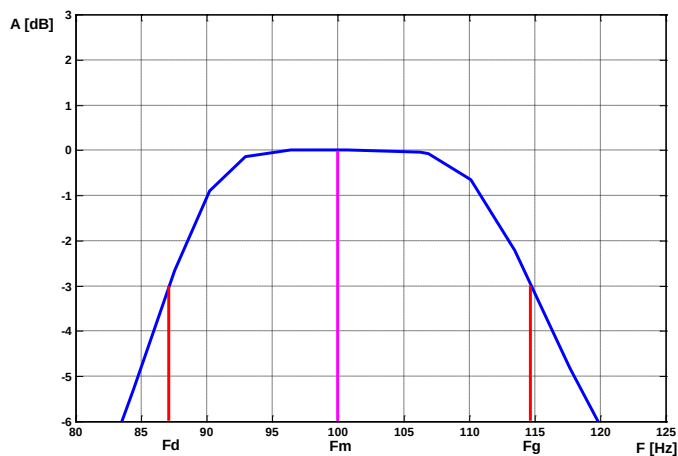
*„(...) Dotychczas uważano, że energię fal wystarczająco cechuje częstotliwość o największej wadze wyznaczona przez analizę widmową całego toru pomiarowego. Analiza taka wykonana na przykład metodą szybkiej transformacji Fouriera (FFT) pozwala na wniknięcie w strukturę sejsmogramu, wyodrębnienie istotnych częstotliwości oraz rozkładu energii w widmie. (...). Pewną wadą takiej analizy jest trudność w określeniu „czasu oddziaływania”. Może się bowiem okazać, że jedna duża amplituda przy danej częstotliwości może być mniej szkodliwa dla budynku niż kilka mniejszych amplitud przy innej częstotliwości, a taki wpływ „czasu” nie jest widoczny z tej analizy. (...)”*

#### *Filtrowanie sygnału czasowego – analiza tercjowa*

Kolejnym rodzajem analizy, umożliwiającym poznanie struktury częstotliwościowej sygnału, jest filtrowanie sygnału, wykonywane między innymi z wykorzystaniem filtrów tercjowych.

W wyniku filtrowania, sygnał pomiarowy rozkładany jest na elementy składowe zawarte w określonych pasmach częstotliwości. Filtr pasmowoprzepustowy przenosi tylko pewne określone częstotliwości tłumiąc pozostałe. Występują tu trzy charakterystyczne wielkości:

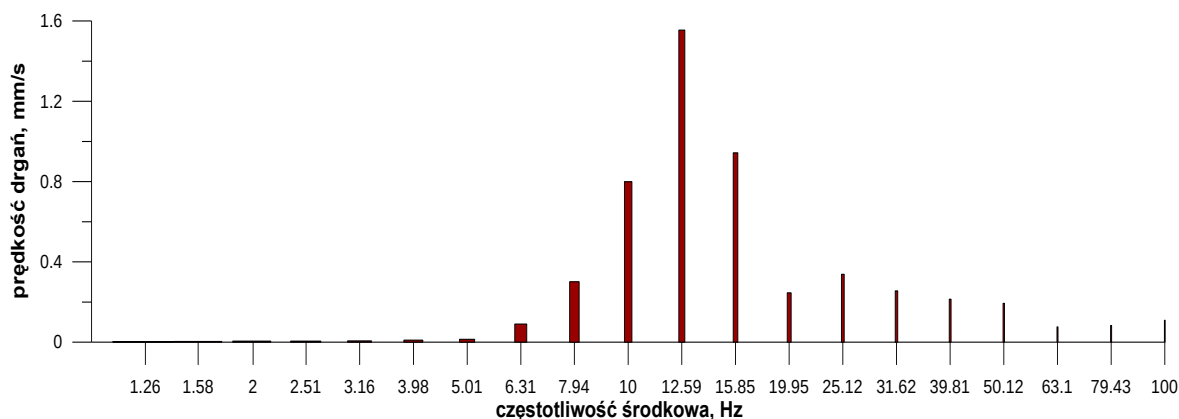
częstotliwość środkowa  $f_m$ , dolna częstotliwość graniczna  $f_d$  oraz górna częstotliwość graniczna  $f_g$  (rys. 4.4).



Rys. 4.4. Filtr pasmowoprzepustowy (Winzer 2004)

Odległość pomiędzy dolną i górną częstotliwością graniczną nosi nazwę szerokości pasma filtru.

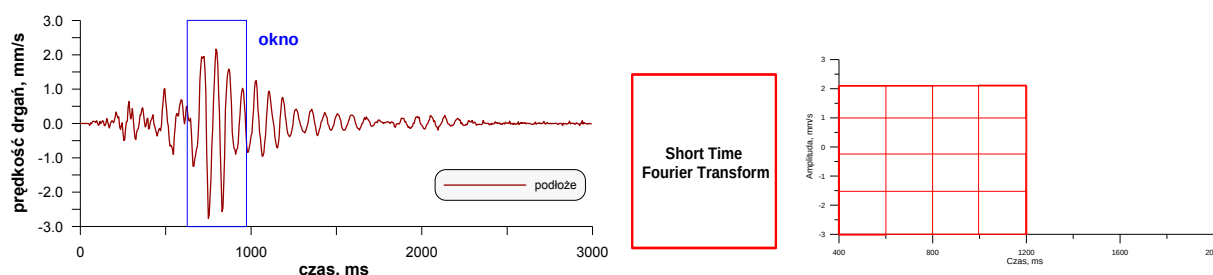
Filtrowanie sygnału zestawem filtrów pasmowoprzepustowych pozwala na rozdzielanie całego pasma sygnału na mniejsze pasma i analizowanie sygnału tylko w danym zakresie częstotliwości. W przypadku filtrowania tercjowej stosuje się filtry o stałym współczynniku szerokości pasma, a częstotliwość środkowa jest wielkością znormalizowaną, określoną normą PN-EN 61260:2000. W wyniku takiego filtrowania z jednego przebiegu czasowego otrzymuje się cały zestaw przebiegów umożliwiających czasową analizę w wybranych częstotliwościach, na co nie pozwala transformata Fouriera (rys. 4.5).



Rys. 4.5. Przykład efektu filtrowania tercjowego przebiegu czasowego przedstawionego na rysunku 4.1

### Krótkoczasowa transformata Fouriera (STFT) – Short Time Fourier Transform

Kolejną metodą opisywania struktury sygnałów w dziedzinie czasu i częstotliwości, znacznie dokładniejszą od filtracji sygnału jest krótkoczasowa transformata Fouriera (STFT) opracowana w 1946 roku przez Dennisa Gabora, który próbując poprawić niedoskonałości transformaty Fouriera przystosował ją do analizy tylko małego fragmentu sygnału w czasie (Tariov 2009). Proces ten zwany jest okienkowaniem sygnału. Analiza STFT polega na wycinaniu kolejnych odcinków sygnału za pomocą funkcji okna i obliczaniu ich transformat Fouriera (Rys. 4.6).



Rys. 4.6. Schemat ideowy Short – Time Fourier Transform

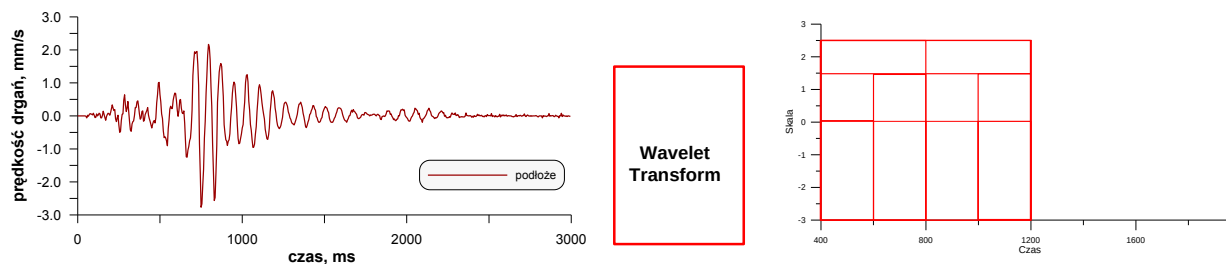
Należy jednak zaznaczyć, że STFT dostarcza informacji z ograniczoną dokładnością o tym kiedy i jakie częstotliwości wystąpiły w danym sygnale. To ograniczenie wynika z niedogodności STFT jaką jest jednokrotnie dobierana szerokość okna analizy, która jest taka sama dla wszystkich częstotliwości. Szerokie okno oznacza dużą rozdzielczość częstotliwościową ale niewielką w czasie. Ponadto, wysokie częstotliwości będą charakteryzowane w czasie wciąż z tą samą precyzją. Z kolei zbyt wąskie okno uniemożliwia wykrycie niższych częstotliwości obecnych w sygnale. Niestety dobór szerokości okna analizy odbywa się na zasadzie prób i błędów.

Sygnały niestacjonarne mają bardzo zróżnicowany charakter i w związku z tym wymagają bardziej elastycznego podejścia. Umożliwia to kolejna metoda przetwarzania sygnałów, transformata falkowa.

### Transformata falkowa – Wavelet Transform

Transformata falkowa to następny krok w analizie sygnałów, wykorzystująca również technikę okienkowania (ang. *windowing*), ale okna analizy są różnej długości i częstotliwości (Tariov 2009).

Analiza falkowa pozwala na stosowanie długich interwałów czasowych, kiedy zachodzi potrzeba wychwycenia dokładniejszych informacji o niskich częstotliwościach i krótszych obszarów, kiedy potrzebne są informacje wysokoczęstotliwościowe (rys. 4.7).



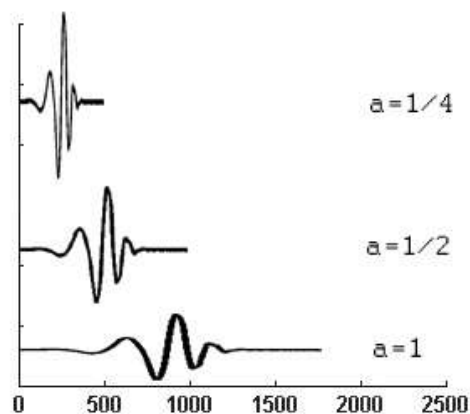
**Rys. 4.7. Schemat ideowy Wavelet Transform**

Transformata falkowa przedstawia sygnał jako sumę funkcji bazowych zwanych falkami. Falka stanowi funkcję okna w analizie falkowej i jest kształtem fali o ograniczonym okresie, którego wartość średnia jest równa zero. Cechą falki jest także ograniczone pasmo częstotliwości (rys. 4.8).



**Rys. 4.8. Schemat funkcji bazowej - falki**

Falka charakteryzuje się dwoma podstawowymi parametrami, tj. współczynnikiem skali  $a$  i przesunięcia (translacji)  $b$ . Współczynnik skali powoduje zmianę czasu trwania falki, innymi słowy jej „ściskanie” lub „rozciąganie” (Rys. 4.9). Natomiast współczynnik translacji oznacza przesuwanie falki wzdłuż sygnału w dziedzinie czasu przy ustalonym współczynniku skali, czyli opóźnienie lub przyspieszenie początku falki (Rys. 4.10). Analiza falkowa nie zawiera więc obszaru czasowo – częstotliwościowego, lecz obszar: czas – skala.



Rys. 4.9. Przykład zmiany współczynnika skali falki



Rys. 4.10. Przykład zmiany współczynnika przesunięcia (translacji) falki

Co decyduje o tym, że analiza falkowa zaliczana jest do analiz czasowo – częstotliwościowych, skoro opisuje ona obszar czas - skala ?

Odpowiedź na to pytanie daje ciągła (jak również dyskretna) transformata falkowa.

Przykładowo, w ciągłej transformacie Falkowej, funkcja falkowa, wchodząca w skład rodziny falek, tworzona jest z falki podstawowej według równania (4.5):

$$\psi_{ab}(t) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \cdot \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (4.5)$$

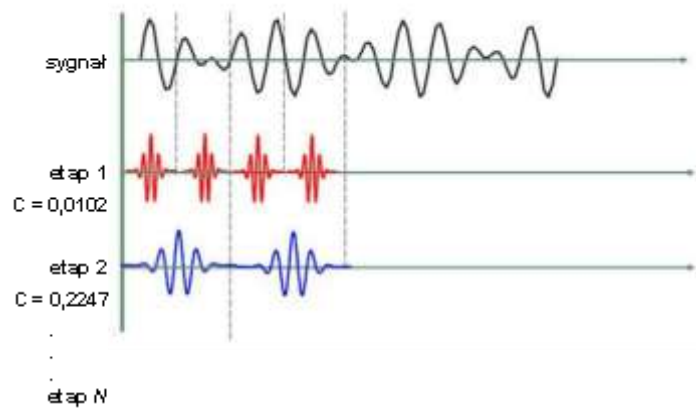
gdzie:

- $a$  – współczynnik skali,
- $b$  – współczynnik przesunięcia (translacji),
- $\frac{1}{\sqrt{|a|}}$  – czynnik, który zapewnia, że energia falki nie zmienia się ze zmianą skali (służy normalizacji energii).

Ciągła transformata falkowa (CWT) sygnału  $s(t)$  zdefiniowana jest jako iloczyn skalarny sygnału i falki co wyraża zależność (4.6):

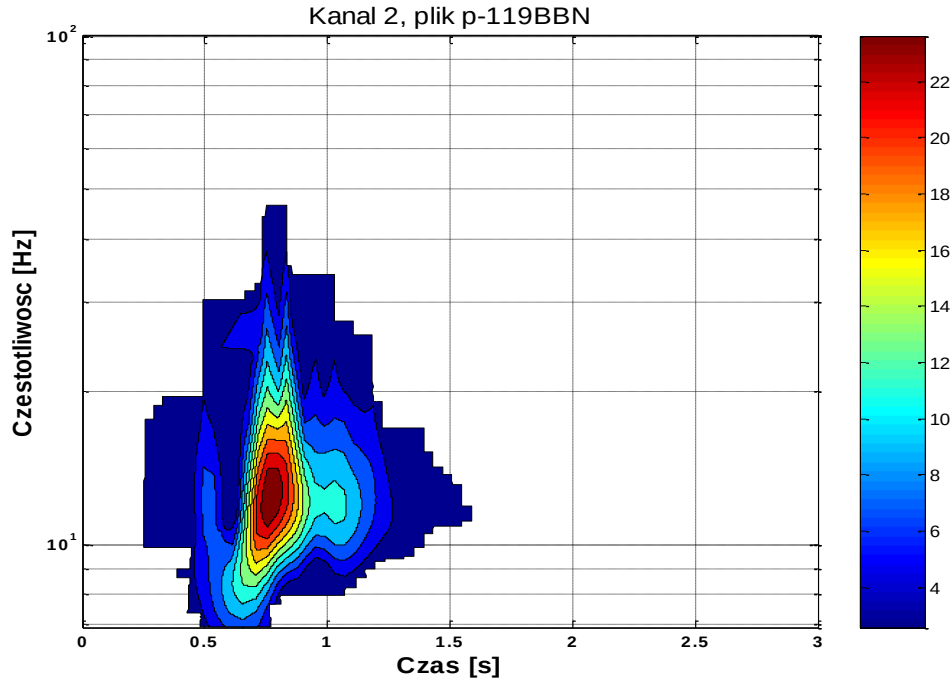
$$CWT_s^\Psi(a,b) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \cdot \Psi_{ab}^*(t) dt = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \cdot \Psi^*\left(\frac{1-b}{a}\right) dt \quad (4.6)$$

W wyniku dopasowywania falki do sygnału otrzymuje się szereg współczynników falkowych  $C$ , które określają stopień korelacji zastosowanej falki z sygnałem. Proces aproksymacji falki do sygnału przedstawia rysunek 4.11:



**Rys. 4.11. Proces aproksymacji falki do zarejestrowanego sygnału (Tariov 2009)**

Na rysunku 4.11 widać, że w pierwszym etapie, przyjęta falka została porównana do oryginalnego sygnału i obliczony został współczynnik falkowy  $C = 0,0102$ . W drugim etapie falka została przesunięta w czasie i zwiększony został również współczynnik skali przez co falka jest bardziej rozciągnięta i znów obliczono współczynnik  $C = 0,2247$ . Po ukończeniu wyznaczania  $CWT$  uzyskuje się współczynniki dla różnych skal i różnych części sygnału (Rys. 4.12). Im większa wartość współczynnika falkowego  $C$  tym lepsze dopasowanie falki do sygnału. W transformacie falkowej przyjmuje się, że im wyższa skala, tym falka jest szersza i opisuje ona niższe pasmo częstotliwości oraz będzie porównywana z dłuższym fragmentem sygnału. Dzięki powiązaniu skali z częstotliwością możliwe jest lokalizowanie w czasie, występujących w sygnale częstotliwości.



Rys. 4.12. Mapa współczynników falkowych  $C$  dla sygnału czasowego przedstawionego na rysunku 4.1

Niski współczynnik skali  $a$  powoduje, że falka jest „ściśnięta” i lokalizuje wyższe częstotliwości w sygnale, natomiast wysoki współczynnik skali powoduje „rozciągnięcie” falki i charakteryzowanie niższych częstotliwości zawartych w sygnale.

W przypadku transformaty falkowej należy zauważyć, że do sygnału rzeczywistego zarejestrowanego przez aparaturę pomiarową, dopasowywana jest zawsze jedna falka z całego zestawu, której zmieniają się tylko współczynniki skali i translacji.

## 4.2. Analiza czasowo-częstotliwościowa Matching Pursuit (MP)

Najnowszą analizą czasowo – częstotliwościową drgań jest metoda pogoni za dopasowaniem (ang. *Matching Pursuit*) (Durka 2004, Mallat i Zhang 1993). Istotą tego algorytmu jest dekompozycja sygnału za pomocą funkcji określanych atomami czasowo – częstotliwościowymi, wybieranymi z obszernego zbioru zwanego słownikiem Gabora, stąd w praktyce używane jest pojęcie atomów Gabora. Proces dekompozycji ma charakter iteracyjny i polega na jak najlepszym dopasowaniu atomów Gabora do poszczególnych fragmentów sygnału i tym samym na precyzyjnym odzwierciedleniu jego cech. Zaletą metody MP, wyróżniającą ją spośród innych dotychczas stosowanych jest to, że fragment sygnału, do którego dopasowany został dany atom, zostaje odejty od całości, a kolejne atomy dopasowują się do reszty

sygnału pozostałej po odjęciu wyniku poprzedniej iteracji. Dzięki temu unika się zbędnego, wielokrotnego opisywania tych samych fragmentów sygnału.

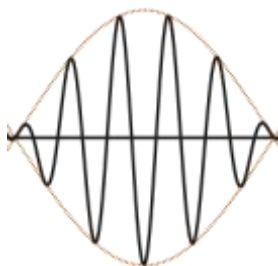
Myśli można wyrazić za pomocą niewielu podstawowych słów, ale zbyt ubogi słownik może sprawić, że nie będzie to dość precyzyjne. Podobnie jest przy analizowaniu sygnałów, można je opisać kilkoma funkcjami, ale może być to niedokładne, dlatego lepiej skorzystać z obszernego zestawu funkcji, z którego wybrane zostaną te najlepiej oddające cechy sygnału. Najbardziej optymalne rozwiązanie uzyskuje się wtedy, gdy elementy słownika funkcji wyjaśniają największy procent energii sygnału. Wybór takiej reprezentacji daje właśnie algorytm MP. Algorytm ten zakłada dekompozycję sygnału za pomocą funkcji, zwanych atomami czasowo – częstotliwościowymi, wybranych z słownika  $G = \{g_1(t), g_2(t), \dots, g_n(t)\}$ . Pojęcie atomu należy definiować jako elementarną część sygnału, której zadaniem jest jak najlepsze odzwierciedlenie cech sygnału. Atom ten można wyrazić jako pojedynczą funkcję okna  $g(t)$ , poprzez skalowanie  $a$ , translację  $b$  oraz modulację częstotliwościową  $\xi$  (4.7) (Wawrzyniak 2007).

$$g_I(t) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \cdot g\left(\frac{t-b}{a}\right) \cdot e^{i\xi t} \quad (4.7)$$

gdzie:

- $I$  – indeks określający zestaw parametrów danego atomu,  $I = (a, b, \xi)$
- $a$  – współczynnik skali,
- $b$  – współczynnik przesunięcia (translacji),
- $\xi$  – modulacja częstotliwościowa,
- $e^{i\xi t}$  – zespolona funkcja wykładnicza.

W praktyce stosuje się słownik Gabora, zawierający atomy Gabora, czyli funkcje Gaussa modulowane sinusem (Rys. 4.13).



**Rys. 4.13. Schemat atomu Gabora**



W przypadku sygnałów cyfrowych można posługiwać się dyskretnym słownikiem Gabora (4.8):

$$g_{(\gamma, \phi)}(n) = K_{(\gamma, \phi)} \cdot g_j(n - p) \cdot \cos\left(2\pi \frac{k}{N} \cdot n + \phi\right) \quad (4.8)$$

gdzie:

- $n$  – dyskretna oś czasu.
- $\gamma$  –  $\gamma = (j, p, k)$  - dyskretny odpowiednik indeksu  $I = (a, b, \xi)$
- $K_{(\gamma, \phi)}$  – czynnik będący amplitudą funkcji okna, dobrany tak, aby  $\|g_{(\gamma, \phi)}\| = 1$ ,
- $j$  – oktawa, która określa szerokość atomu w czasie,
- $p$  – położenie środka obwiedni atomu,
- $k$  – częstotliwość modulacji atomu, Hz,
- $\phi$  – faza,  $\phi \in [0, 2\pi)$ ,
- $N$  – liczba próbek.

W pierwszym etapie dekompozycji wybierana jest funkcja  $g_{I_0}$  najlepiej dopasowana do sygnału  $s$  i dająca z nim największy iloczyn skalarny. W każdym następnym kroku iteracji funkcja  $g_{I_n}$  jest dopasowywana do reszty (residuum) sygnału  $R^n s$ , pozostałej po odjęciu wyniku poprzedniej iteracji. Po  $m$  - iteracjach algorytmu MP sygnał  $s$  można wyrazić jako sumę residuów (4.9):

$$s = \sum_{n=0}^{m-1} \langle R^n s, g_{I_n} \rangle g_{I_n} + R^m s \quad (4.9)$$

W miarę dekompozycji sygnału liczba dopasowujących się atomów jest wyczerpywana, a residua zawierają coraz mniej energii. Proces aproksymacji atomów do sygnału nie trwa w nieskończoność. Algorytm MP jest zatrzymywany, gdy zostanie wyjaśniony satysfakcjonujący procent energii np. 95% energii sygnału, pozostała reszta nazywana jest wtedy błędem aproksymacji (np. szum występujący w sygnale).

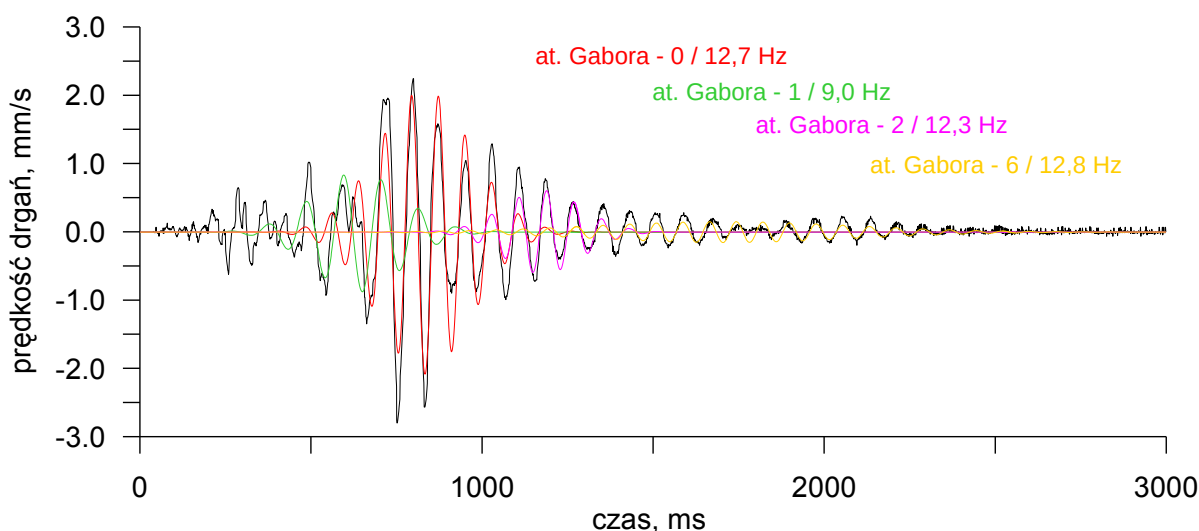
Bardziej wnikliwa analiza energetycznego charakteru sygnałów jest niezwykle istotna w odniesieniu do drgań wzbudzanych robotami strzałowymi prowadzonymi w odkrywkowych zakładach górniczych. Często dochodzi do zjawiska nagłego wzmocnienia drgań w większej odległości od miejsca wykonywania robót strzałowych, co nasuwa konieczność identyfikacji takich przyczyn.

Biorąc pod uwagę wcześniej opisane metody analizy sygnałów oraz najnowszą - *Matching Pursuit* można wykonać mapy energetyczne drgań dla otoczenia wyrobisk, w których prowa-

dziane są prace z użyciem materiałów wybuchowych. Wybór odpowiedniej metody pozostaje otwarty.

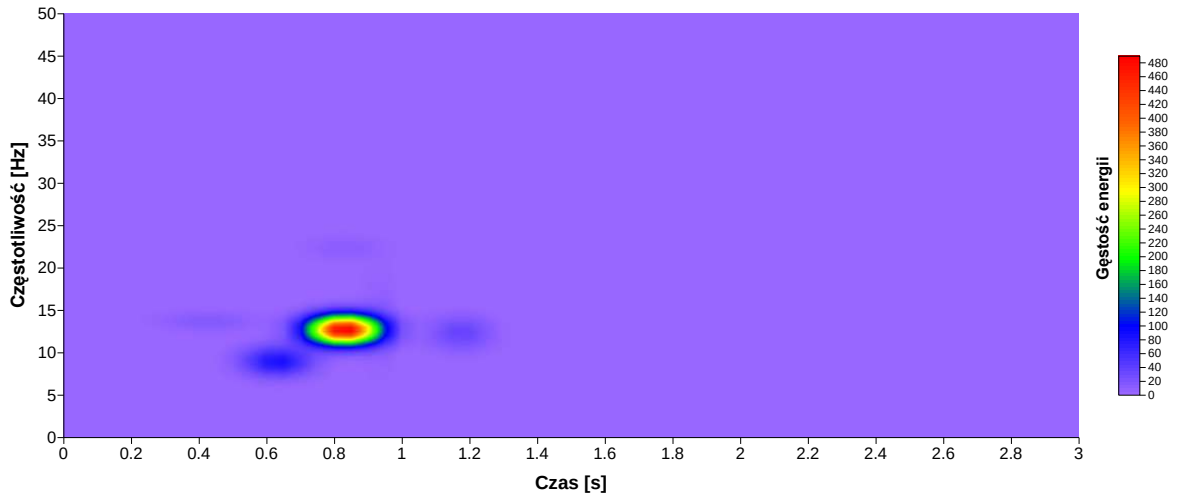
W przypadku *STFT* nie ma możliwości doboru dowolnego rozmiaru okna analizy, co daje słabą rozdzielczość czasowo – częstotliwościową. W transformacie falkowej dopasowanie funkcji, jaką jest falka, do rzeczywistego sygnału jest lepsze, aczkolwiek w odniesieniu do krótkich struktur. Jak już wcześniej wspomniano, falki mogą mieć zmieniany współczynnik skali i translacji, ale zawsze dopasowywane są do tego samego sygnału, przez co niektóre jego fragmenty mogą być opisywane wielokrotnie (np. długi sinus) i wartości iloczynów skalarnych takiego sygnału z wieloma falkami będą duże. Stosując natomiast do analizy drgań algorytm MP unika się zbędnego wielokrotnego charakteryzowania tych samych fragmentów sygnału. Daje to bardziej precyzyjny obraz energetyczny struktury drgań w dziedzinie czasu i częstotliwości.

Dla przykładu na rysunku 4.14 przedstawiono cztery atomy Gabora, które dopasowały się do poszczególnych fragmentów zarejestrowanego sygnału. Widoczne na rysunku atomy o numerach 0, 1, 2 i 6 wyjaśniły kolejno 73,7%, 12,6%, 5,3% i 1,1% energii sygnału. Pozostałe, dopasowane do sygnału, atomy (nr 3, 4, 5, i 7) zostały pominięte aby nie zaciemniać rysunku.



**Rys. 4.14. Atomy Gabora dopasowywane do przebiegu przedstawionego na rysunku 4.1**

Wyniki analizy metodą dopasowania krokowego przedstawiane są jako rozkład energii uzyskany za pomocą dystrybucji Wignera, zwany również mapą Wignera (Rys. 4.15).

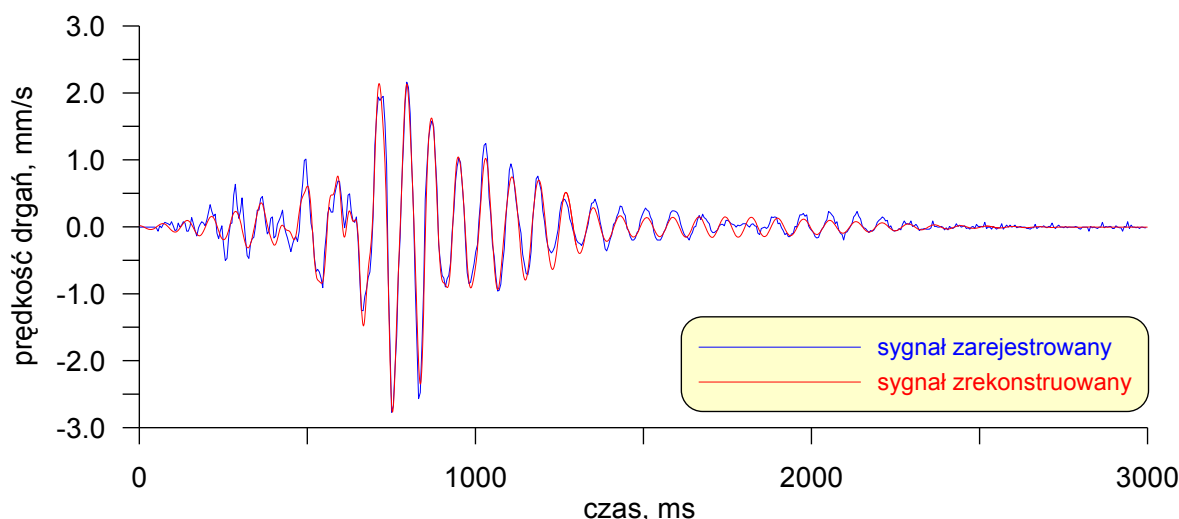


**Rys. 4.15. Mapa Wignera dla przebiegu czasowego z rysunku 4.1**

Na mapie Wignera prezentowane są atomy Gabora (w postaci kolorowych plamek – „blobs”), które dopasowując się do sygnału rzeczywistego zrekonstruowały go i wyjaśniły ok. 95% jego energii. Jak widać z rysunku 4.15, atomy Gabora dają możliwość zlokalizowania w czasie charakterystycznych częstotliwości mających istotne znaczenie w budowie danego sygnału. Intensywność kolorów poszczególnych atomów oznacza gęstość energii jaką reprezentują w różnych pasmach częstotliwości. Suma energii dopasowanych atomów czasowo – częstotliwościowych daje energię sygnału, zgodnie z zasadą zachowania energii (4.10):

$$\|s\|^2 = \sum_{n=0}^{m-1} \left| \langle R^n s, g_{\gamma n} \rangle \right|^2 + \|R^m s\|^2 \quad (4.10)$$

W celu wykazania stopnia dokładności rekonstrukcji rzeczywistego sygnału przez atomy Gabora, na rysunku 4.16 przedstawiono rzeczywisty zapis drgań z rys. 4.1 (kolor niebieski) i naniesiony na niego sygnał zrekonstruowany (kolor czerwony). Jak widać występujące różnice są niewielkie, zwłaszcza w początkowej fazie po wzbudzeniu sygnału, co świadczy o bardzo precyzyjnym dopasowaniu się atomów czasowo – częstotliwościowych do sygnału i dokładnym odtworzeniu jego cech. Nie wyklucza się, że w rejestrowanych sygnałach mogą pojawiać się zakłócenia (np. szum), powodujące powstawanie pewnych różnic między sygnałem rzeczywistym a zrekonstruowanym. Jak już wcześniej wspomniano, w procesie aproksymacji atomów Gabora do oryginalnego zapisu drgań, reszta pozostała po  $m$ -iteracjach, przy której następuje zatrzymanie algorytmu MP zwana jest błędem aproksymacji, którym może być właśnie szum.



**Rys. 4.16. Porównanie rzeczywistego przebiegu czasowego z rysunku 4.1 i jego rekonstrukcji za pomocą atomów Gabora**

W wyniku zastosowania tej metody do analizy sygnału drgań wzbudzanych użyciem MW, można dokonać szczegółowej identyfikacji parametrów opisujących drgania, a mianowicie częstotliwości, czasu jej trwania i odpowiadającej jej amplitudzie (prędkości drgań). W przypadku analiz stosowanych do tej pory nie było możliwe tak dokładne i jednocześnie określenie wszystkich parametrów. Przykładowo, na podstawie uzyskanych wyników można wykonać analizy pozwalające identyfikować różnice jakości podłoża pod obiektami, w źródle drgań czy jakości ośrodka, w którym wykonywane są roboty strzałowe, lub rodzaj zastosowanego opóźnienia i ich wpływ na strukturę rejestrowanych drgań (Pyra 2010, Sołtys i Pyra 2010).

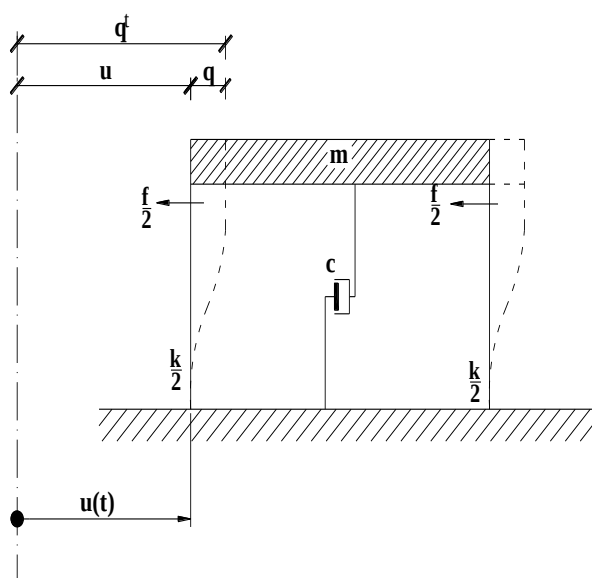
### 4.3. Spektrum odpowiedzi i jego zastosowanie

Metoda spektrum odpowiedzi jest znana już od roku 1926, kiedy to po raz pierwszy została użyta przez Suyehiro do opisu trzęsienia ziemi, które miało miejsce w Tokio w 1923 roku (Chopra 2007). Od roku 1960 spektrum odpowiedzi zostało dopracowane i zaczęto używać go na szeroką skalę w sejsmologii do analizowania trzęsień ziemi (Chopra 2007, Riddel 2008). Na początku obliczane było tylko przemieszczeniowe spektrum odpowiedzi, jednak z czasem doszło również przyspieszeniowe i prędkościowe (Malhotra 2001). Metoda spektrum odpowiedzi znalazła szereg zastosowań, począwszy od drgań wzbudzanych przy trzęsieniach ziemi, następnie została zaadaptowana i wykorzystywana do określania sił bezwładności generowanych ruchem podłoża powstałym na skutek wstrząsów górniczych. Metoda znajduje również zastosowanie do analizy drgań powstałych na skutek ruchu komunikacyjnego.

### 4.3.1. Charakterystyka metody spektrum odpowiedzi

Spektrum odpowiedzi stanowi podstawę do wyznaczania sił bezwładności generowanych ruchem podłoża.

Spektrum odpowiedzi (Chang 1997, Chmielewski i Zembaty 1998, Ciesielski *et al.* 1993, Maciąg 1979, Malhotra 2001, Tatar 2002) to zależność maksymalnych amplitud drgań oscylatora o jednym stopniu swobody dynamicznej, poddanego wymuszeniu kinematycznemu w postaci drgań podłoża  $u(t)$ , od okresu drgań własnych i tłumienia tego oscylatora (Rys. 4.17).



Rys. 4.17. Układ o jednym stopniu swobody poddany wymuszeniu kinematycznemu (Chmielewski i Zembaty 1998)

Równanie ruchu takiego układu można zapisać, jako (4.11):

$$m\ddot{q}^t + c\dot{q} + kq = 0 \quad (4.11)$$

gdzie:

- $q$  – przemieszczenie względne,
- $q^t$  – przemieszczenie całkowite,
- $m$  – masa drgająca,
- $c$  – tłumienie oscylatora,
- $k$  – sztywność sprężyny oscylatora,

Podstawiając do równania (4.11)  $q^t = u + q$ , gdzie  $u$  jest zadany wymuszeniem podłoża, otrzymamy:

$$m(\ddot{u} + \ddot{q}) + c\dot{q} + kq = 0 \quad (4.12)$$

stąd:

$$m\ddot{q} + c\dot{q} + kq = -m\ddot{u}(t) \quad (4.13)$$

Następnie dzieląc obie strony równania (13) przez masę  $m$ , otrzymując:

$$\ddot{q} + \frac{c}{m}\dot{q} + \frac{k}{m}q = -\ddot{u}(t) \quad (4.14)$$

Jeżeli:

$$\frac{k}{m} = \omega^2 \quad (4.15)$$

$$\frac{c}{m} = 2D\omega \quad (4.16)$$

gdzie:

$\omega$  – kołowa częstotliwość drgań własnych oscylatora,

$D$  – ułamek tłumienia krytycznego.

to:

$$\ddot{q} + 2D\omega\dot{q} + \omega^2q = -\ddot{u}(t) \quad (4.17)$$

Rozwiązaniem równania (4.17) jest całka Duhamela:

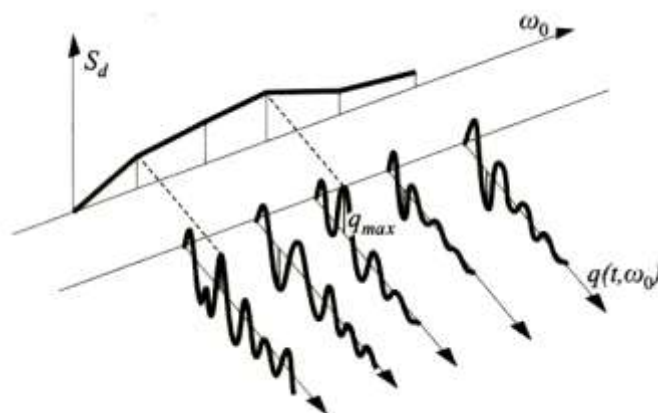
$$q(t, \omega, D) = -\frac{1}{\omega\sqrt{1-D^2}} \int_0^t \ddot{u}(\tau) e^{-\omega D(t-\tau)} \sin \omega \sqrt{1-D^2}(t-\tau) d\tau \quad (4.18)$$

Można zauważyć, że całka ta opisuje splot zarejestrowanego sygnału z funkcją sinusa i eksponentą, którą można zapisać:

$$q(t, \omega, D) = -\frac{1}{\omega\sqrt{1-D^2}} \ddot{u}(t) * \left\{ e^{-\omega D t} \sin \left( \omega \sqrt{1-D^2} t \right) \right\} \quad (4.19)$$

Oscylator o jednym stopniu swobody, o różnych częstotliwościach kołowych drgań własnych  $\omega_0$ , poddawany jest wymuszeniu w postaci pewnego akceleroogramu ruchu podłoża, przy tym samym ułamku tłumienia krytycznego  $D$ . Dla konkretnej częstotliwości kołowej na wykresie, zamieszcza się bezwzględną wartość maksymalnego przemieszczenia względnego masy oscylatora  $\max |q(t)|$  (Rys. 4.18). Częstotliwość kołowa ( $\omega=2\pi f$  lub  $\omega=2\pi/T$ ) może być

przeliczona na częstotliwość  $f [Hz]$  lub okres drgań własnych  $T [s]$ . Wówczas wykres może być przedstawiany w zależności od jednego z tych parametrów.



Rys. 4.18. Schemat tworzenia przemieszczeniowego spektrum odpowiedzi (Chmielewski i Zembaty 1998)

Maksymalne względne przemieszczenie drgań masy oscylatora, w zależności od okresu drgań własnych i tłumienia, nazywa się względnym przemieszczeniowym spektrum odpowiedzi:

$$S_d(\omega, D) = \max_t |q(t, \omega, D)| \quad (4.20)$$

W analogiczny sposób wyznacza się prędkościową odpowiedź oscylatora. Z pierwszej pochodnej całki Duhamela po czasie otrzymuje się amplitudy prędkości drgań oscylatora tłumionego. Wyznaczone maksymalne względne prędkości drgań oscylatorów o tej samej wartości ułamka tłumienia krytycznego zostają przyporządkowane okresowi drgań własnych oscylatorów i powstaje względne prędkościowe spektrum odpowiedzi (4.21):

$$S_{vp}(\omega, D) = \max_t |\dot{q}(t, \omega, D)| \quad (4.21)$$

Pierwszą pochodną przemieszczenia drgań oscylatora można zapisać jako:

$$q(t, \omega, D) = \frac{D}{\sqrt{1-D^2}} \ddot{u}(t) * \left\{ e^{-\omega D t} \sin \left( \omega \sqrt{1-D^2} t \right) \right\} - \ddot{u}(t) * \left\{ e^{-\omega D t} \cos \left( \omega \sqrt{1-D^2} t \right) \right\} \quad (4.22)$$

Bezwzględny przyspieszeniowy spektrum odpowiedzi jest rozkład maksymalnych bezwzględnych przyspieszeń mas oscylatorów o tej samej wartości ułamka tłumienia krytycznego, w zależności od okresu drgań własnych oscylatorów w odpowiedzi na drgania podłoża:

$$S_{ar}(\omega, D) = \max_t |\ddot{q}(t, \omega, D) + \ddot{u}(t)| \quad (4.23)$$

Zależność (4.23) można wyliczyć korzystając z zależności (4.17):

$$\ddot{q}(t, \omega, D) = -2D\omega\dot{q}(t, \omega, D) - \omega^2 q(t, \omega, D) \quad (4.24)$$

Podobnie jak względne prędkościowe spektrum odpowiedzi tak i bezwzględne przyspieszeniowe spektrum odpowiedzi, korzystając z równań 4.19, 4.22, 4.24, można przedstawić w postaci splotów funkcji:

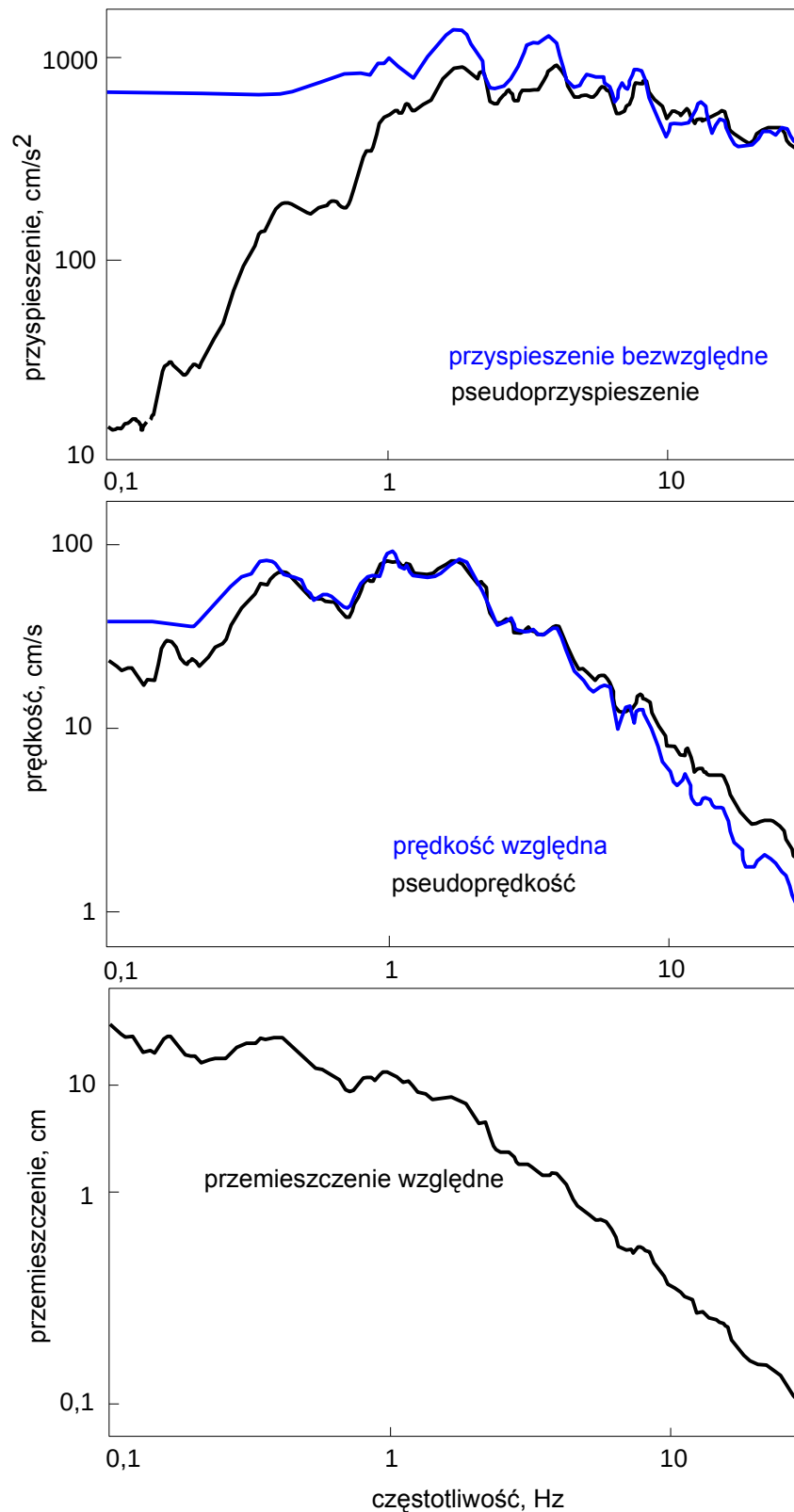
$$\begin{aligned} \ddot{q}(t, \omega, D) + \ddot{u}(t) = & \frac{\omega(1 - 2D^2)}{\sqrt{1 - D^2}} \ddot{u}(t) * \left\{ e^{-\omega D t} \sin\left(\omega \sqrt{1 - D^2} t\right) \right\} + \\ & + 2D\omega \ddot{u}(t) * \left\{ e^{-\omega D t} \cos\left(\omega \sqrt{1 - D^2} t\right) \right\} \end{aligned} \quad (4.25)$$

Sporządzone w ten sposób spektra można używać do określania maksymalnej odpowiedzi układu, o jednym stopniu swobody, dla zadanego zapisu ruchu podłoża (Chmielewski i Zembaty 1998). W praktyce wzory na względne prędkościowe i bezwzględne przyspieszeniowe spektrum odpowiedzi nie są często używane, ponieważ istnieje prosty sposób ich oszacowania na podstawie względnego przemieszczeniowego spektrum odpowiedzi. Otrzymane w ten sposób spektra odpowiedzi noszą nazwę pseudoprędkościowych i pseudoprzyspieszeniowych spektrów odpowiedzi, ponieważ są przybliżeniem sinusoidalnym, ale zmierzają do wartości rzeczywistych tym bardziej, im mniejsze jest  $D$  i są powiązane między sobą zależnością (4.26):

$$S_a(\omega, D) = \omega S_v(\omega, D) = \omega^2 S_d(\omega, D) \quad (4.26)$$

Na rysunku 4.19 przedstawiono spektra odpowiedzi obliczone dla akcelero grafu jednego z trzęsień ziemi i dla ułamka tłumienia krytycznego wynoszącego  $D = 0,05$ . Różnica jaka występuje między pseudoprędkościowym i względnym prędkościowym spektrum odpowiedzi nie jest duża i występuje w zakresie poniżej 1 Hz, natomiast dla bezwzględnego przyspieszeniowego i pseudoprzyspieszeniowego spektrum odpowiedzi różnice są już znaczne w zakresie częstotliwości 1 ÷ 4 Hz (Chmielewski i Zembaty 1998).

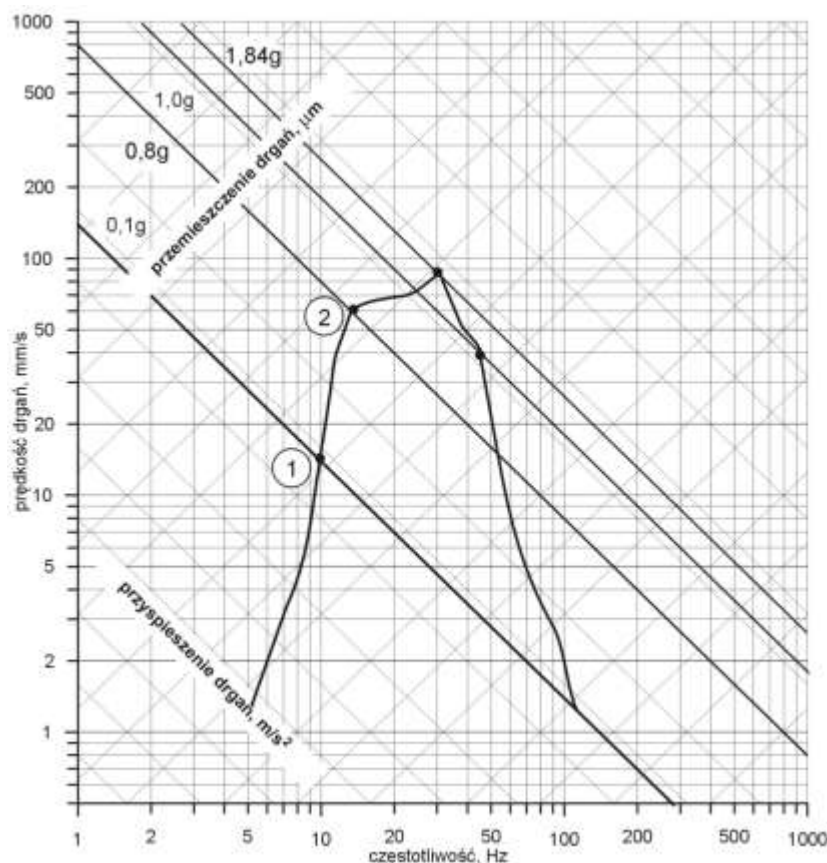




Rys. 4.19. Porównanie spektra odpowiedzi dla trzęsienia ziemi (Chmielewski i Zembaty 1998)

Spektrum odpowiedzi może być przedstawiane w zależności częstotliwości od jednego z pozostałych parametrów opisujących ruch (przemieszczenie, prędkość, przyspieszenie), tak jak na rysunku 4.19 lub w postaci nomogramu o czterech osiach odniesienia, który przed-

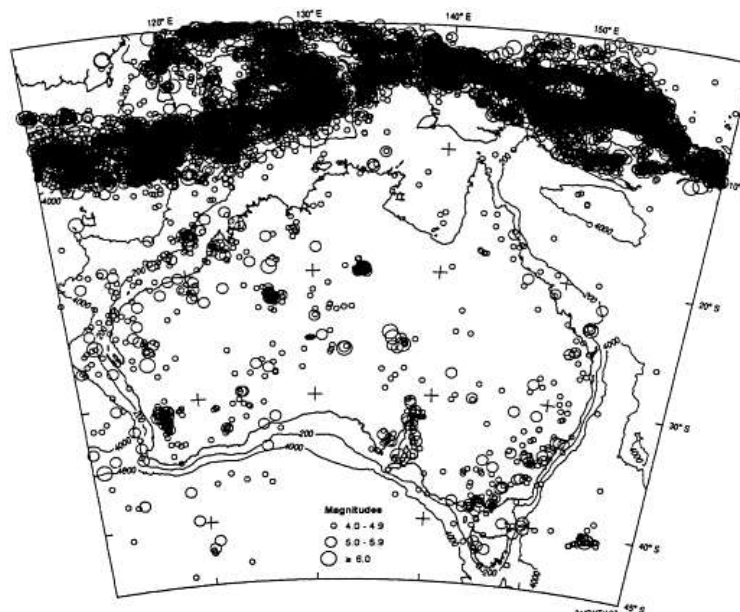
stawia współzależności występujące między parametrami drgań w ruchu harmonicznym. Pozwala na szybkie określenie wszystkich parametrów, gdy dwa z nich są znane. Przykładowo, na rysunku 4.20, punkt 1 dla 10 Hz i przemieszczenia 0,25 mm wyznacza pseudoprędkość – 16 mm/s oraz pseudoprzyspieszenie – 0,1g.



Rys. 4.20. Spektrum odpowiedzi drgań dla strzelania momentalnego (Onderka *at al.* 2007)

#### 4.3.2. Spektrum odpowiedzi drgań powstałych na skutek wstrząsów sejsmicznych

Trzęsienia ziemi powstają w skutek ruchów tektonicznych skorupy ziemskiej, co skutkuje uwalnianiem znacznej ilości energii, która powoduje powstawanie fal sejsmicznych propagujących od epicentrum we wszystkich kierunkach. Fale sejsmiczne powodują ruch podłoża, a w konsekwencji drgania obiektów. Dla przykładu, na rysunku 4.21 przedstawiono mapę Australii i jej okolic z naniesionymi miejscami wystąpienia trzęsień ziemi w latach 1850 ÷ 1997 z magnitudą przekraczającą 4 w skali Richtera.

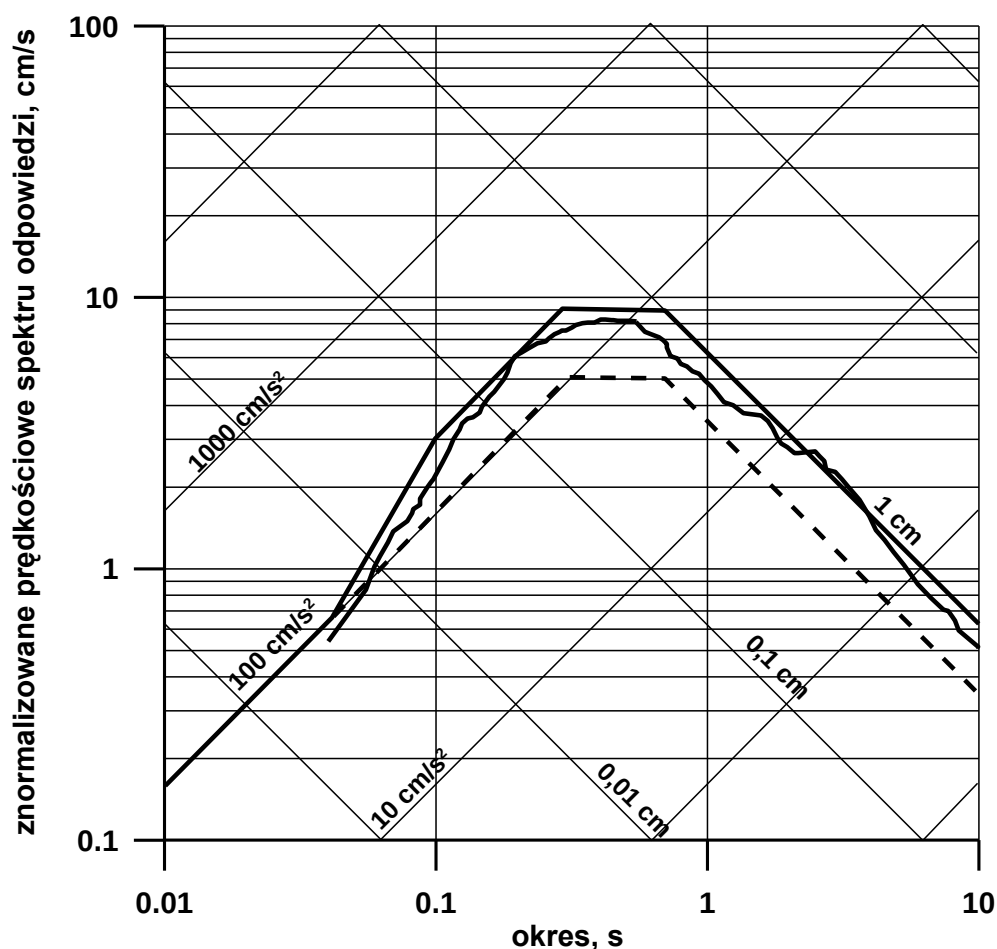


Rys. 4.21. Epicentra trzęsień ziemi w rejonie Australii w latach 1850-1997 (Sinadinovski *at al.* 2000)

Jak już wspomniano, spektrum odpowiedzi znalazło zastosowanie głównie przy trzęsieniach ziemi. Na jego podstawie porównywano poszczególne trzęsienia ziemi, dokonywano oceny oddziaływania, oraz starano się projektować obiekty z wykorzystaniem krzywych spektralnych w celu ograniczenia skutków wstrząsów na terenach najbardziej zagrożonych, znajdujących się w strefie ruchu płyt tektonicznych (Bozorgina i Bertero 2004, Chang 1997, Chopra 2007, Freeman 2007, Lam i Wilson 2001, Malhotra 2001, Riddell 2008, Zembaty *at al.* 2001). Jest ono obecnie na szeroką skalę stosowane przez wszystkie kraje na świecie znajdujące się w strefie aktywności sejsmicznej i znajduje się w wielu normach służących do projektowania obiektów budowlanych.

Dla przykładu przedstawiono na rysunku 4.22 krzywe spektralne wyznaczone dla Australii jako:

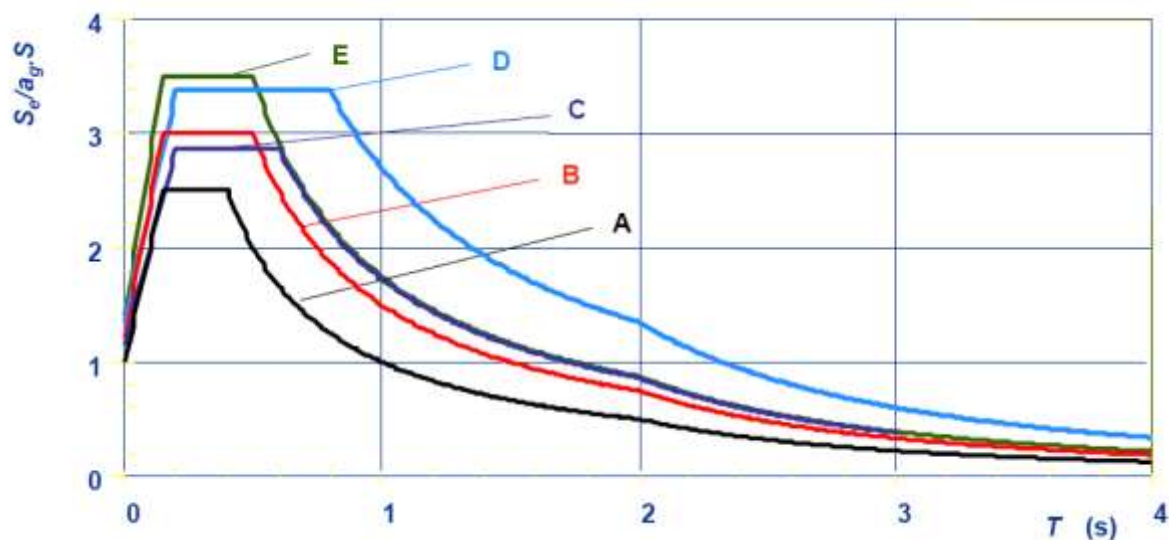
- znormalizowane spektrum odpowiedzi – łamana czarna linia,
- średnie spektrum odpowiedzi dla tego rejonu – linia przerywana,
- przykładowe spektrum odpowiedzi z jednego z trzęsień ziemi w tym rejonie Australii – czarna linia ciągła.



Rys. 4.22. Rekomendowane dla Australii spektrum odpowiedzi i średnie spektrum odpowiedzi (Lam i Wilson 2001, Sinadinovski *et al.* 2000)

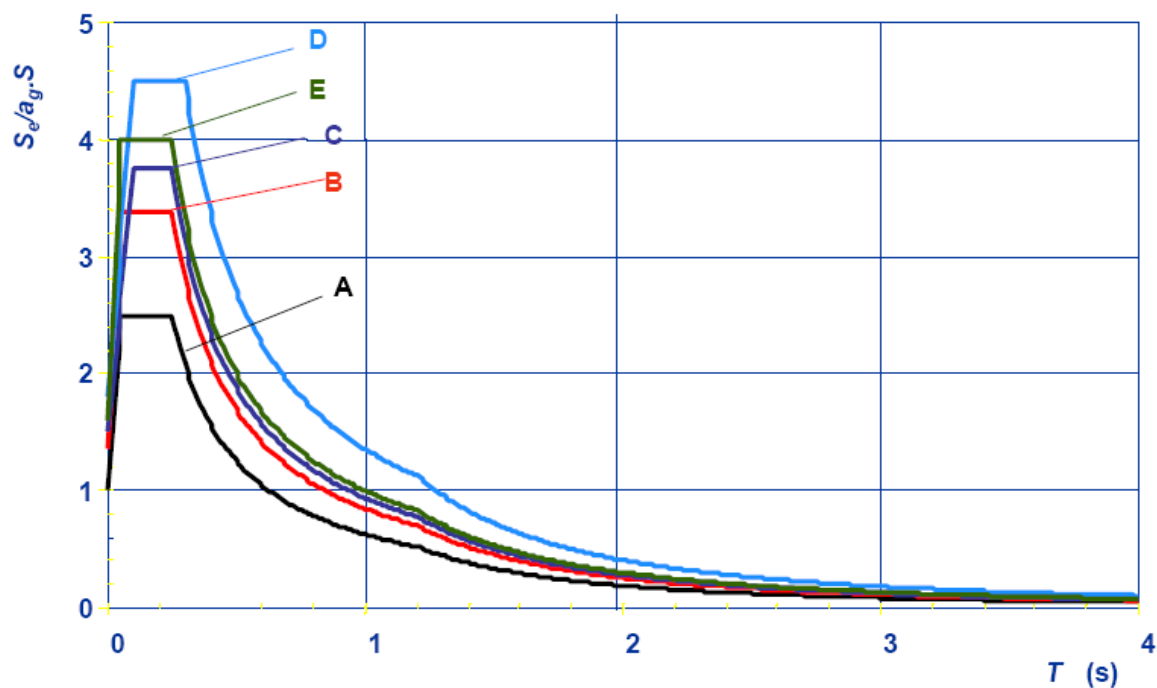
Również dla Europy opracowane są normy – Eurokod 8 (EN 1998-1, Fardis 2008) dotyczące trzęsień ziemi i wszelkich zagadnień związanych z projektowaniem obiektów odpornych na wstrząsy. Norma ta podaje bardzo szczegółowe wytyczne jeśli chodzi o projektowanie różnych rodzajów konstrukcji: żelbetowych, stalowych, murowych i zespolonych, a także niekonstrukcyjnych elementów budowli poddawanych wymuszeniom kinematycznym w postaci drgań podłoża. W Eurokodzie 8, zawarte są między innymi względne przyspieszeniowe spektra odpowiedzi ( $S_e/a_g \cdot S$ ) wyznaczone, dla ułamka tłumienia krytycznego wynoszącego  $D = 5\%$ , dla różnego rodzaju podłoża, na którym ma być posadowiony projektowany obiekt (Rys. 4.23 i 4.24), oraz w zależności od regionu:

- typ 1.– regiony o dużym i średnim zagrożeniu sejsmicznym, gdzie magnituda przekracza 5,5 w skali Richtera,
- typ 2.– regiony o małym zagrożeniu sejsmicznym i tereny sąsiadujące z obszarami o dużej aktywności sejsmicznej, gdzie magnituda nie przekracza 5,5 w skali Richtera.



Rys. 4.23. Spektrum odpowiedzi dla regionu 1 - Eurokod 8 (Carvalho 2008, EN 1998-1)

- A – skały,
- B – zagęszczony piasek, bardzo zwarte ły,
- C – średnio zagęszczony piasek, zwarte ły,
- D – luźny piasek, lekko zwięzłe ły,
- E – warstwa gruntu o miąższości 5 ÷ 20 m,



Rys. 4.24. Spektrum odpowiedzi dla regionu 2 - Eurokod 8 (Carvalho 2008, EN 1998-1)

Eurokod różnicuje samą charakterystykę wymuszających drgań podłoża (automatycznie również spektra odpowiedzi) od warunków budowy nadkładu, który powoduje zmiany parametrów charakteryzujących drgania w zakresie amplitud i częstotliwości (amplifikacja drgań) (Mutke 2008). W przypadku trzęsień ziemi drgania są niskoczęstotliwościowe, posiadające dominujące częstotliwości zdecydowanie niższe od częstotliwości drgań własnych obiektów budowlanych, dlatego pomiary drgań w podłożu i na fundamencie obiektu są bardzo do siebie zbliżone. W takiej sytuacji nie ma istotnych różnic w obliczanych bezwzględnych spektrach odpowiedzi z drgań zarejestrowanych w podłożu czy zarejestrowanych na fundamencie obiektu. Stąd w Eurokodzie fakt ten nie jest specjalnie wyszczególniany (Dubieński i Mutke 2008).

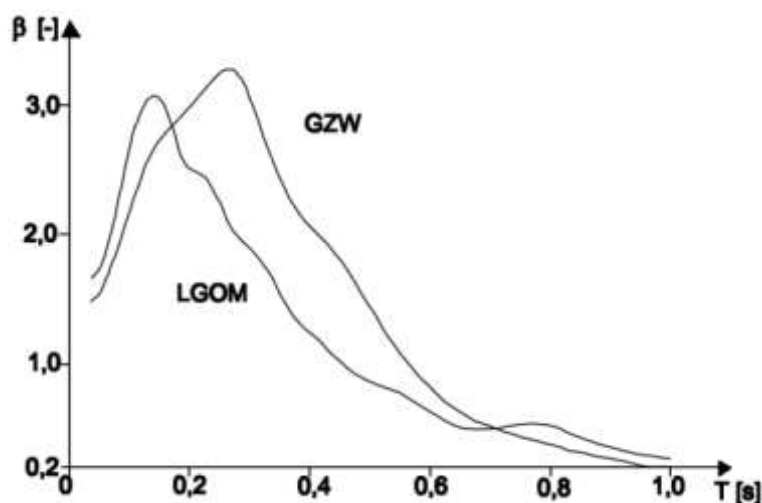
W celu lepszej ochrony obiektów ważnych i strategicznych, Eurokod dodatkowo przy projektowaniu nowych obiektów wprowadza współczynnik ważności budowli ( $\gamma_I$ ), który wynosi od 0,8 dla obiektów rolniczych poprzez 1,2 dla szkół aż po 1,4 dla szpitali, elektrowni itp. Dla pozostałych, typowych budowli i obiektów mieszkalnych  $\gamma_I = 1,0$  (Zembały 2009).

#### **4.3.3. Spektrum odpowiedzi drgań powstałych na skutek wstrząsów górniczych**

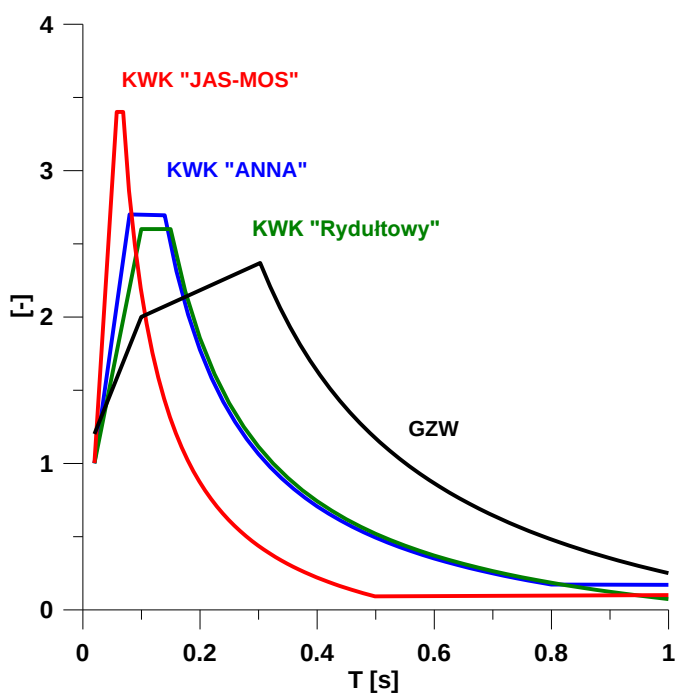
Wstrząsy górnicze powstają w wyniku gwałtownego wyładowania się znacznej energii sprężystej nagromadzonej w górotworze otaczającym podziemne wyrobiska górnicze, objawiające się drganiem górotworu i zjawiskami akustycznymi. Jeśli wstrząsy nie powodują zniszczenia wyrobiska mówi się o wstrząsie górotworu, natomiast w przypadku jeśli doszło do częściowego uszkodzenia wyrobiska, ale bez utraty jego funkcjonalności mówi się o odprężeniu w wyrobisku. W przypadku, gdy zniszczeniu uległ pewien odcinek wyrobiska i ostała utracona jego funkcjonalność mamy do czynienia z tąpnięciem (Rozp. 2002).

Wstrząsy górnicze różnią się od trzęsień ziemi (m. in. czasem trwania, zakresem częstotliwości i intensywności), ale do ich analizy stosuje się z powodzeniem metody obliczeniowe używane w inżynierii sejsmicznej (Dubieński *at al.* 2008, Dubieński *at al.* 2009, Dulińska i Zięba 2009, Maciąg 1994, Zembały 2009). Również spektrum odpowiedzi znalazło w tym przypadku szerokie zastosowanie i jest wykorzystywane do wyznaczania sił sejsmicznych w obiektach poddawanych oddziaływaniu wstrząsów górniczych. W wyniku badań w rejonie Legnicko-Głogowskiego Zagłębia Miedziowego (LGOM) oraz Górnoląskiego Zagłębia Węglowego (GZW) wyznaczono względne przyspieszeniowe spektra odpowiedzi  $\beta[-]$  (Rys. 4.25), które cały czas są udoskonalane i rozdzielane na poszczególnych rejonach

z uwzględnieniem różnic budowy podłoża (Rys. 4.26) (Czerwionka i Tatara 2009, Dubiński *et al.* 2009, Maciąg 1979).



Rys. 4.25. Spektrum odpowiedzi dla LGOM i GZW (Maciąg 1979)

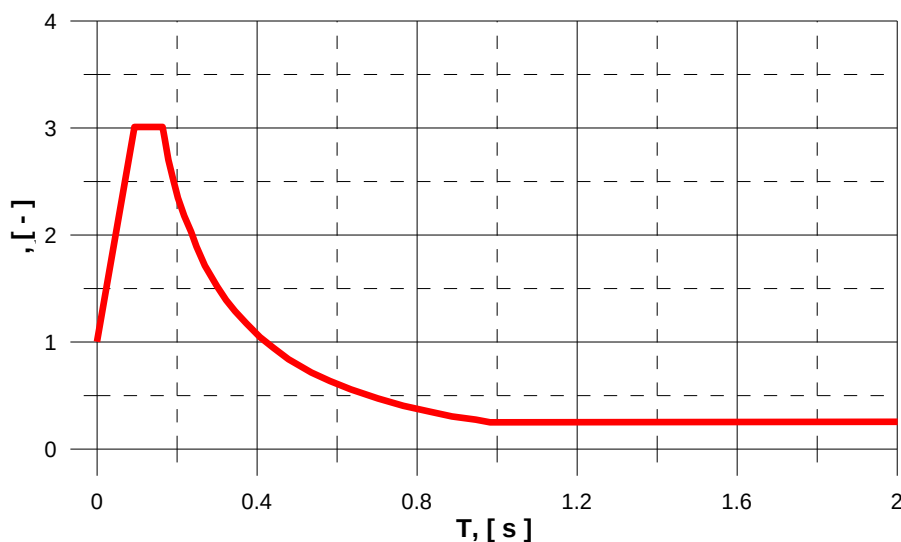


Rys. 4.26. Porównanie wzorcowych spektrów odpowiedzi z różnych obszarów z wzorcowym spektrum odpowiedzi dla GZW (Czerwionka i Tatara 2009)

Jak wynika z pracy (Czerwionka i Tatara 2009), wyznaczone wcześniej wzorcowe spektrum odpowiedzi nie jest do końca adekwatne do sytuacji w rejonie GZW („(...) *krzywa spektralna sporządzona wcześniej dla obszaru GZW na podstawie przebiegów drgań powierzchniowych z obszarów innych kopalń. (...)*” (Czerwionka i Tatara 2009)), dlatego zaistniała potrzeba wyznaczenia regionalnych wzorcowych spektrów odpowiedzi. Krzywe

spektralne w wybranych obszarach różnią się, co wskazuje że lokalne warunki podłoża mogą mieć istotny wpływ na kształt krzywych wzorcowych.

Podobnie ma się sytuacja dla *LGOM*, gdzie również zostało wyznaczone wzorcowe przyspieszeniowe spektrum odpowiedzi (Rys. 4.27).

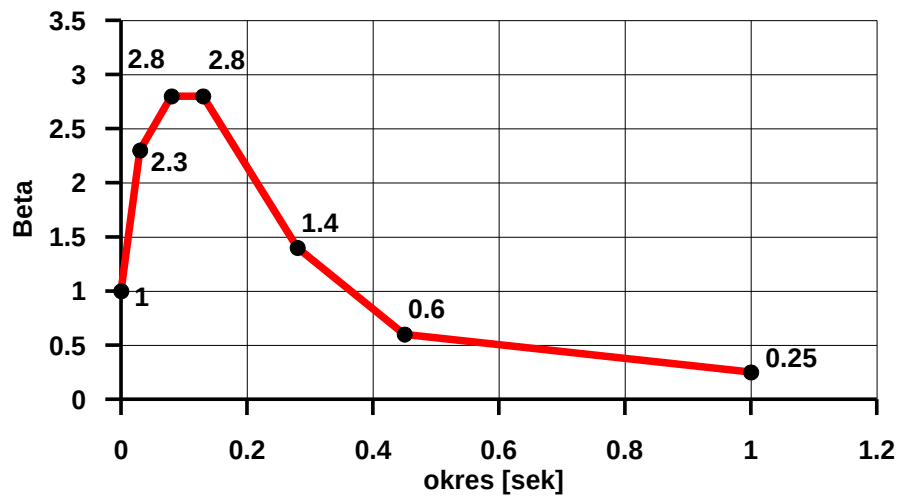


**Rys. 4.27. Wzorcowe spektrum odpowiedzi dla LGOM**

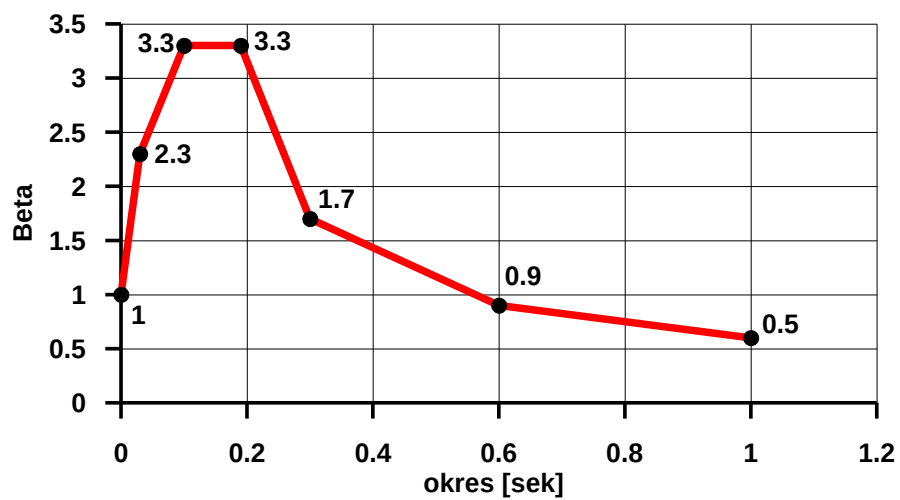
W pracy 0 autorzy wyznaczają przyspieszeniowe spektra odpowiedzi dla różnej grubości warstw nadkładu czwartorzędu:

- klasa I – nadkład czwartorzędowy cienki do 30 metrów (częstotliwość własna nadkładu :  $6 \div 30$  Hz – Rys. 4.28),
- klasa II – nadkład czwartorzędowy od 30 do 50 metrów (częstotliwość własna nadkładu :  $4 \div 8$  Hz – Rys. 4.29),
- klasa III – nadkład czwartorzędowy powyżej 50 metrów (częstotliwość własna nadkładu :  $2 \div 5$  Hz – Rys. 4.30).

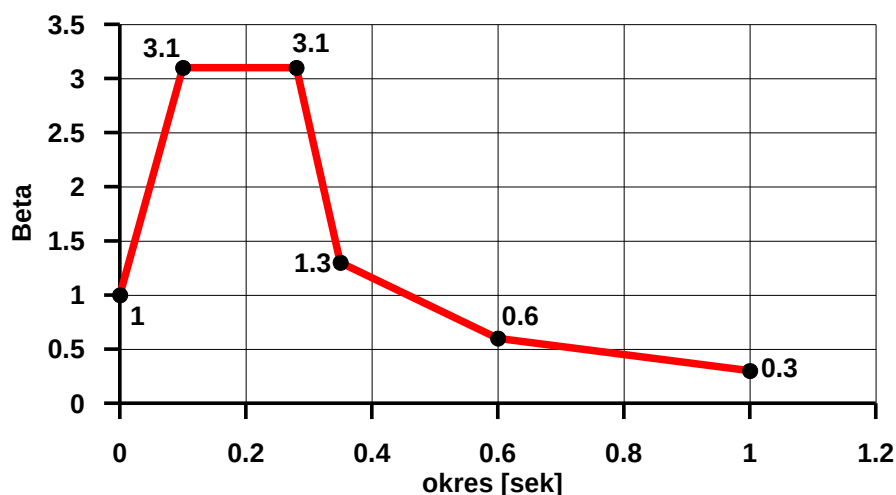




Rys. 4.28. Wzorcowe spektrum odpowiedzi z drgań zarejestrowanych w gruncie dla warstw nadkładu czwartorzędowego poniżej 30m (Dubiński *at al.* 2009)



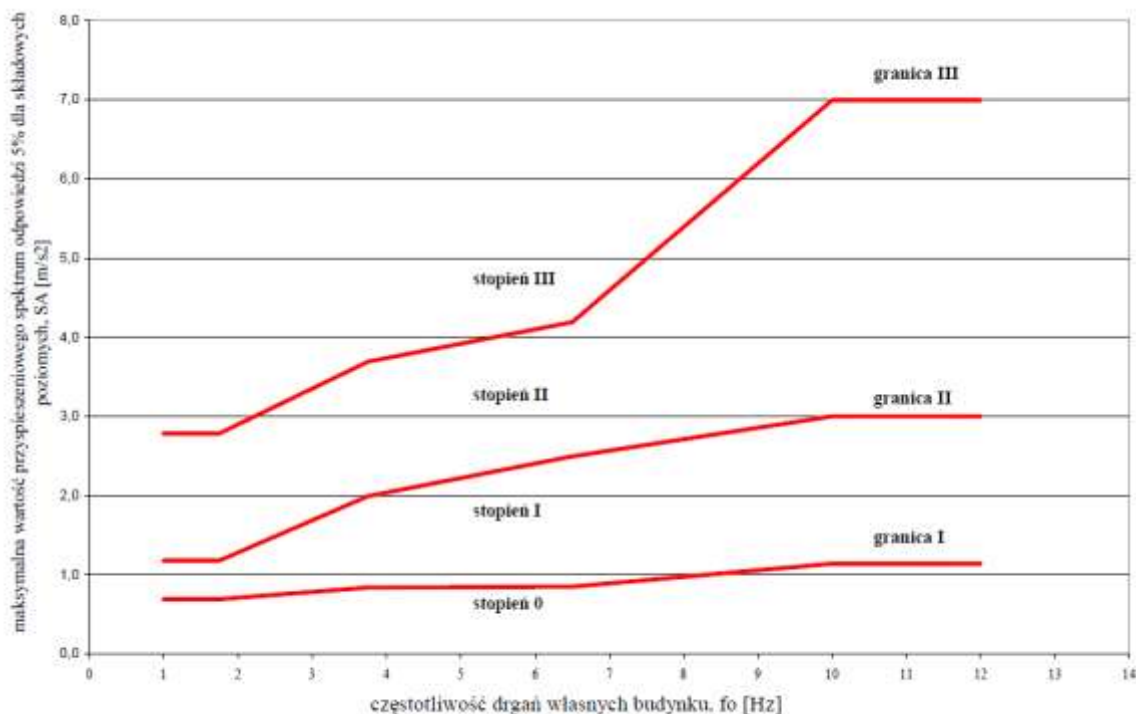
Rys. 4.29. Wzorcowe spektrum odpowiedzi z drgań zarejestrowanych w gruncie dla warstw nadkładu czwartorzędowego z zakresu 30 ÷ 50m (Dubiński *at al.* 2009)



Rys. 4.30. Wzorcowe spektrum odpowiedzi z drgań zarejestrowanych w gruncie dla warstw nadkładu czwartorzędowego powyżej 50m (Dubiński *at al.* 2009)

Na podstawie rysunków 4.28 ÷ 4.30 widać, że grubość tego samego rodzaju nadkładu ma decydujący wpływ na kształt przyspieszeniowego spektrum odpowiedzi.

W celu oceny oddziaływania wstrząsów górniczych opracowano dla regionu LGOM Górnicze Skale Intensywności (GSI-2004), które występują w wersji prędkościowej (GSI-2004V), przyspieszeniowej (GSI-2004A) oraz jako przyspieszeniowe spektrum odpowiedzi (GSI-2004 SA) (Rys. 4.31) (Samokar 2008).



Rys. 4.31. Skala GSI-2004 SA (Samokar 2008)

Skale te dzielą się na 4 stopnie, dla których opisano wpływ oddziaływania wstrząsów górniczych w obiekty budowlane oraz intensywność odczuwania drgań przez ludzi i uciążliwość użytkowania obiektów budowlanych (Dubiński *at al.* 2009, Samokar 2008):

### **Stopień 0**

**Intensywność oddziaływania drgań w budynkach:** Wstrząsy nie powodujące żadnych szkód w budynkach. Parametry drgań od wstrząsów w budynkach są porównywalne z poziomem lokalnych drgań wywołanych przez codzienną aktywność życiową (poruszanie się po mieszkaniu, trzaskanie drzwiami, wiercenie w ścianach, itp.), a parametry drgań podłoga są porównywalne z poziomem drgań wywołanych ruchem pojazdów.

**Odczuwalność przez ludzi:** Znikoma – zauważalna. Wstrząsy lokalizujące się w dolnej części stopnia 0, są praktycznie nieodczuwalne przez ludzi. Wstrząsy lokalizujące się w górnej strefie stopnia 0, są słabo odczuwalne przez ludzi.

**Uciążliwość:** Nieodczuwalna / mała.

### **Stopień I**

**Intensywność oddziaływania drgań w budynkach:** Wstrząsy nie powodujące szkód w budynkach. W pojedynczych przypadkach mało stabilne, drobne, lekkie przedmioty i ozdoby mogą się przewrócić (np. smukłe figurki ustawione na półkach, wysokie, mało stabilne wazony, itp.,). Otwarte okna i drzwi mogą się zamykać. Meble mogą drgać, a przedmioty wiszące mogą się kołysać. Możliwe powiększanie się istniejących rys, szczelin i innych uszkodzeń.

**Odczuwalność przez ludzi:** Zauważalna – wzbudzająca niekorzystne reakcje. Wstrząsy mogą być odczuwalne na powierzchni, szczególnie przez ludzi znajdujących się w czasie wstrząsu na wyższych piętrach.

**Uciążliwość:** Mała.

### **Stopień II**

**Intensywność oddziaływania drgań w budynkach:** Całe budynki mogą drgać. Wstrząsy mogą spowodować uszkodzenie elementów wykończeniowych w budynkach. Najbardziej typowe uszkodzenia to: odpadanie i zarysowanie płytek ściennych, rysy wokół ościeżnic drzwi i wokół okien, pęknięcia szyb, zarysowania lub spękania ścian działowych, zarysowania lub spękania tynku. Czasami obserwuje się uszkodzenia pokryć z dachówek i zarysowania elewacji. Mogą wystąpić drobne szkody w mieniu: przewracanie się drobnych luźno stojących przedmiotów (np. książek, figurek, itp.), stłuczenie naczyń i szklanej zastawy. Meble mogą drgać, a w pojedynczych przypadkach mogą się przemieszczać.

**Odczuwalność przez ludzi:** Wzbudzająca niekorzystne reakcje. Wstrząsy są silnie odczuwalne przez wszystkie osoby wewnątrz i na zewnątrz budynków. Drgania o tej intensywności mogą budzić śpiących ludzi. Część osób doznaje uczucia lęku w czasie trwania drgań.

**Uciążliwość:** Średnia.

### **Stopień III**

**Intensywność oddziaływania drgań w budynkach:** W strefie tej mogą pojawić się skutki opisane w stopniu II oraz uszkodzenia w postaci odspajania się gzymsów, spadania dachówek, odspajania tynku, uszkodzenia kominów, uszkodzenia ścian szczytowych w budynkach murowych, zarysowania ścian nośnych. Mogą wystąpić poważniejsze szkody w mieniu: przesuwanie się lub przewracanie mebli (szczególnie smukłych meblościanek na wyższych piętrach), spadanie obrazów, spadanie większych przedmiotów (np. telewizorów).

**Odczuwalność przez ludzi:** Dokuczliwa – wywołująca strach. Wstrząsy są bardzo silnie odczuwalne przez wszystkie osoby wewnątrz i na zewnątrz budynków. Ludzie są wystraszeni i doznają dużego dyskomfortu. Niektóre osoby, szczególnie mieszkające na wyższych piętrach, wybiegają na zewnątrz budynku.

**Uciążliwość:** Duża.

#### **4.3.4. Spektrum odpowiedzi drgań powstałych na skutek ruchu komunikacyjnego**

W licznych pracach (Ciesielski *at al.* 1980, Ciesielski i Maciąg 1986, Ciesielski i Maciąg 1990, Ciesielski i Stypuła 1996, Kogut 1999), można znaleźć wykorzystanie metody spektrum odpowiedzi do analizy drgań wzbudzonych ruchem komunikacyjnym. Kogut (1999) poddaje analizie spektrum odpowiedzi w zależności od różnych parametrów ruchowo - drogowych i podejmuje próbę predykcji przyspieszeniowego spektrum odpowiedzi z wykorzystaniem sztucznych sieci neuronowych (SSN).

Na rysunku 4.32 przedstawiono przykładowe spektrum odpowiedzi drgań wzbudzonych przejazdem samochodu.



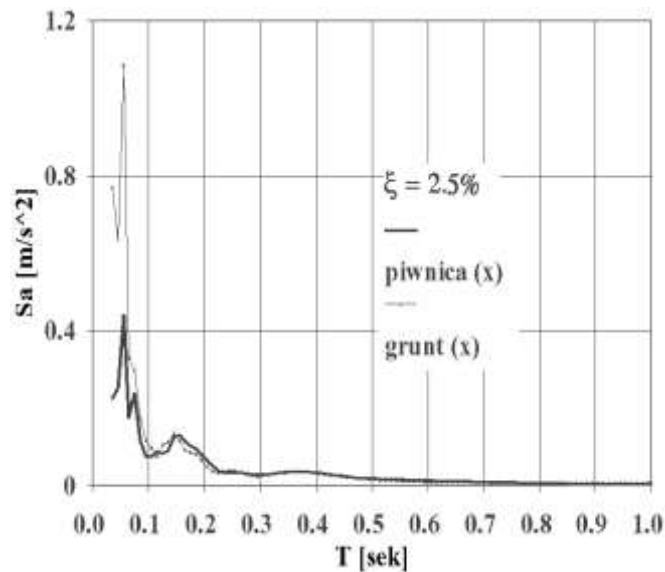
Rys. 4.32. Spektrum odpowiedzi drgań wzbudzonych ruchem drogowym dla składowych poziomych (Kogut 1999)

Z rysunku 4.32 widać wyraźnie, że drgania wywołane ruchem drogowym charakteryzują się wysokimi częstotliwościami i można spodziewać się znacznego tłumienia przy przejściu z podłoża do obiektu.

#### 4.3.5. Spektrum odpowiedzi drgań powstałych na skutek robót strzałowych

W dotychczasowych polskich pracach (Maciąg 2006, Onderka i Sieradzki 2004, Onderka *at al.* 2007, Tatar 2008), w niewielkim stopniu była poruszana problematyka wykorzystywania metody spektrum odpowiedzi do analizowania drgań wzbudzanych detonacją ładunków MW w kopalniach odkrywkowych. Autorzy tych prac zwracają jednak uwagę na możliwości jakie daje ta metoda. Z obecnie przeprowadzonych badań wynika, że charakterystyka drgań ma istotny wpływ na spektrum odpowiedzi obiektów, co powinno również występować w przypadku drgań wzbudzanych w czasie odpalania ładunków z różnym opóźnieniem milisekundowym (Pyra 2010, Winzer 2004).

W pracach (Maciąg 2006, Tatar 2008) autorzy przedstawiają przykładowe spektrum odpowiedzi drgań, wykonane dla obiektu dwunastokondygnacyjnego, wywołane robotami strzałowymi w kamieniołomach (Rys. 4.33).



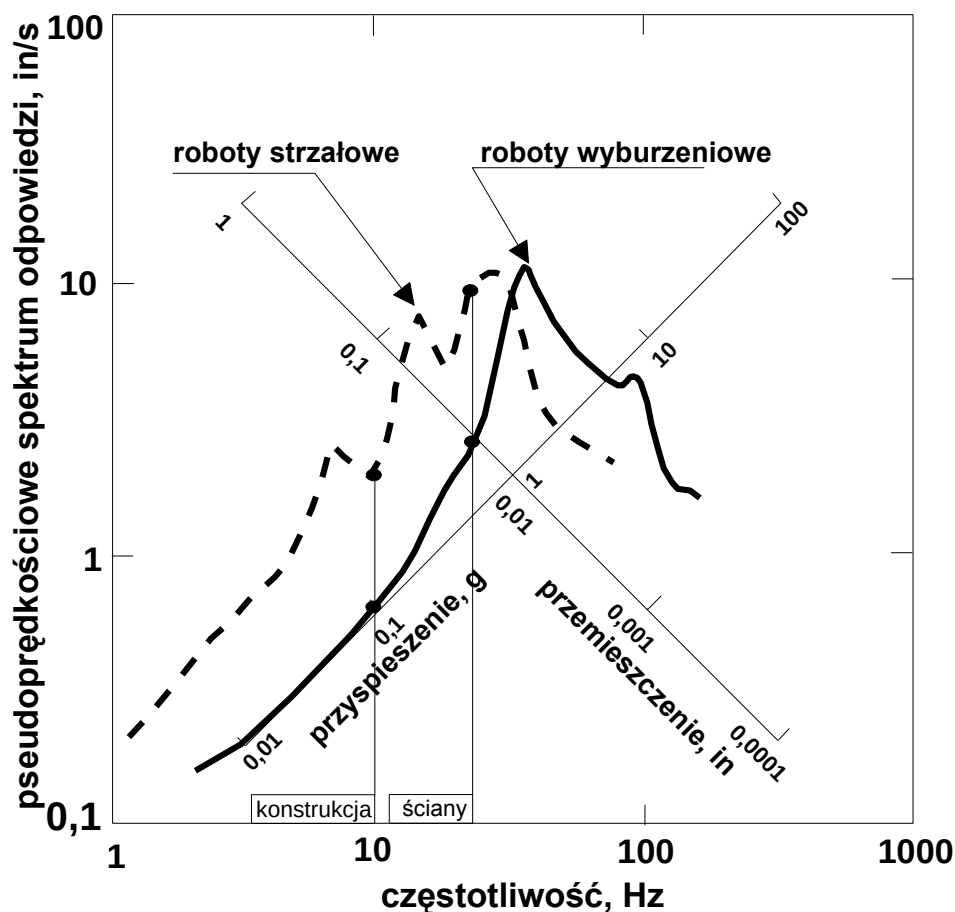
Rys. 4.33. Spektrum odpowiedzi drgań dla obiektu dwunastokondygnacyjnego (Maciąg 2006, Tatara 2008)

Zwracają uwagę na fakt, że nie należy przenosić wniosków dotyczących przenoszenia drgań z podłoża na fundamenty obiektu w przypadku ich wzbudzania odpalaniem ładunków MW w kamieniołomach, na przypadki drgań w obiektach pochodzących z innych źródeł drgań, w tym m.in. od podziemnych wstrząsów górniczych (Maciąg i Tatara 2000, Maciąg 2006, Tatara 2008).

Onderka *at al.* (2007), w oparciu o literaturę zagraniczną (Dowding 1985, Dowding 1996) przedstawiają przykłady wykorzystywania metody spektrum odpowiedzi do analizowania drgań wzbudzanych robotami strzałowymi.

W literaturze zagranicznej można znaleźć wyniki badań, w których od samego początku, próbowano wykorzystać spektrum odpowiedzi drgań do analizy sygnału wzbudzonego robotami strzałowymi w kopalniach odkrywkowych. Bollinger (1980) przedstawia wyniki badań, w następstwie których stwierdza, że spektra odpowiedzi wykonane dla drgań pomierzonych od robót strzałowych są bardzo zbliżone do krótkotrwałych trzęsień ziemi i na tamtą chwilę nie znajdował zasadniczych różnic w mechanizmie powodującym zniszczenia. Należy dodać, że pomiary były wykonywane w odległości mniejszej niż 600 m, a odpalane były serie ładunków MW o masie 185 i 673 tony.

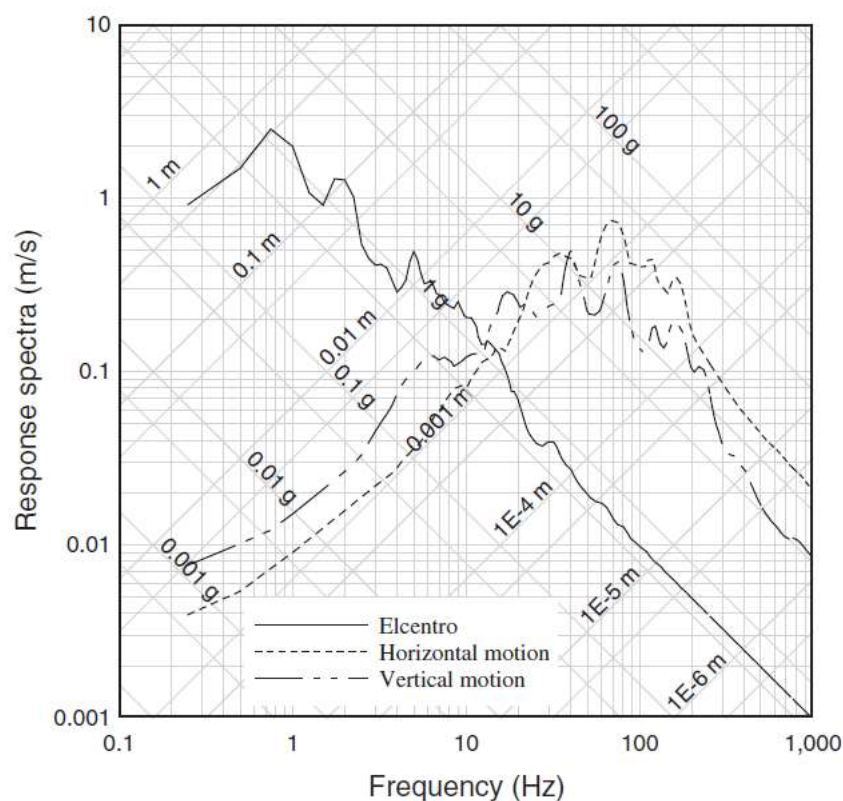
Jedne z pierwszych wykresów ilustrujących spektrum odpowiedzi (Rys. 4.34) można znaleźć w pracy Corser (1979), który jest następnie przedstawiany i omawiany w pracach (Siskind *at al.* 1989, Siskind 2005).



Rys. 4.34. Prędkościowe spektrum odpowiedzi zaprezentowane w pracy (Corser 1797)

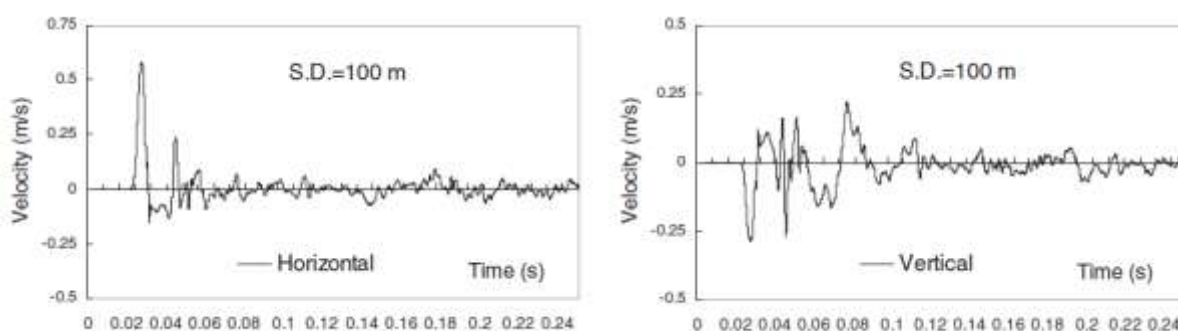
Rysunek 4.34 przedstawia przykładowe spektrum odpowiedzi od robót strzałowych w kopalni odkrywkowej (linia przerywana), oraz od wyburzania obiektu (linia ciągła). Dodatkowo w dolnej części wykresu zaznaczone są częstotliwości drgań własnych obiektów 10 Hz i ścian 20 Hz.

W krajach, gdzie zagrożenie trzęsieniami ziemi jest duże, a w pobliżu obiektów budowlanych dodatkowo prowadzona jest działalność górnicza z użyciem MW, prowadzone są badania związane z projektowaniem obiektów na takich terenach, w celu uniknięcia szybkiego ich uszkodzenia. W pracach (Lu *at al.* 2001, Ma *at al.* 2003) przedstawione są wyniki badań, w których wykorzystana została metoda spektrum odpowiedzi (Rys. 4.35)



**Rys. 4.35. Spektrum odpowiedzi dla drgań wywołanych trzęsieniem ziemi i robotami strzałowymi (Lu *et al.* 2001, Ma *et al.* 2003)**

Rysunek 4.35 przedstawia przykładowe spektrum odpowiedzi z trzęsienia ziemi w El Centro (linia ciągła) oraz spektra odpowiedzi ze składowych poziomych (linie przerywane) wykonanych dla drgań zasymulowanych (Rys. 4.36) od robót strzałowych, w podziemnym zakładzie górniczym, przy odpaleniu 250 ton MW.

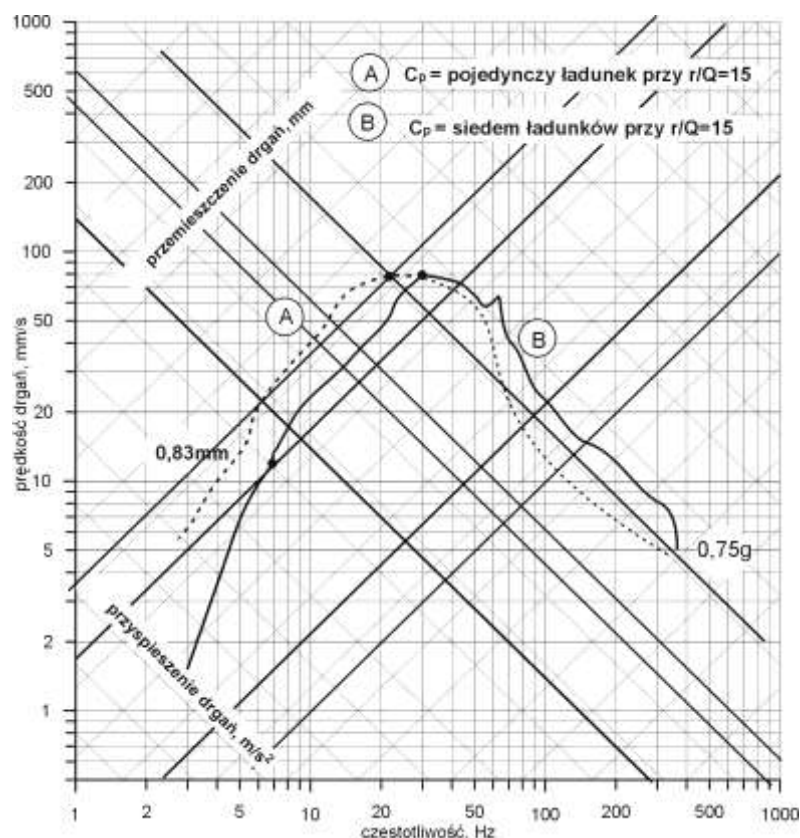


**Rys. 4.36. Sejsmogramy zasymulowanych drgań (Ma *et al.* 2003)**

Autorzy stwierdzają zasadność prowadzenia tego typu badań w celu lepszego prognozowania oddziaływania i projektowania obiektów na takich terenach, zwracając uwagę na różnice między trzęsieniami ziemi, a robotami strzałowymi w kopalniach podziemnych.



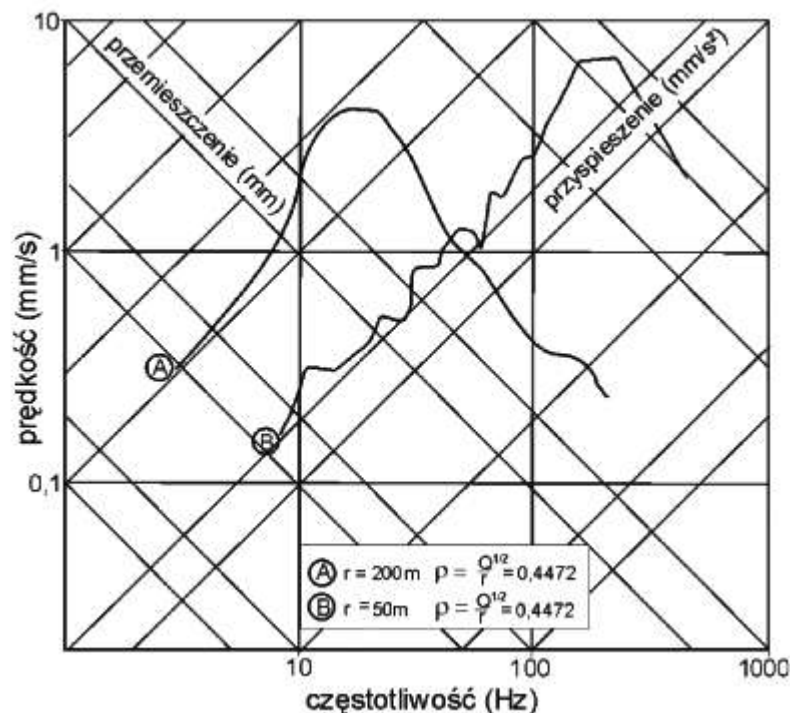
Dowding (1985, 1996) przedstawił bardzo obszerne wyniki badań nad zastosowaniem spektrum odpowiedzi do analizy drgań wzbudzanych detonacją ładunków MW w kopalniach odkrywkowych. Przykładowo na rysunku 4.37 pokazano dwa spektra drgań spowodowane odpaleniem momentalnym i milisekundowym ze stałym opóźnieniem jednego i siedmiu ładunków MW.



**Rys. 4.37. Spektra odpowiedzi przy odpalaniu momentalnym i milisekundowym**

Maksymalne prędkości drgań są do siebie zbliżone, ale zmienia się częstotliwość, przy której wystąpiła wartość maksymalna.

W innym przypadku autor prac wykorzystuje spektrum odpowiedzi do analizy drgań wzbudzonych tym samym ładunkiem MW, ale pomiary wykonywane były w punktach znacznie od siebie oddalonych (Rys. 4.38).



Rys. 4.38. Zmiana spektrum odpowiedzi wraz z odległością (Dowding 1985, Onderka i Sieradzki 204)

Autor wnioskuje, że podłoże przenosi tylko wyższe częstotliwości ( $> 100$  Hz) na bliskich odległościach, później je filtruje i zostają tylko niższe częstotliwości w zakresie  $4 \div 50$  Hz.

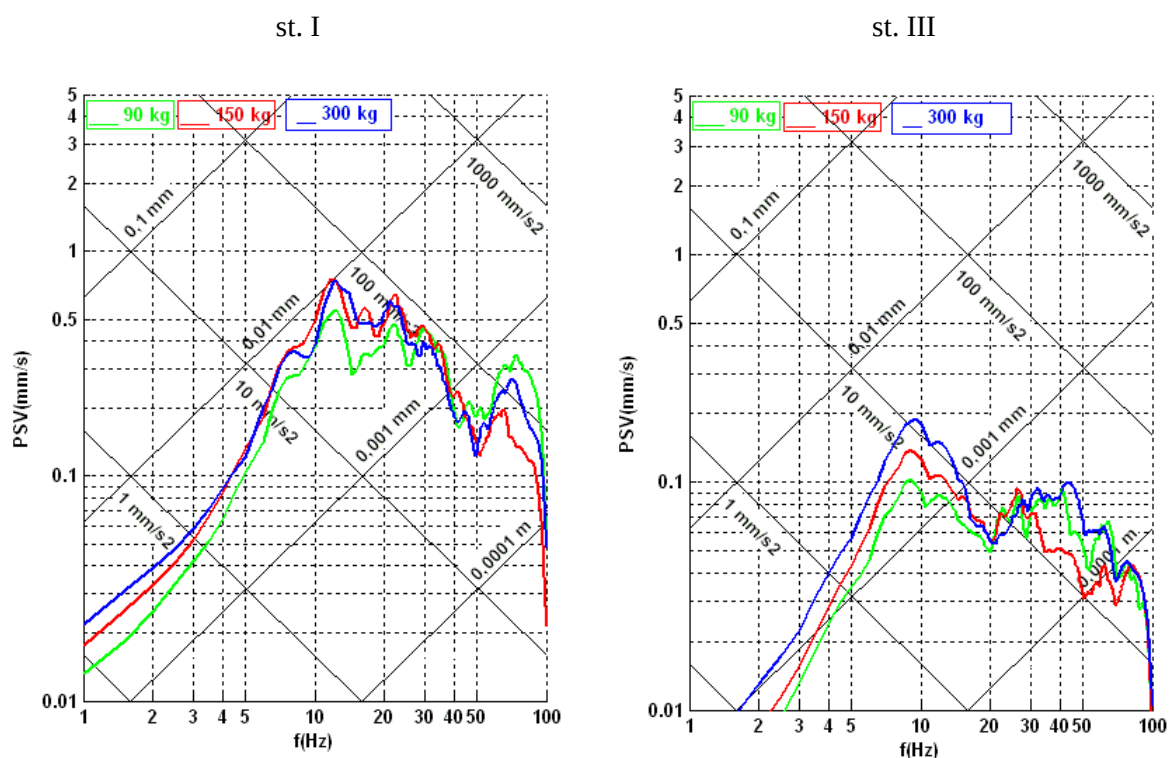
#### 4.3.6. Przykładowe spektra odpowiedzi dla wybranych surowców

Z prac przedstawionych w rozdziałach 4.3.2 – 4.3.5 wynika, że na spektrum odpowiedzi mają wpływ czynniki związane zarówno z charakterystyką podłoża jak i charakterystyką źródła drgań. Spektrum odpowiedzi drgań wzbudzanych wstrząsami górniczymi w zagłębiach LGOM czy GZW, w związku z dużymi głębokościami źródła, może być charakterystyczne dla większych obszarów. Pewne różnice dostrzegane już dla otoczenia poszczególnych kopalń węgla kamiennego (GZW), pozwalają zauważyć istotną rolę budowy górotworu, przez który propagowane są drgania.

Jeszcze większego znaczenia czynników związanych z charakterystyką podłoża i źródła drgań, należy spodziewać się w przypadku robót strzałowych prowadzonych w kopalniach odkrywkowych. Przytoczone w rozdziale 4.3.5 prace wskazują, że spektrum odpowiedzi dla tych robót jest bardziej wrażliwe na zmiany charakterystyki źródła.

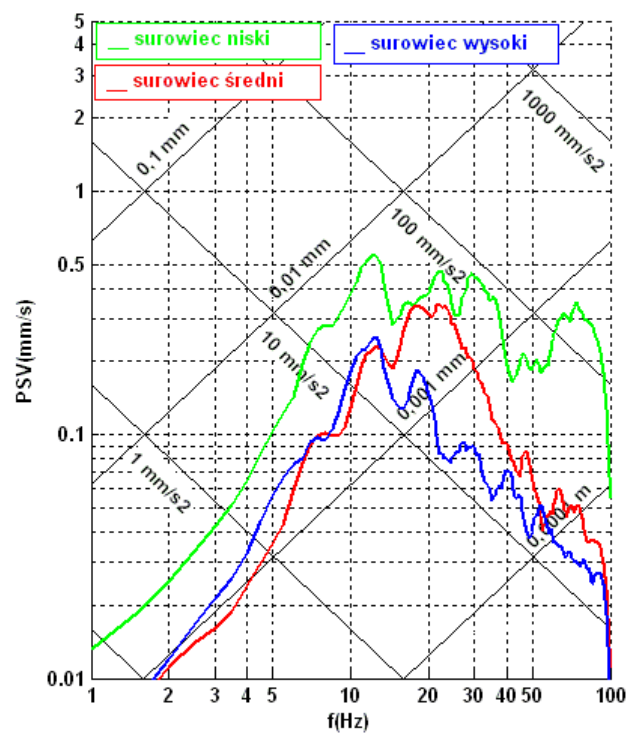
W celu rozpoznania istotności wpływu różnych czynników, na spektrum odpowiedzi drgań wzbudzanych w otoczeniu robót strzałowych, przeprowadzono przykładowe obliczenia dla robót wykonanych w następujących warunkach:

- odpalanie pojedynczych ładunków MW o różnej masie w kopalni wapienia (rys. 4.39), rejestrując drgania na dwóch stanowiskach oddalonych od siebie o 320 m ,
- odpalanie pojedynczych ładunków MW o różnej masie w różnych surowcach kopalni wapienia (rys. 4.40), rejestrując drgania na jednym stanowisku pomiarowym,
- odpalenie serii ładunków MW w dwóch strefach (przedzielonych uskokiem), w kopalni dolomitu I rys. 4.41,
- odpalenie serii o dużej ilości otworów i masie MW w kopalni dolomitu II (rys. 4.42),
- odpalenie serii ładunków MW w kopalni granitu (rys. 4.43),
- odpalenie serii ładunków MW w złożu węgla brunatnego, rejestrując drgania na dwóch obiektach budowlanych, oddalonych od siebie o 50 m i na podłożu przy jednym z obiektów (Rys. 4.44).

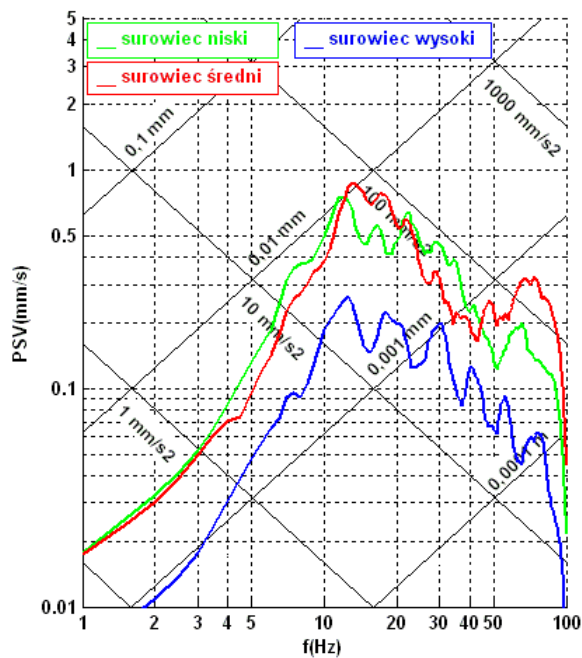


**Rys. 4.39. Pseudoprędkościowe spektra odpowiedzi drgań podłoża zarejestrowanych na dwóch stanowiskach podczas odpalania różnych ładunków MW w tym samym surowcu**

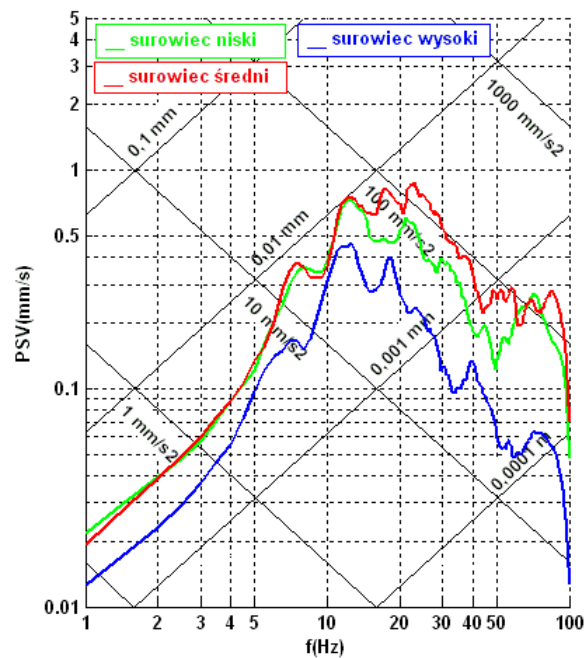
90 kg



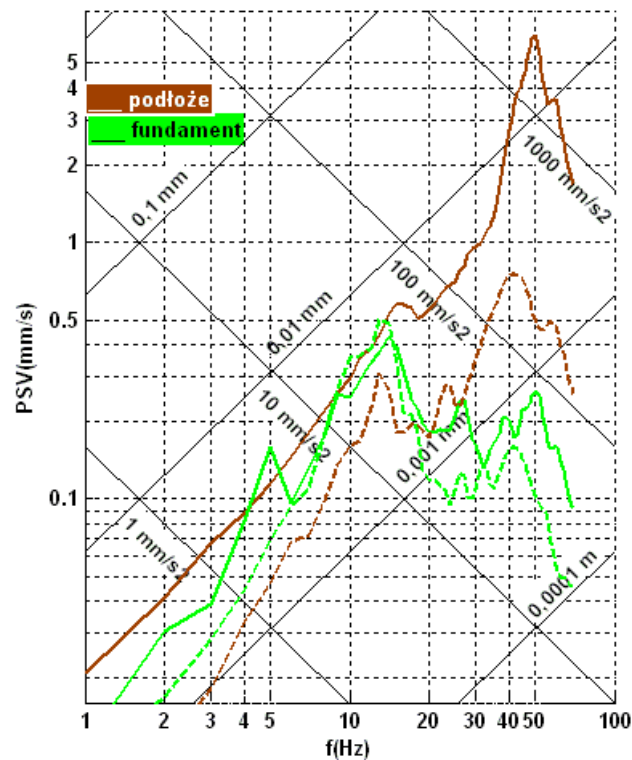
150 kg



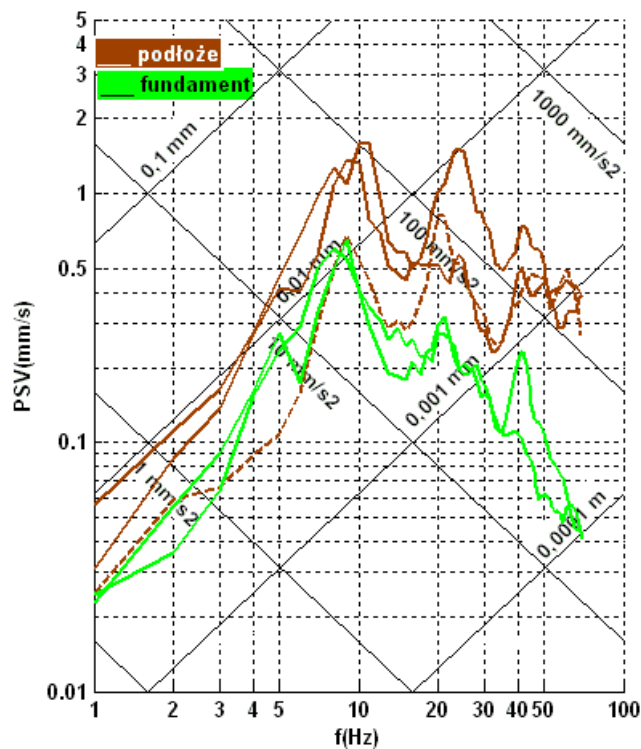
300 kg



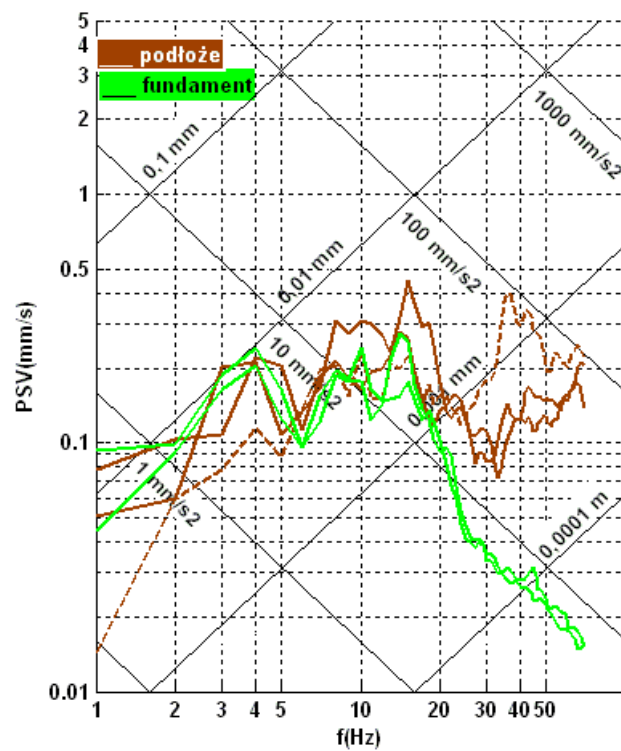
Rys. 4.40. Pseudoprędkościowe spektra odpowiedzi obliczone dla drgań podłoża na stanowisku I przy odpalaniu różnych ładunków MW w trzech surowcach – składowa x



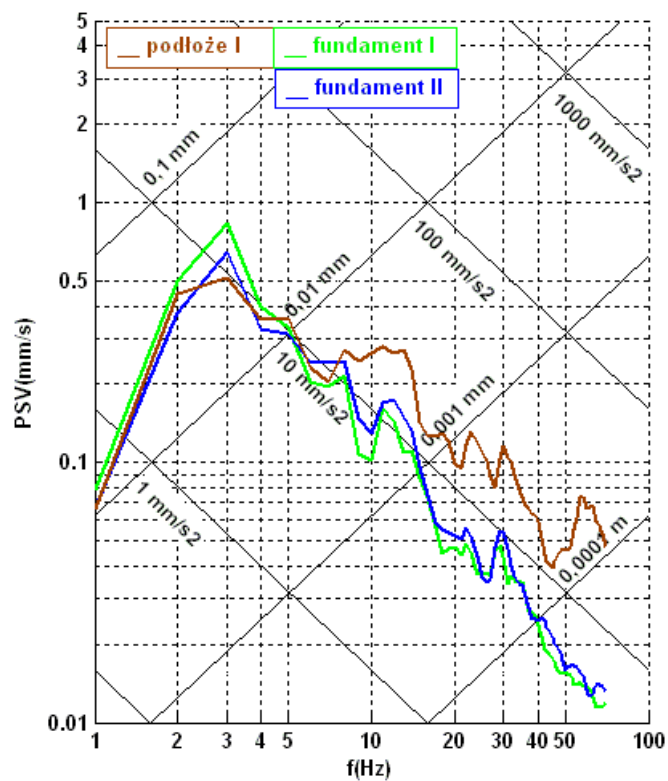
Rys. 4.41. Pseudoprędkościowe spektra odpowiedzi obliczone dla drgań zarejestrowane w tym samym punkcie pomiarowym w otoczeniu kopalni dolomitu I, wzbudzanych odpaleniem serii ładunków MW w dwóch strefach przedzielonych uskokiem – składowa x (linia ciągła strefa I, a przerywana strefa II)



Rys. 4.42. Pseudoprędkościowe spektra odpowiedzi obliczone dla drgań podłoża zarejestrowane podczas odpalenia dużej ilości ładunków MW w złożu dolomitu II



Rys. 4.43. Pseudoprędkościowe spektra odpowiedzi drgań podłoża zarejestrowane podczas odpalania serii ładunków MW w złożu granitu



Rys. 4.44. Pseudoprędkościowe spektrum odpowiedzi drgań zarejestrowanych na fundamentach dwóch obiektów oddalonych od siebie o 50 m i na jednym stanowisku w podłożu

Odpalenie pojedynczych ładunków MW o różnej masie wskazuje na duże podobieństwo krzywych spektrum odpowiedzi drgań (Rys. 4.39) – wykazują one zbliżoną charakterystykę częstotliwościową i są tylko przesunięte względem siebie, co wskazuje na wpływ masy ładunku MW na intensywność drgań.

O wiele większy wpływ na spektrum odpowiedzi można zauważyć, w przypadku drgań wzbudzanych odpaleniem pojedynczych ładunków MW, w różnych surowcach (Rys. 4.40). Drgania wzbudzone w surowcu wysokim, które do punktu pomiarowego propagowały przez surowce średni i niski, charakteryzują się niższymi częstotliwościami. Częstotliwości wyższe są wyraźnie filtrowane – we wszystkich spektrach odpowiedzi dominuje częstotliwość 12 Hz. Spektra odpowiedzi drgań, wzbudzonych odpalaniem pojedynczych ładunków MW, można więc uznać za charakterystyczne dla podłoża i mogą one służyć jako punkt odniesienia do dalszych analiz porównawczych, dla ładunków MW odpalanych w serii.

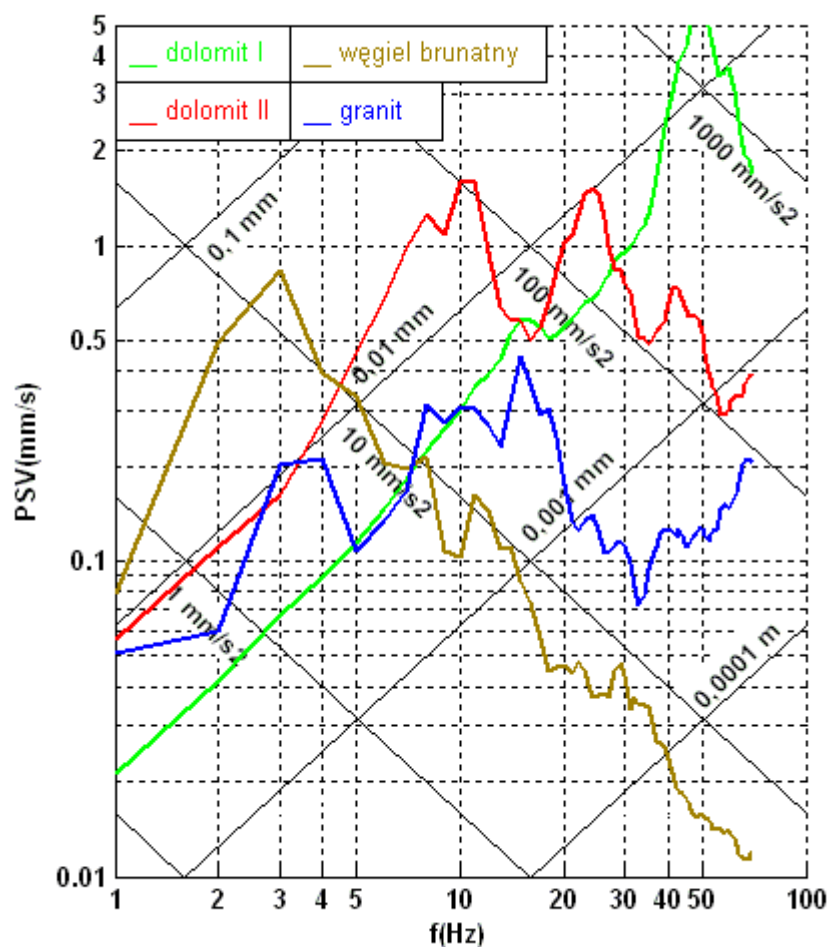
Również dobrym przykładem wpływu budowy geologicznej złoża w którym prowadzone są roboty strzałowe na spektrum, jest przypadek przedstawiony na rysunku 4.41. Uskok powoduje silne tłumienie wyższych częstotliwości, co powoduje, że seria o większej masie MW wzbudza drgania o niższej intensywności (strefa II linia przerywana Rys. 4.41), niż seria o mniejszej masie ładunku całkowitego MW, ale odpalana w strefie I (odległość punktu pomiarowego od miejsca wykonywania robót strzałowych była bardzo zbliżona).

Porównując spektra odpowiedzi przedstawione na rysunkach 4.41 i 4.42, obliczone dla dwóch złóż dolomitu, można zauważyć wpływ budowy geologicznej otoczenia (jakość podłoża). Charakterystyczne punkty (maksima) na krzywych spektrum odpowiedzi dla złoża dolomitu I występują dla częstotliwości 14 i 50 Hz, a dla złoża dolomitu II 10 i 25 Hz.

Całkowicie odmienne jest natomiast spektrum odpowiedzi dla drgań wzbudzanych odpalaniem ładunków MW w kopalni granitu (Rys. 4.43), gdzie pojawiają się niskie częstotliwości rzędu 4 Hz. Charakterystyczne jest również silne tłumienie częstotliwości wyższych, rzędu 40 Hz, przy przejściu sygnału z podłoża do fundamentu obiektu.

Spektrum odpowiedzi dla drgań wzbudzonych w otoczeniu kopalni węgla brunatnego charakteryzuje się dominacją częstotliwości 3 Hz. Spektra przedstawione na rysunku 4.44 dla dwóch obiektów, oddalonych od siebie o około 50 m, wykazują duże podobieństwo.

Dla zobrazowania wpływu na spektrum odpowiedzi różnych warunków geologiczno – górniczych, na rysunku 4.45, przedstawiono spektra dla wybranych surowców zlokalizowanych w rejonie świętokrzyskim, dolnośląskim i w centralnej Polsce.



Rys. 4.45. Pseudoprędkościowe spektra odpowiedzi drgań wzbudzanych odpalaniem serii ładunków MW w różnych złożach

Z rysunku 4.45 wynika, że spektrum odpowiedzi wykazuje istotne zróżnicowanie, a dodatkowym parametrem wpływającym na ich charakterystykę jest czynnik górniczy, związany z techniką wykonywania robót strzałowych, w tym od zastosowanego opóźnienia milisekundowego.

Szukając porównania oddziaływania drgań wzbudzanych robotami strzałowymi, do wstrząsów górniczych w kopalniach podziemnych, czy nawet trzęsień ziemi, należy zauważyć, że czynnikami decydującymi o charakterystyce drgań, a tym samym o spektrum odpowiedzi są górotwór i źródło. W rozważanych przypadkach, tylko w robotach strzałowych istnieje możliwość sterowania źródłem i to zarówno w zakresie propagowanej energii jak i charakterystyki wzbudzanych drgań (zastosowanie opóźnień milisekundowych). Czynniki te mają wpływ na spektrum odpowiedzi, a więc istnieje możliwość modelowania jego charakterystyki.



#### 4.4. Podsumowanie

Wszystkie rozważania zawarte w rozdziałach 2, 3 i 4, przyczyniły się do poszukiwania odmiennego sposobu analizowania drgań wzbudzanych odpalaniem ładunków MW, w długich otworach z różnym opóźnieniem milisekundowym. Wprowadzenie nowego systemu inicjowania ładunków – elektronicznego, o bardzo wysokiej dokładności zadawania opóźnienia (0,01 ms), daje nowe możliwości kontroli efektu sejsmicznego robót strzałowych. Bardzo szybki rozwój metod analitycznych sygnałów umożliwia dokładniejszą identyfikację informacji zawartych w sygnałach oraz adaptacje tych metod do różnych dziedzin nauki (od medycyny po górnictwo).

Dlatego dowód tezy postawionej w pracy przeprowadzono z wykorzystaniem:

- analizy czasowo – częstotliwościowej drgań z zastosowaniem metody *Matching Pursuit*,
- analizy drgań z zastosowaniem metody spektrum odpowiedzi.

## 5. Opis badań terenowych

### 5.1. Założenia do badań terenowych

Celem pracy jest określenie spektrum odpowiedzi drgań, wzbudzanych ładunkami MW umieszczonymi w długich otworach, odpalanych z różnym opóźnieniem milisekundowym.

Założeniami podstawowymi są:

- analiza wyników z dotychczas wykonanych pomiarów,
- prowadzenie badań w warunkach robót strzałowych eksploatacyjnych (produkcyjnych) w jednej z kopalń odkrywkowych surowców skalnych.

W związku z powyższym w badaniach terenowych zaplanowano:

- odpalanie serii badawczych będzie na jednym poziomie eksploatacyjnym, ładunkami MW o zbliżonych masach zarówno: całkowitej w serii otworów, w pojedynczym otworze równoważne ładunkowi przypadającemu na opóźnienie międzysrzalowe,
- zmienność opóźnień milisekundowych będzie w zakresie wynikającym z wcześniej wykonanych badań, a możliwym do zastosowania w lokalnych warunkach górniczych,
- inicjowanie ładunków MW systemami nieelektrycznym i elektronicznym dopuszczonymi do używania w górnictwie odkrywkowym,
- rejestracje drgań w stałych punktach pomiarowych (stanowiskach),
- prowadzenie pomiarów intensywności drgań, zarówno w podłożu jak na fundamencie obiektu<sup>3</sup>, z zastosowaniem aparatury z zapisem cyfrowym umożliwiającym prowadzenie analiz przy wykorzystaniu programów komputerowych,
- analizowanie intensywności drgań pod kątem określenia zmiany spektrum odpowiedzi,
- badanie charakterystyk częstotliwościowych rejestrowanych drgań zarówno podłoża jak i obiektu, pod kątem:
  - wpływu stosowanych opóźnień milisekundowych na zmianę struktury czasowo - częstotliwościowej rejestrowanych drgań,
  - porównania spektrum odpowiedzi rejestrowanych drgań przy odpalaniu ładunków z różnym opóźnieniem milisekundowym,

---

<sup>3</sup> W pracy badania prowadzone były na budynkach mieszkalnych.

- wpływu stosowanych opóźnień milisekundowych na przenoszenie się drgań z podłoża do obiektu.

Jako podstawę analizy wybrano dotychczasowe wyniki badań z kopalni gipsu A, oraz z kopalni wapienia B. W kopalni wapienia B wykonano dodatkowo badania z użyciem elektronicznego systemu inicjacji. Podstawowym kryterium wyboru były, przeprowadzone w poprzednich latach, badania optymalnego opóźnienia milisekundowego, z zastosowaniem w tych kopalniach odpalania nieelektrycznym systemem Nonel Unidet oraz ostatnio wprowadzonego w kopalni wapienia B systemu elektronicznego.

Ważną rolę odegrało również zdobyte wcześniej doświadczenie zarówno, co do wyboru miejsca wykonywania robót strzałowych jak i punktów pomiarowych.

## **5.2. Zastosowana aparatura pomiarowa**

Zestaw aparatury do pomiarów drgań powinien być wyposażony w rejestrator o dużej częstotliwości próbkowania oraz mierniki o płaskiej charakterystyce, w przewidywanym paśmie pomiarowym. Wymagania te w pełni spełnia rejestrator przebiegu drgań produkcji szwedzkiej UVS 1608 DIN wraz z trójskładowymi sejsmometrami (rys. 5.1.).

UVS 1608 DIN jest ośmiokanałowym rejestratorem przeznaczonym do rejestracji pełnych zapisów drgań podłoża i obiektów. Posiada 11-bitowy przetwornik AC/DC. Rejestrator jest wyposażony w obszerny ekran LCD (70 x 247 mm), na którym są wyświetlane wskazówki dla użytkownika, ujęte w postaci menu oraz wszelkie dane pomiarowe z wynikami analizy włącznie. Wbudowany wewnętrzny software, umożliwia wyznaczanie parametrów drgań na poszczególnych składowych, rzeczywistego wektora prędkości oraz filtrowanie przebiegów filtrami dolno i górnoprzepustowymi.

Wyniki rejestracji i analizy mogą być również drukowane na wewnętrznej drukarce. Pełne przebiegi zmienności mierzonego parametru mogą być zapisywane na dyskietce 3,5" w postaci plików lub przenoszone do komputera za pomocą interfejsu RS232 w celu dalszej analizy lub archiwizacji. Poszczególne pliki mogą być wczytywane ponownie do rejestratora i poddawane analizie lub drukowaniu.



**Rys. 5.1. Aparatura UVS 1608 DIN**

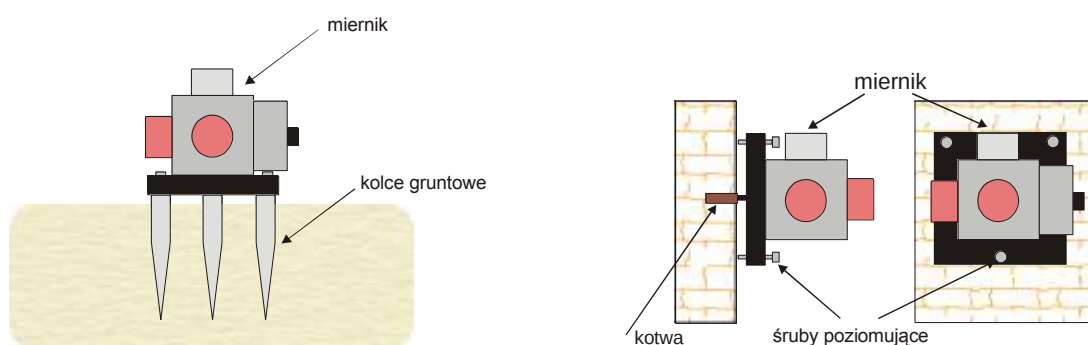
Dane charakterystyczne UVS 1608 DIN:

- |                                                                                                                              |      |      |      |      |      |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|------|------|------|------|
| – długość zapisu, s                                                                                                          | 1    | 2    | 5    | 10   | 20   |
| – wstępne wyzwalenie, s                                                                                                      | 0,5  | 0,5  | 0,5  | 0,5  | 0,5  |
| – częstotliwość próbkowania, Hz                                                                                              | 5000 | 5000 | 5000 | 2500 | 1250 |
| – zakres pomiarowy – $0 \div 25$ mm/s i $0 \div 250$ mm/s                                                                    |      |      |      |      |      |
| – maksymalna rozdzielczość amplitudy 1/5000 zakresu pomiarowego (dla geofonu UVS 0,05 mm/s)                                  |      |      |      |      |      |
| – do wyboru - poziomy wyzwiania orientowane kanałowo z rozdzielczością dwucyfrową od 0,8 do 80% pełnego zakresu dynamicznego |      |      |      |      |      |
| – tryb katalogowy zapewnia możliwość przeglądania wszystkich zapisanych w pamięci sygnałów                                   |      |      |      |      |      |

UVS 1608 DIN jest wyposażony w sejsmometry typu DIN z elektronicznym układem kompensacji częstotliwości. Producent oferuje dużą gamę mierników od jednoskładowych, poprzez dwuskładowe i trójskładowe w zintegrowanej obudowie.

Mierniki prędkości drgań o płaskiej charakterystyce częstotliwościowej w zakresie  $1 \div 1000$  Hz i w pełni odpowiadają wymaganiom stawianym przy pomiarach drgań parasejsmicznych.

W przypadku pomiarów wykonywanych w obiektach lub elementach betonowych, mierniki można kotwić do obiektu, natomiast przy pomiarach drgań podłoża bezpośrednio mocować za pomocą trzech kolców lub w przypadku podłoża skalnego kotwić, podobnie jak w obiektach (rys. 5.2.).



**Rys. 5.2. Mierniki UVS DIN – dwu i trójskładowy (widok), sposób montażu na fundamencie obiektu i w podłożu (Onderka *at al.* 2003)**

UVS 1608 DIN jest wyposażony również w szerokopasmowe mikrofony wstępne do pomiaru intensywności powietrznej fali uderzeniowej.

Jest to wyposażenie standardowe, pozwalające na prowadzenie kompletnych pomiarów związanych ze strefami zagrożenia, w otoczeniu robót strzałowych w kopalniach odkrywkowych. Parametry pracy rejestratora, wysoka jakość mierników oraz wymiennosc wyposażenia sprawia, że system ten można uznać za kompletny do badań prowadzonych w warunkach terenowych.

Charakterystykę aparatury pomiarowej UVS 1608 DIN przedstawiono w tabeli 5.1.

Tabela 5.1. Charakterystyka aparatury pomiarowej UVS 1608 DIN

| Parametr                              | UVS 1608 DIN                                                    |
|---------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|
| Liczba kanałów                        | 8                                                               |
| Zakres pomiarowy (s)                  | 1, 2, 5, 10, 20                                                 |
| Częstotliwość próbkowania (Hz)        | 1250 ÷ 5000                                                     |
| Zakres częstotliwości (Hz)            | 0,2 ÷ 1000                                                      |
| AD – Converter                        | 11 bit                                                          |
| Filtrowanie górno i dolno przepustowe | tak                                                             |
| Autostart                             | tak                                                             |
| Wyzwalanie ręczne                     | tak                                                             |
| Wstępne wyzwalanie (pre-trigger) (s)  | 0,1 ÷ 0,5                                                       |
| Podgląd                               | ekran LCD                                                       |
| Czas pracy ciągłej                    | brak                                                            |
| Zasilanie                             | akumulatorowe/sieć                                              |
| Wposażenie standardowe                | 2 czujniki trójskładowe + 2 mikrofony<br>szerokopasmowe         |
| Ciężar (kg)                           | 10,4                                                            |
| Zastosowanie                          | pomiar intensywności drgań i powietrz-<br>nej fali uderzeniowej |

Do analizy wyników pomiarów (parametrów zarejestrowanych drgań) zastosowano programy komputerowe:

- Explograf5 firmy Exploconsult opracowany według algorytmów zaprojektowanych w Laboratorium Robót Strzałowych i Ochrony Środowiska Katedry Górnictwa Odkrywkowego AGH,
- MPInterface, oparty na algorytmie MP4, wykonany w Laboratorium Robót Strzałowych i Ochrony Środowiska Katedry Górnictwa Odkrywkowego AGH,
- SPSS z wykorzystaniem algorytmów zaprojektowanych w Katedrze Geofizyki Wydziału Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska AGH,
- FLAC 3D 4.0

### 5.3. Wybrane parametry robót strzałowych oraz lokalizacja stanowisk pomiarowych w otoczeniu kopalni gipsu A

Odpalanie ładunków umieszczonych w długich otworach prowadzone było w piętrze II poziomu eksploatacyjnego kopalni gipsu A

Otwory strzałowe, o średnicy 95 mm, wiercono do spągu piętra z odchyleniem od pionu do 25°. Otwory rozmieszczone były jednoszeregowo, w stałych odległościach między otworami przy zachowaniu stałego zabioru. Parametry geometryczne siatki otworów wynosiły:

- zabiór  $z = 3,5 \text{ m}$

- odległość między otworami  $a = 3,5 \text{ m}$
- długość otworu  $l_o = 11 \div 13 \text{ m}$
- kąt odchylenia otworu od pionu  $\alpha = 25^\circ$

Jako materiał wybuchowy używano saletrolu luzem inicjowanego ładunkami udarowymi (po dwa w każdym otworze), z detonatorów trotylowych umieszczonych w nabojach emulinitu. Ładunek MW w otworze był ładunkiem ciągłym. Do inicjacji stosowano nieelektryczny system odpalania typu Nonel Unidet. Zapalniki umieszczone w nabojach udarowych miały jednakowe opóźnienie – 475 ms w dolnym naboju udarowym (zasadniczym) i 500 ms w górnym. Nabój udarowy górny, o wyższym czasie opóźnienia, umieszczany był jako „bezpiecznik” przed ewentualnym niewypałem.

Opóźnienie między ładunkami MW w poszczególnych otworach zadawane było na powierzchni (poza otworami) łącznikami opóźniającymi (*SnapLine*) o interwałach czasowych 17 ms, 25 ms, 42 ms i 67 ms. Serie otworów odpalane były ze stałym opóźnieniem międzystrzałowym, czyli do inicjowania ładunków MW w serii stosowano takie same łączniki opóźniające.

Długość otworów wynosiła  $11 \div 13 \text{ m}$ , a ich liczba w serii 11 sztuk. Ładunki MW w poszczególnych seriach doświadczalnych wynosiły:

- ładunek w otworze  $Q_1 = 66 \div 77 \text{ kg}$
- ładunek opóźnienia milisekundowego  $Q_z = 66 \div 77 \text{ kg}$
- ładunek całkowity (serii otworów)  $Q_c = 726 \div 835 \text{ kg}$

Wielkości ładunków MW, ilości otworów oraz opóźnienia milisekundowe w poszczególnych seriach, zestawiono w tabeli 5.2.

**Tabela 5.2. Parametry ładunków MW zastosowane w seriach**

| Nr<br>serii | Ładunek MW, kg |       | Ilość otworów, szt.<br><br>n | Opóźnienie milisekundowe, ms<br><br>$\tau$ |
|-------------|----------------|-------|------------------------------|--------------------------------------------|
|             | $Q_c$          | $Q_z$ |                              |                                            |
| I           | 77             | 77    | 1                            | 0                                          |
| II          | 737            | 67    | 11                           | 17                                         |
| III         | 835            | 76    | 11                           | 25                                         |
| IV          | 726            | 66    | 11                           | 42                                         |
| V           | 792            | 72    | 11                           | 67                                         |

Podczas robót strzałowych przeprowadzano pomiary drgań aparaturą UVS 1608 DIN. Mierniki drgań rozmieszczono na trzech stanowiskach pomiarowych:

- stanowisko A1: podłoże w pobliżu obiektu mieszkalnego – miernik trójskładowy
- stanowisko A1': fundament obiektu mieszkalnego – miernik dwuskładowy
- stanowisko A2: podłoże – miernik trójskładowy

Na stanowiskach A1 i A2 mierzono drgania w podłożu na trzech wzajemnie prostopadłych składowych  $z$ ,  $x$ ,  $y$ , zaś miernikiem na stanowisku A1'<sup>4</sup>, przytwierdzonym do fundamentu obiektu, mierzono drgania na składowych  $x$  i  $y$ .

Rejestrowano drgania, jednocześnie w podłożu i na fundamencie obiektu, w czasie 5 sekund. Tak uzyskane pełne zapisy czasowe drgań pozwoliły na:

- określenie charakterystyki amplitudowej i częstotliwościowej drgań podłoża i obiektu,
- określenie spektrum odpowiedzi drgań wzbudzanych odpalaniem ładunków MW z różnym opóźnieniem,
- określenie stopnia tłumienia drgań przy przejściu z podłoża do fundamentu obiektu.

#### **5.4. Wybrane parametry robót strzałowych oraz lokalizacja stanowisk pomiarowych w otoczeniu kopalni wapienia B**

Odpalanie ładunków umieszczonych w długich otworach prowadzone było w piętrze poziomym II na froncie południowym, z użyciem systemu nieelektrycznego, oraz dla systemu elektronicznego w piętrze poziomym III w kopalni wapienia B.

Otwory strzałowe, o średnicy 95 mm, wiercono do spągu piętra z odchyleniem od pionu do 20°. Otwory rozmieszczone były jednoszeregowo, w stałych odległościach między otworami przy zachowaniu stałego zabioru.

Parametry geometryczne siatki otworów przy systemie nieelektrycznym wyniosły:

- zabiór  $z = 4,5 \text{ m}$
- odległość między otworami  $a = 4,4 \text{ m}$
- długość otworu  $l_o = 20,0 \div 22,5 \text{ m}$
- kąt odchylenia otworu od pionu  $\alpha = 20^\circ$

---

<sup>4</sup> apostrof przy numerze stanowiska oznacza, że miernik założony jest na konstrukcji nośnej obiektu nieopodal stanowiska gruntowego o tym samym numerze.



a dla systemu elektronicznego:

- |                                  |                                  |
|----------------------------------|----------------------------------|
| – zabiór                         | $z = 4,2 \div 4,5 \text{ m}$     |
| – odległość między otworami      | $a = 4,8 \div 4,4 \text{ m}$     |
| – długość otworu                 | $l_o = 22,5 \div 28,0 \text{ m}$ |
| – kąt odchylenia otworu od pionu | $\alpha = 20^\circ$              |

Jako materiał wybuchowy używano Emulanu luzem, inicjowanego ładunkami udarowymi (po dwa w każdym otworze) sporządzanymi z detonatorów trotylowych T-500.

Przy nieelektrycznym system odpalania typu *Nonel Unide*, zapalniki umieszczone w nabojach udarowych posiadały jednakowe opóźnienie – 475 ms w dolnym naboju udarowym (zasadniczym) i 500 ms w górnym. Opóźnienie między ładunkami MW w poszczególnych otworach zadawane było na powierzchni (poza otworami) łącznikami opóźniającymi (*SnapLine*) o interwałach czasowych: 25 ms, 42 ms i 67 ms, przy czym serie otworów odpalane były tym samym opóźnieniem międzystrzałowym.

W elektronicznym systemie odpalania typu *i-kon*; czasy zapalników umieszczonych w nabojach udarowych były programowane i wynosiły: 15 ms, 20 ms, 25 ms, 30 ms i 33 ms. Serie otworów odpalane były ze stałym opóźnieniem międzystrzałowym.

Ładunki MW w poszczególnych seriach doświadczalnych odpalanych systemem nieelektrycznym (serie I ÷ IV) wynosiły:

- |                                      |                                   |
|--------------------------------------|-----------------------------------|
| – ładunek w otworze                  | $Q_1 = 115 \div 130 \text{ kg}$   |
| – ładunek opóźnienia milisekundowego | $Q_z = 115 \div 130 \text{ kg}$   |
| – ładunek całkowity (serii otworów)  | $Q_c = 1286 \div 1428 \text{ kg}$ |

a w seriach odpalanych systemem elektronicznym (serie V ÷ X):

- |                                      |                                     |
|--------------------------------------|-------------------------------------|
| – ładunek w otworze                  | $Q_1 = 124,9 \div 181 \text{ kg}$   |
| – ładunek opóźnienia milisekundowego | $Q_z = 63,3 \div 171 \text{ kg}$    |
| – ładunek całkowity (serii otworów)  | $Q_c = 3122,5 \div 3777 \text{ kg}$ |

Zastosowane ładunki MW: w otworze  $Q_1$ , na opóźnienie międzystrzałowe  $Q_z$ , serii otworów  $Q_c$  oraz liczbę otworów i opóźnienie milisekundowe dla poszczególnych serii zestawiono w tabeli 5.3.

**Tabela 5.3. Wielkości użytych ładunków MW zastosowane w seriach**

| Nr<br>serii | Ładunek MW, kg |       | Ilość otworów/ ładunków,<br>szt.<br>n | Opóźnienie milisekundowe, ms<br>$\tau$ |
|-------------|----------------|-------|---------------------------------------|----------------------------------------|
|             | $Q_c$          | $Q_z$ |                                       |                                        |
| I           | 120            | 120   | 1 / 1                                 | 0                                      |
| II          | 1380           | 115   | 12 / 12                               | 25                                     |
| III         | 1428           | 130   | 11 / 11                               | 42                                     |
| IV          | 1276           | 116   | 11 / 11                               | 67                                     |
| V           | 3770           | 171   | 22 / 22                               | 15                                     |
| VI          | 3614           | 90,5  | 20 / 40                               | 20                                     |
| VII         | 3420           | 63,3  | 27 / 54                               | 25                                     |
| VIII        | 3640           | 182   | 20 / 20                               | 30                                     |
| IX          | 3122,5         | 124,9 | 25 / 25                               | 33                                     |
| X           | 3454,0         | 78,5  | 22 / 44                               | 33                                     |

Podczas wykonywania robót strzałowych przeprowadzano pomiary drgań aparaturą UVS 1608 DIN. Mierniki drgań rozmieszczone były na trzech stanowiskach pomiarowych:

- stanowisko B1:      podłoże w pobliżu obiektu mieszkalnego      – miernik trójskładowy
- stanowisko B1':    fundament obiektu mieszkalnego                      – miernik trójskładowy
- stanowisko B1'':    piętro obiektu mieszkalnego                                – miernik dwuskładowy

Ze względów technicznych w drugiej fazie badań, gdy ładunki MW odpalane były systemem elektronicznym, pomiary wykonywano tylko w podłożu i na fundamencie obiektu. (st. B1 i B1'). Pozwoliło to, podobnie jak w przypadku kopalni gipsu A, na:

- określenie charakterystyki amplitudowej i częstotliwościowej drgań podłoża i obiektu (fundament i ściana nośna na piętrze),
- określenie spektrum odpowiedzi drgań wzbudzanych odpaleniem ładunków MW z różnym opóźnieniem,
- określenie stopnia tłumienia drgań przy przejściu z podłoża do fundamentu obiektu.

## 6. Analiza zarejestrowanych sygnałów

Wyniki pomiarów drgań wzbudzonych w czasie odpalania ładunków z różnym opóźnieniem milisekundowym zostały poddane analizie w dwóch etapach:

etap I: analiza intensywności i charakterystyk częstotliwościowych drgań przeprowadzona metodą *MP*, a opisaną w rozdziale 4.2,

etap II: analiza spektrum odpowiedzi drgań opisanym w rozdziale 4.3.

Zgodnie z przyjętą metodyką badawczą, jako poziom odniesienia do analiz porównawczych przyjęto efekt sejsmiczny (zapis drgań) uzyskany z odpalenia pojedynczego ładunku MW. Charakterystyka drgań zarejestrowanych w czasie takiego odpalania ładunków daje sygnał niezakłócony w porównaniu do odpalania milisekundowego, kiedy następuje nakładanie się efektu od kolejnych impulsów. Sygnał taki można przyjąć jako charakterystyczny dla środowiska skalnego na drodze fal, jak i podłoża pod obiektem.

### 6.1. Analiza dotychczasowych wyników badań z kopalni gipsu A

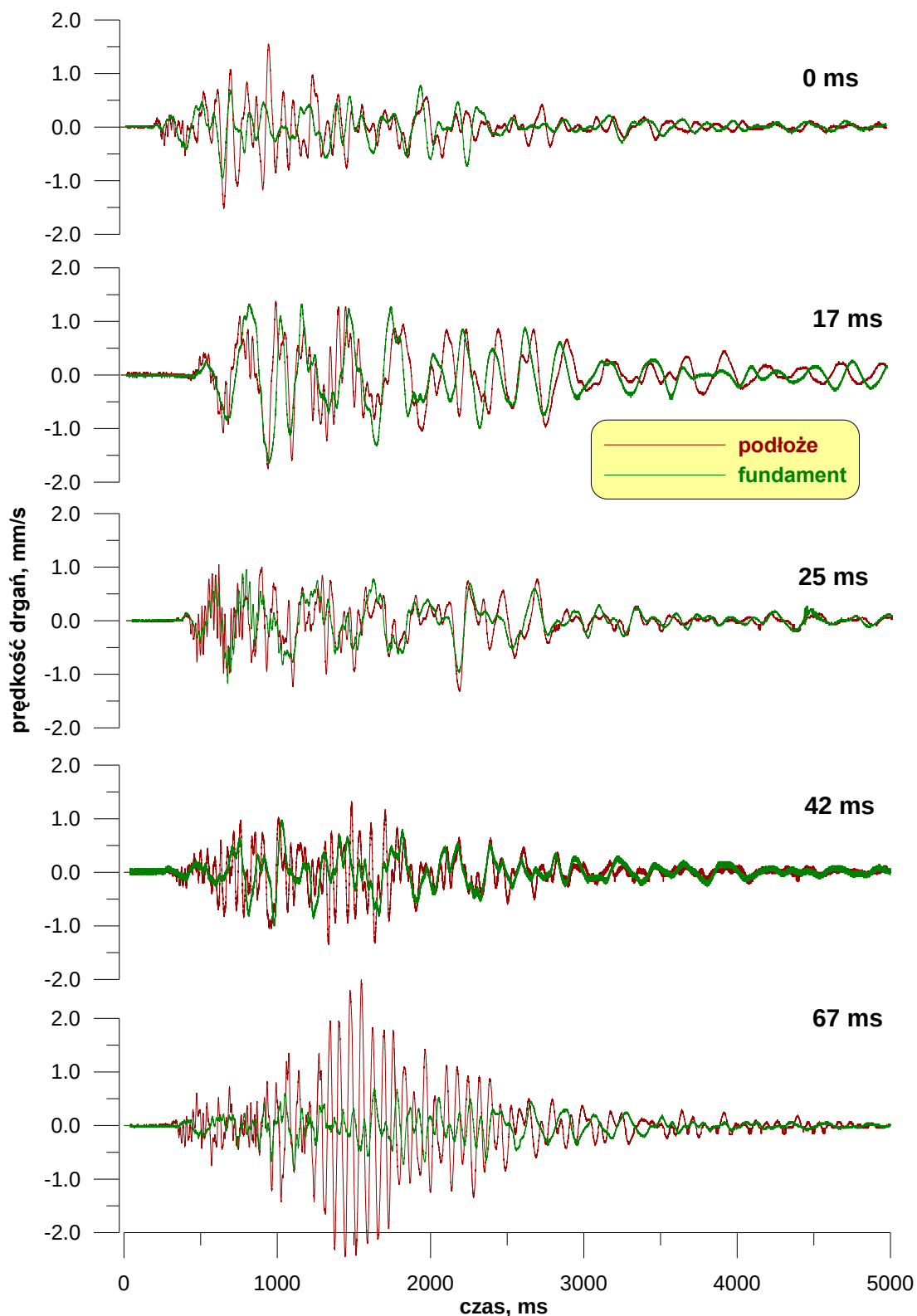
Wyniki pomiarów drgań zarejestrowanych w czasie odpalania ładunków MW, z różnymi opóźnieniami milisekundowymi zestawiono w tabeli 6.1, w której podano parametry zarejestrowanych drgań w postaci maksymalnych prędkości na poszczególnych składowych  $u_z$ ,  $u_x$  i  $u_y$ , odpowiadających tym wartościom maksymalnych częstotliwości  $f_z$ ,  $f_x$  i  $f_y$ , oraz wektorów: przestrzennego  $u_{zxy}$  i płaskiego  $u_{xy}$ .

**Tabela 6.1. Wyniki pomiarów intensywności drgań dla kopalni gipsu A**

| Lp                  | Stano-<br>wisko | Odległość | Prędkość drgań, mm/s |                |                | Częstotliwość, Hz |                |                | Wektor, mm/s     |                 |
|---------------------|-----------------|-----------|----------------------|----------------|----------------|-------------------|----------------|----------------|------------------|-----------------|
|                     |                 | m         | u <sub>z</sub>       | u <sub>x</sub> | u <sub>y</sub> | f <sub>z</sub>    | f <sub>x</sub> | f <sub>y</sub> | u <sub>zxy</sub> | u <sub>xy</sub> |
| 1                   | 2               | 3         | 4                    | 5              | 6              | 7                 | 8              | 9              | 10               | 11              |
| <b>I</b><br>0 ms    | A1              | 540       | 0,78                 | 1,55           | 1,48           | 8,7               | 10,1           | 11,2           | 1,763            | 1,761           |
|                     | A1'             | 540       |                      | 1,10           | 0,95           |                   | 8,0            | 7,5            |                  | 1,110           |
|                     | A2              | 670       | 0,53                 | 0,90           | 1,05           | 17,1              | 7,9            | 6,7            | 1,128            | 1,050           |
| <b>II</b><br>17 ms  | A1              | 640       | 1,05                 | 1,75           | 2,18           | 4,2               | 5,0            | 6,0            | 2,617            | 2,547           |
|                     | A1'             | 640       |                      | 1,80           | 1,65           |                   | 3,7            | 4,3            |                  | 2,054           |
|                     | A2              | 760       | 0,65                 | 1,70           | 1,20           | 20,6              | 3,5            | 4,1            | 1,875            | 1,858           |
| <b>III</b><br>25 ms | A1              | 580       | 0,70                 | 1,75           | 1,33           | 10,0              | 7,6            | 6,6            | 1,790            | 1,776           |
|                     | A1'             | 580       |                      | 1,18           | 1,18           |                   | 5,5            | 6,2            |                  | 1,436           |
|                     | A2              | 760       | 0,48                 | 1,25           | 0,80           | 8,0               | 3,1            | 7,6            | 1,254            | 1,254           |
| <b>IV</b><br>42 ms  | A1              | 520       | 0,73                 | 1,55           | 1,35           | 18,5              | 15,3           | 20,6           | 1,737            | 1,715           |
|                     | A1'             | 520       |                      | 0,88           | 1,00           |                   | 5,7            | 8,1            |                  | 1,167           |
|                     | A2              | 650       | 0,65                 | 1,10           | 1,08           | 21,2              | 15,3           | 14,5           | 1,456            | 1,435           |
| <b>V</b><br>67 ms   | A1              | 550       | 1,03                 | 2,10           | 2,73           | 19,2              | 15,9           | 13,7           | 3,014            | 3,013           |
|                     | A1'             | 550       |                      | 0,88           | 0,83           |                   | 11,1           | 6,6            |                  | 1,085           |
|                     | A2              | 680       | 0,83                 | 1,40           | 1,05           | 14,4              | 12,4           | 13,6           | 1,403            | 1,402           |

Pełną dokumentację zarejestrowanych drgań, czyli sejsmogramy zestawiono w załącznikach I ÷ V (Rys. Z1-1, Z2-1, Z3-1, Z4-1, Z5-1).

Dla przykładu, na rysunkach 6.1 przedstawiono sejsmogramy drgań (składowa pozioma) zarejestrowanych, na stanowiskach nr A1 i nr A1' przy odpalaniu ładunków MW systemem nieelektrycznym z zastosowaniem różnych opóźnień milisekundowych.



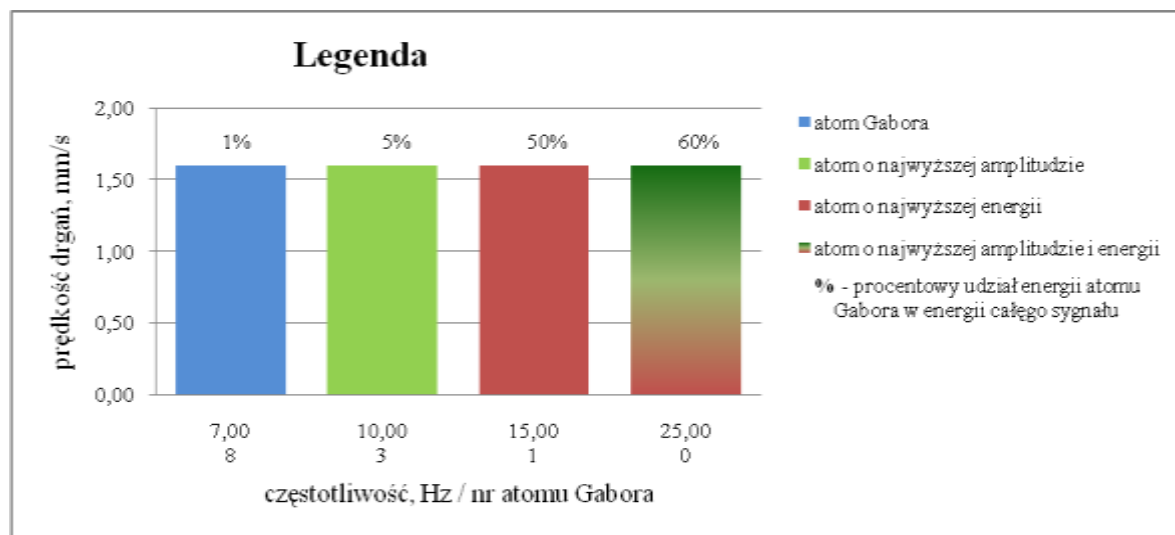
**Rys. 6.1. Sejsmogramy drgań podłoża i fundamentu - stanowiska nr A1 i nr A1' (Winzer 2004)**

Dokonując wstępnej analizy zapisów zarejestrowanych drgań, wzbudzonych odpaleniem ładunków MW, można stwierdzić istotny wpływ opóźnienia milisekundowego na częstotliwość i intensywność drgań oraz interakcję drgań podłoża i fundamentu, przy tym samym

opóźnieniu. Opóźnienie 67 ms wzbudziło drgania o największym poziomie intensywności w podłożu, ale na obiekcie drgania uległy znacznemu wytłumieniu i były najmniejsze spośród drgań wzbudzonych przez wszystkie opóźnienia w kopalni gipsu A. Analizując komplet sejsmogramów (Rys. Z1-1, Z2-1, Z3-1, Z4-1, Z5-1, załączniki I ÷ V) widać, że opóźnienie 67 ms spowodowało obniżenie poziomu rejestrowanych drgań na fundamencie w stosunku do drgań od pojedynczego ładunku. Największy poziom intensywności na fundamencie, wzbudziło opóźnienie 17 ms, przy którym praktycznie nie ma tłumienia podczas przejścia z podłoża do fundamentu. Opóźnienia 25 ms, 42 ms i 0 ms (pojedynczy ładunek otworu) mają zbliżony poziom intensywności zarówno w podłożu jak i na fundamencie.

#### 6.1.1. Analiza sygnałów z kopalni gipsu A z zastosowaniem analizy MP

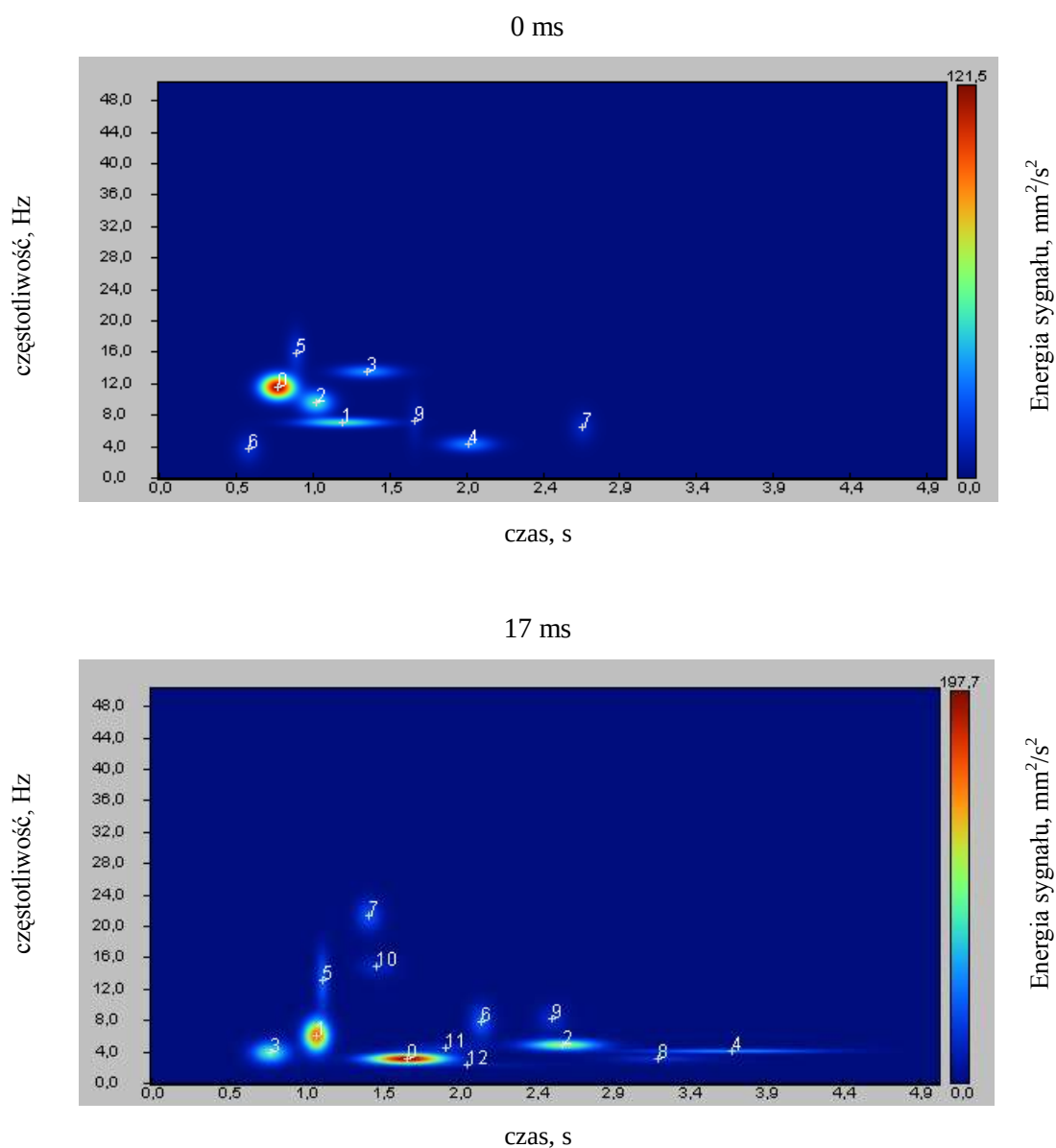
W celu dokładniejszego przeanalizowania przebiegów poddano je analizie czasowo – częstotliwościowej z wykorzystaniem metody MP. Rozkłady przedstawiono w postaci mapy Wignera – Ville’a, gdzie przedstawiono na osi x czas trwania sygnału w sekundach, na osi y częstotliwości w hercach, natomiast barwą pokazano rozkład energetyczny sygnału. W dalszej kolejności, dla lepszego zobrazowania struktury sygnału, płaską postać mapy przedstawiono w formie przestrzennej. Na samym końcu przedstawiono histogramy z atomami Gabora, które składają się na zrekonstruowany sygnał. Dla czytelniejszego i łatwiejszego odczytu danych z histogramu zastosowano określone kolory, które niosą ze sobą określoną ilość informacji i przedstawiono je w postaci legendy na rysunku 6.2.



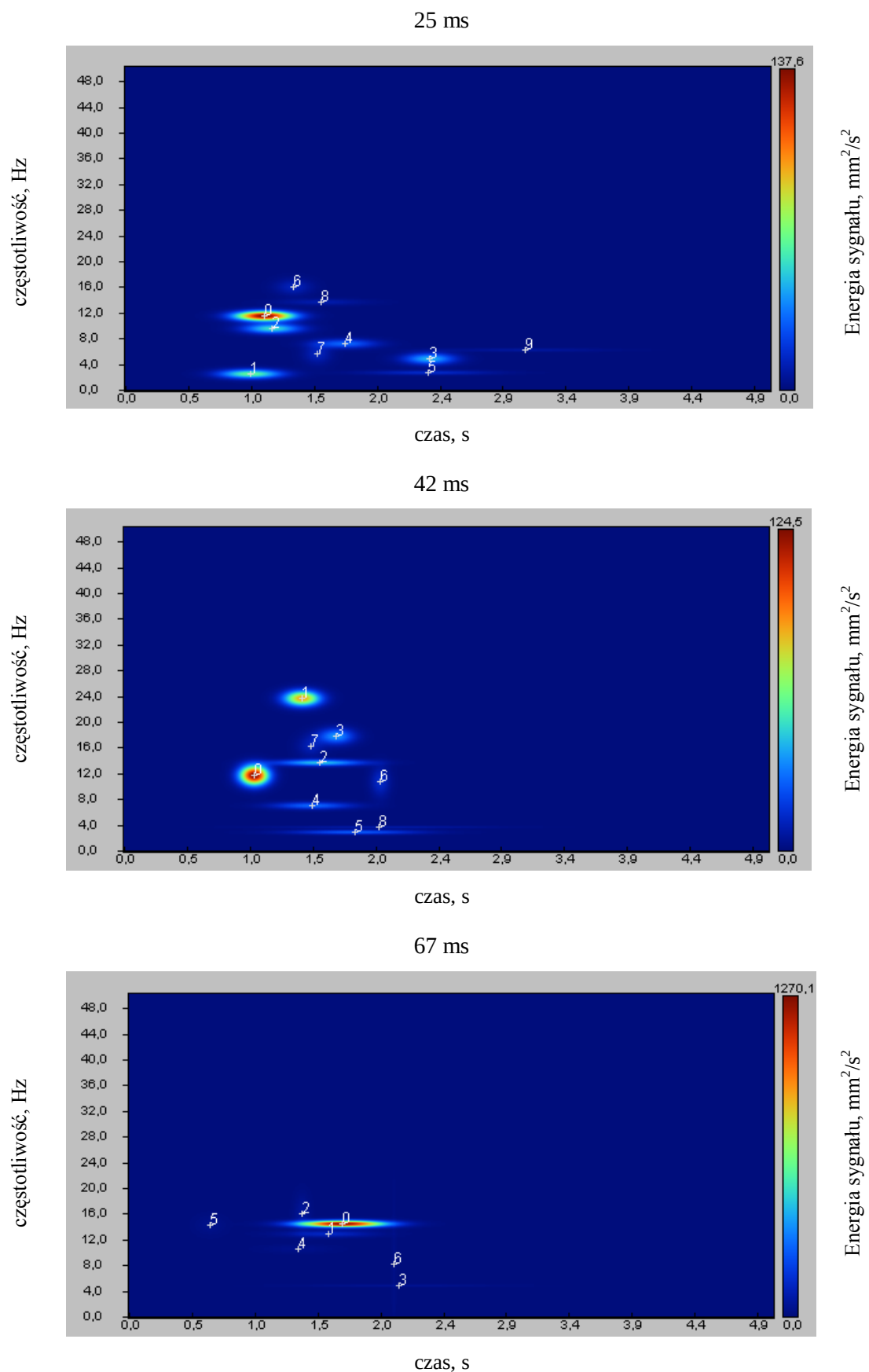
Rys. 6.2. Legenda do oznaczeń używanych w histogramach

Na rysunkach 6.3 do 6.13 przedstawiono graficznie wyniki obliczeń z zastosowaniem metody MP dla jednej ze składowych płaskich. Wynika z nich, że wielkość opóźnienia mili-

sekundowego zmienia dominujące częstotliwości drgań. Do porównań, jako punkt odniesienia, przyjęto charakterystykę drgań wzbudzanych pojedynczym ładunkiem MW.

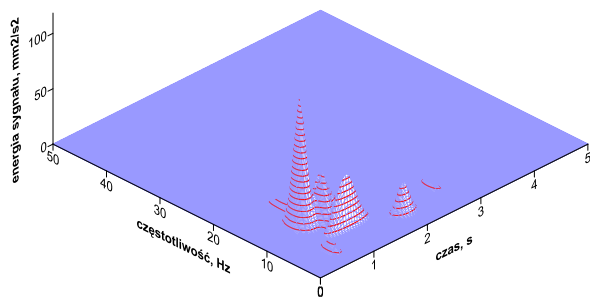


**Rys. 6.3.** Wynik analizy drgań metodą MP w postaci map Wignera Ville'a – drgania zarejestrowane w podłożu, a wzbudzone w czasie odpalania ładunków MW z różnym opóźnieniem milisekundowym

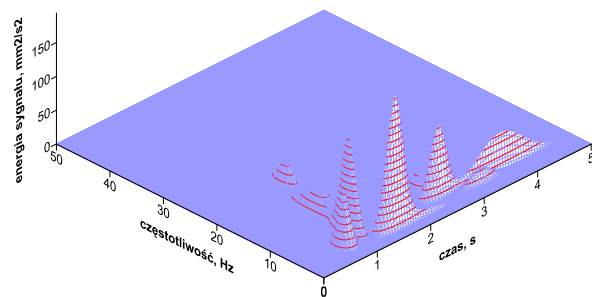


Rys. 6.4. Wynik analizy drgań metodą MP w postaci map Wignera Ville'a – drgania zarejestrowane w podłożu, a wzbudzane w czasie odpalania ładunków MW z różnym opóźnieniem milisekundowym

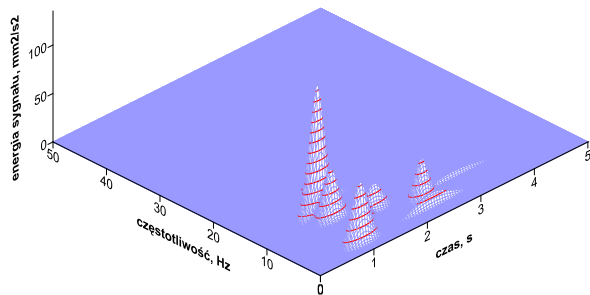




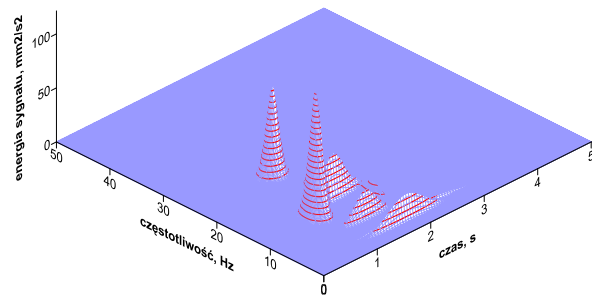
0 ms



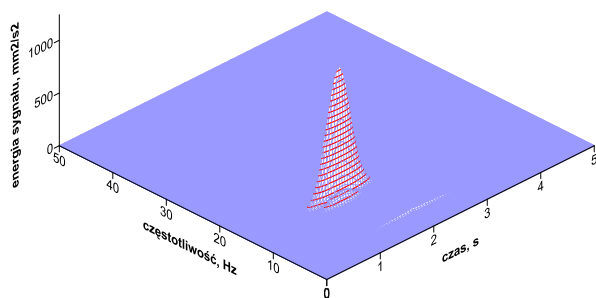
17 ms



25 ms

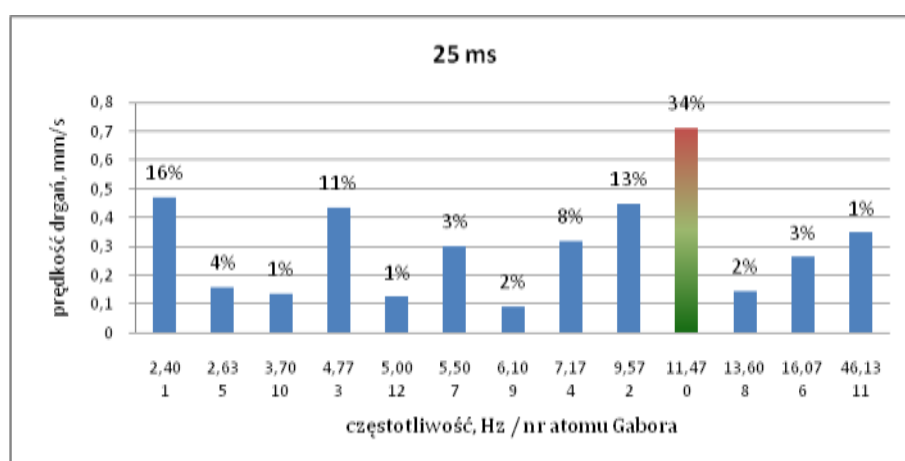
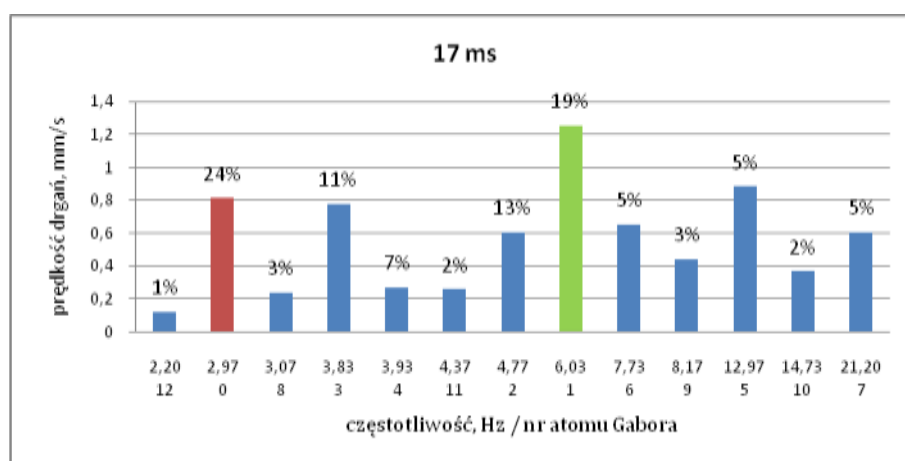
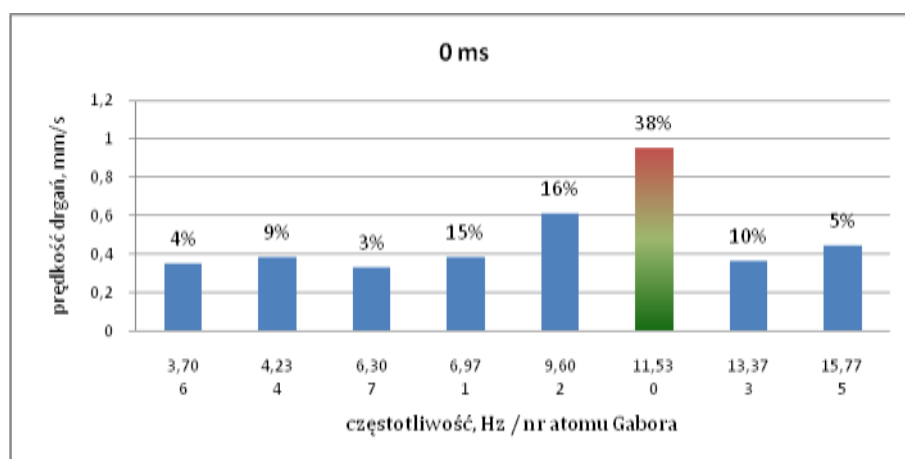


42 ms

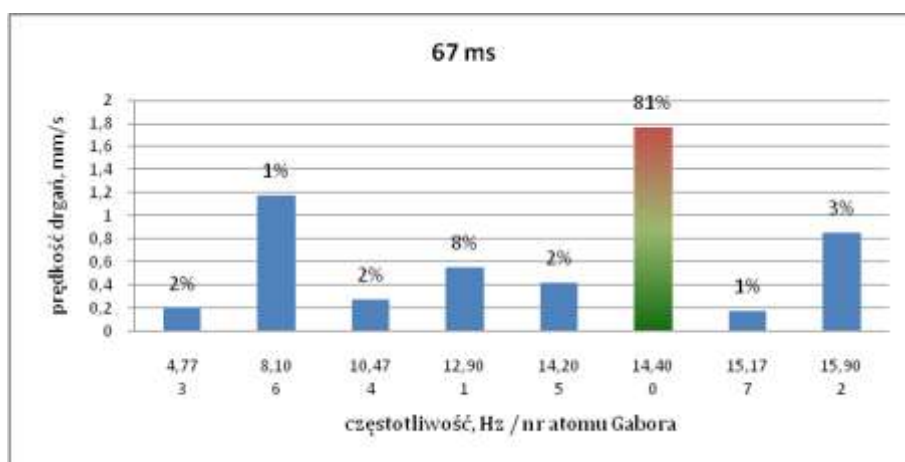
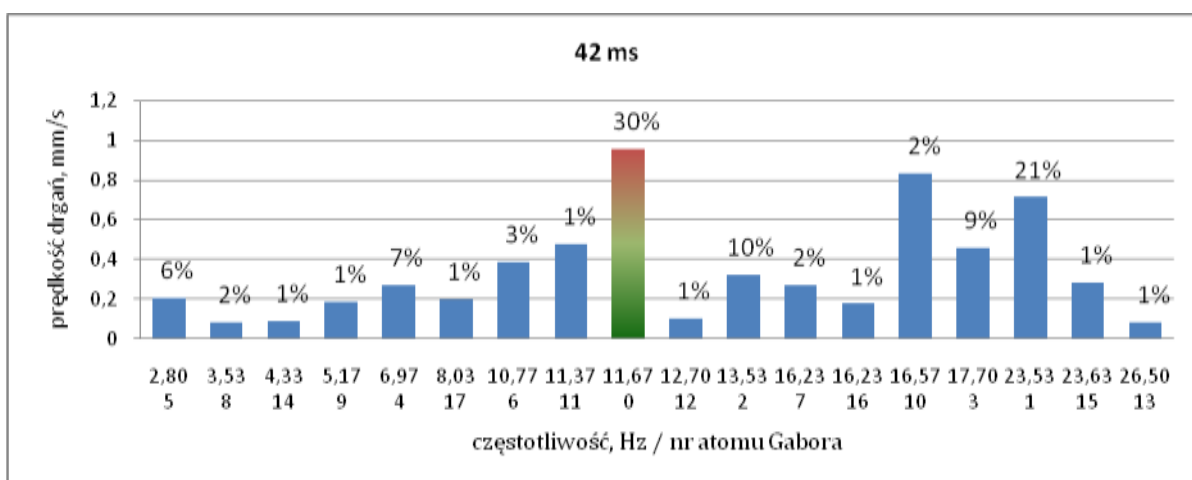


67 ms

**Rys. 6.5. Wynik analizy drgań metodą MP w postaci map przestrzennych – drgania zarejestrowane w podłożu, a wzbudzone w czasie odpalania ładunków MW z różnym opóźnieniem milisekundowym**



Rys. 6.6. Histogramy atomów Gabora dla drgań podłoża wzbudzanych poszczególnymi opóźnieniami



**Rys. 6.7. Histogramy atomów Gabora dla drgań podłoża wzbudzanych poszczególnymi opóźnieniami**

Dokonując analizy wyników drgań podłoża, wzbudzanych odpalaniem ładunków MW z różnym opóźnieniem milisekundowym, można zauważyć zmienność częstotliwości i intensywności (Rys. 6.3 ÷ 6.7). Wyniki potwierdzają wcześniejsze spostrzeżenia, że opóźnienia wpływają na charakterystyki częstotliwościowe rejestrowanych drgań. W sygnale może występować częstotliwość związana z zastosowanym opóźnieniem (FWOP – częstotliwość własna opóźnienia<sup>5</sup>) lub bardzo do niego zbliżona: 42 ms – 23,53 Hz, 67 ms – 14,4 Hz. Częstotliwości te są bardzo wyraźnie zaznaczone na rysunkach, a w przypadku opóźnienia 67 ms atom 0/14,40 Hz, czyli dominujący w strukturze wzbudzonych drgań, jest związany z częstotliwością właściwą dla tego opóźnienia.

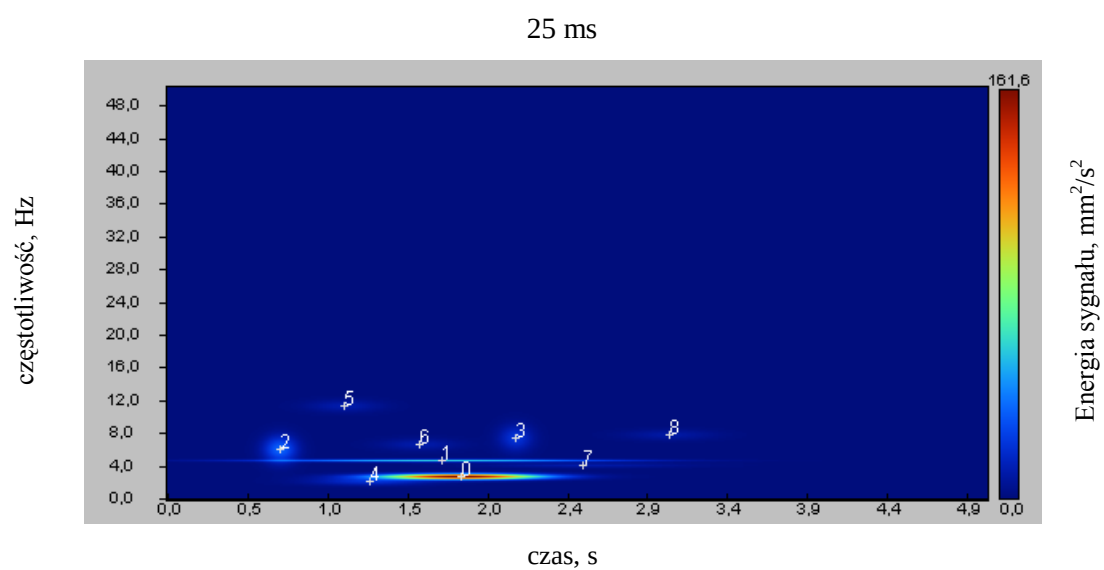
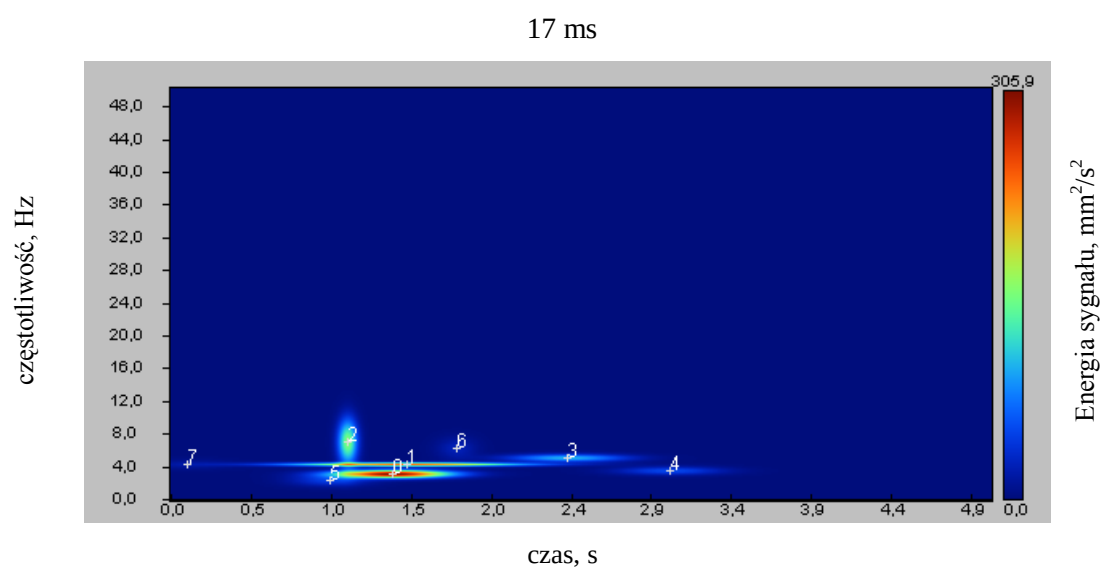
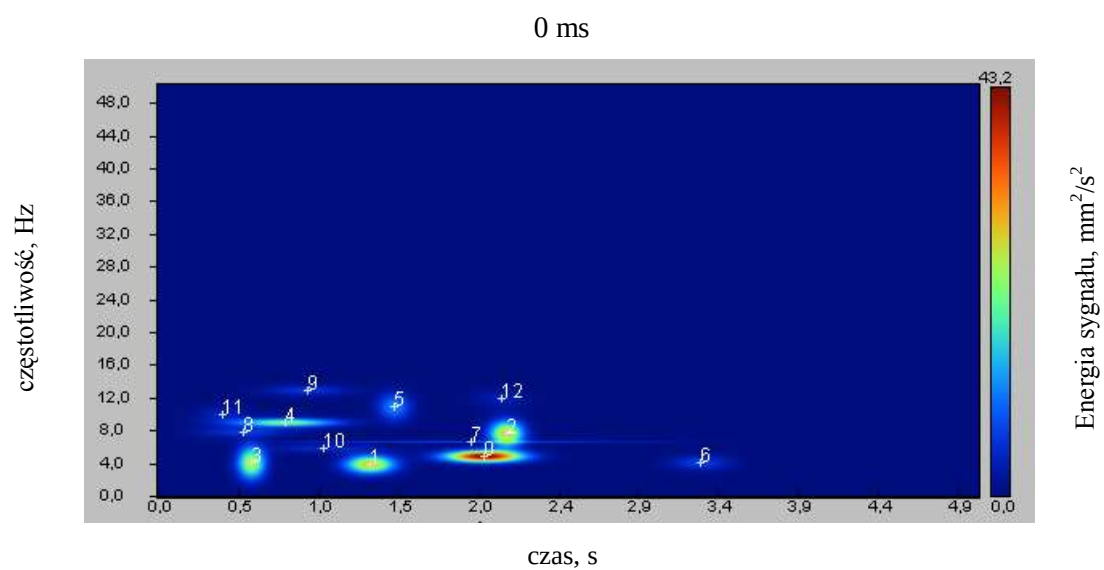
Porównując charakterystykę drgań wzbudzanych poszczególnymi opóźnieniami milisekundowymi ze strukturą częstotliwościową sygnału od pojedynczego ładunku MW, można zauważyć, że:

<sup>5</sup> Częstotliwość własna opóźnienia liczona jako odwrotność tego opóźnienia np. 25 ms to 0,025 s, czyli odwrotność  $1000/25 = 40$  Hz.

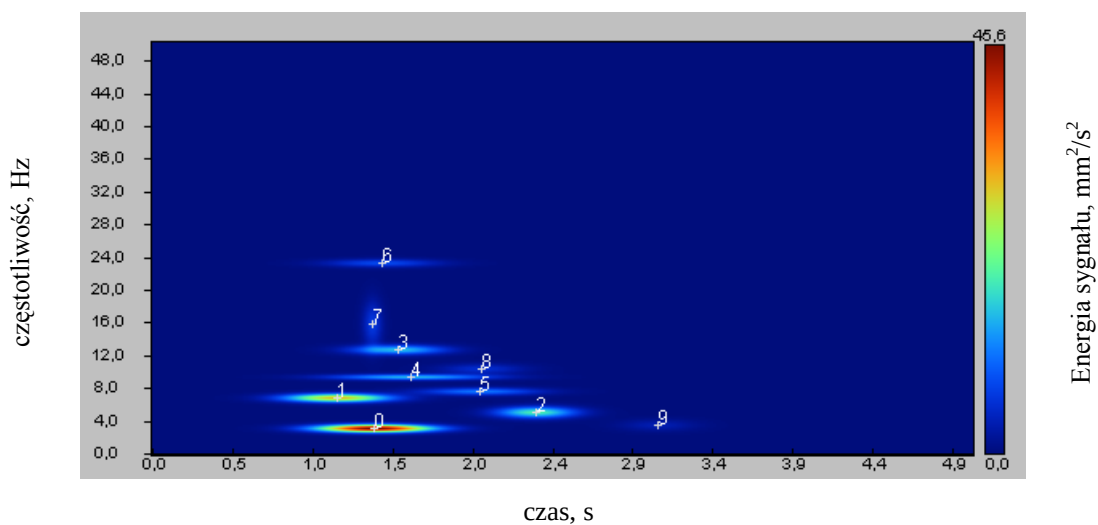
- opóźnienie 17 ms wzbudza drgania o częstotliwości dominującej 2,97 Hz (24% energii sygnału), czyli niższą od 11,53 Hz, charakterystyczną dla pojedynczego ładunku (38% energii sygnału),
- opóźnienie 25 ms jest najbardziej zbliżone charakterystyką do pojedynczego ładunku (11,47 Hz – 34% energii sygnału), niezauważalna jest FWOP 40 Hz, występuje atom o częstotliwości 46,13 Hz, ale jest on nie znaczący w sygnale, opisuje tylko 1% energii sygnału,
- opóźnienie 42 ms jest również bardzo zbliżone do charakterystyki pojedynczego ładunku (11,67 Hz – 30% energii sygnału), ale wzbudza już w wyraźniej niż opóźnienie 25 ms FWOP 23,53 Hz (21% energii sygnału),
- opóźnienie 67 ms, podwyższa częstotliwość dominującą do FWOP 14,4 Hz (81% energii sygnału), a brak jest częstotliwości własnej podłoża 11,53 Hz.

Widać również, że jest pewna trudność w wymuszaniu określonych częstotliwości podłoża przez opóźnienie w tym punkcie pomiarowym, zwłaszcza przez opóźnienia o mniejszym czasie (17 i 25 ms), i dopiero opóźnienie 67 ms w wyraźny sposób zarysowało swoją częstotliwość.

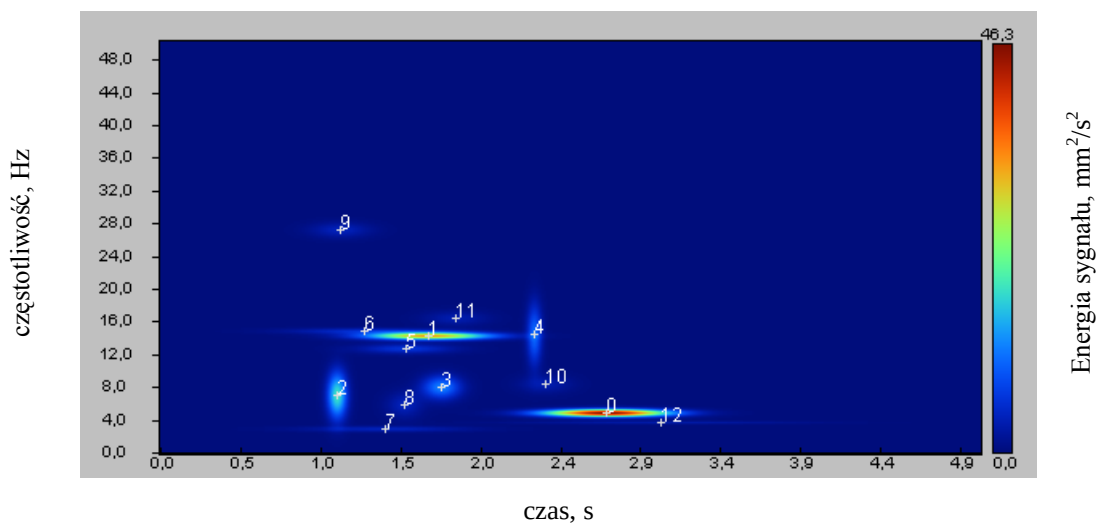
Analizując drugą składową poziomą (załączniki I ÷ V, Rys. Z1- 8 ÷ 10, Z2- 8 ÷ 10, Z3- 8 ÷ 10, Z4- 8 ÷ 10, Z5- 8 ÷ 10) można zauważyć duże podobieństwo w strukturze sygnału między składowymi. Częstotliwości są bardzo do siebie zbliżone, różnice są tylko w kolejności występowania tych częstotliwości w poszczególnych atomach. Bardzo podobną strukturę do płaskich składowych ma składowa pionowa (załączniki I ÷ V, Rys. Z1- 2 ÷ 4, Z2- 2 ÷ 4, Z3- 2 ÷ 4, Z4- 2 ÷ 4, Z5- 2 ÷ 4), zbliżone wartości częstotliwości i struktury sygnału.



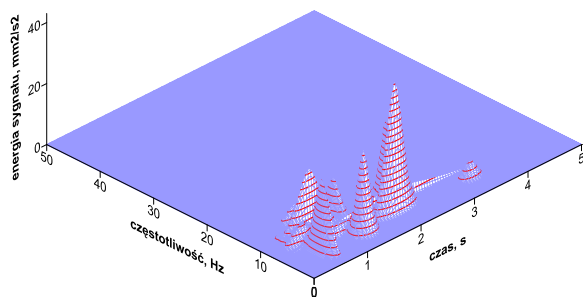
**Rys. 6.8. Wynik analizy drgań metodą MP w postaci map Wignera Ville'a – drgania zarejestrowane na fundamencie, a wzbudzone w czasie odpalania ładunków MW z różnym opóźnieniem milisekundowym**  
42 ms



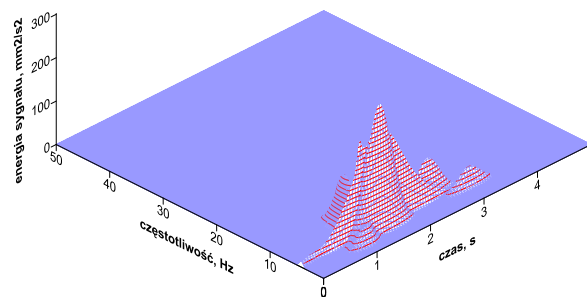
67 ms



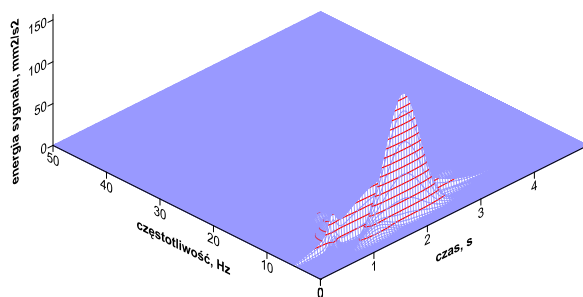
**Rys. 6.9. Wynik analizy drgań metodą MP w postaci map Wignera Ville'a – drgania zarejestrowane na fundamencie, a wzbudzone w czasie odpalania ładunków MW z różnym opóźnieniem milisekundowym**



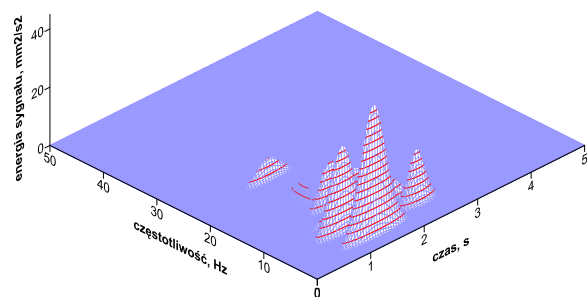
0 ms



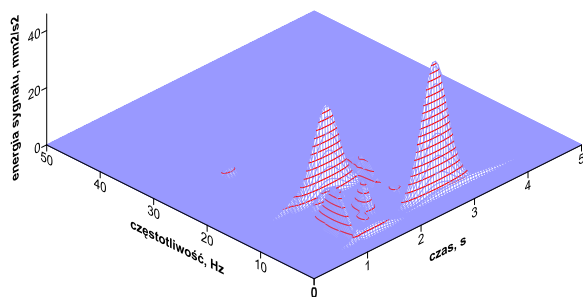
17 ms



25 ms

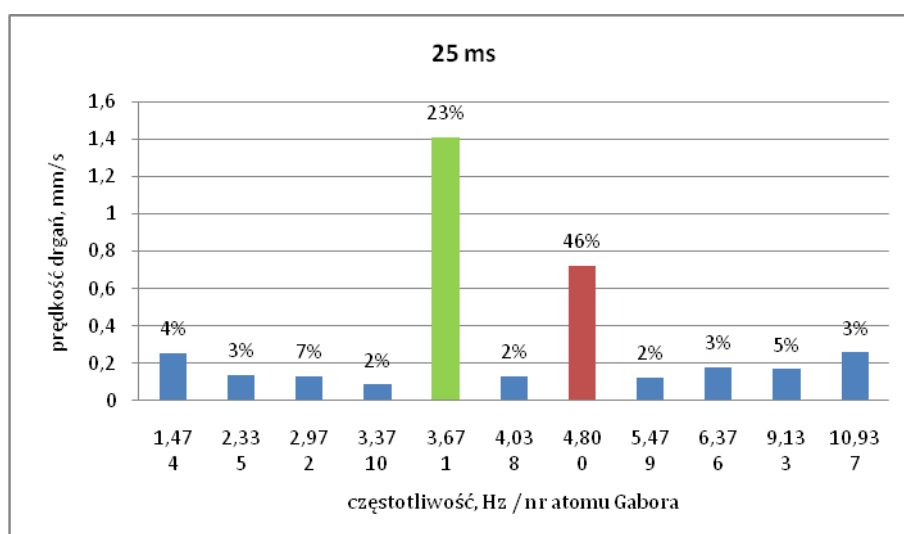
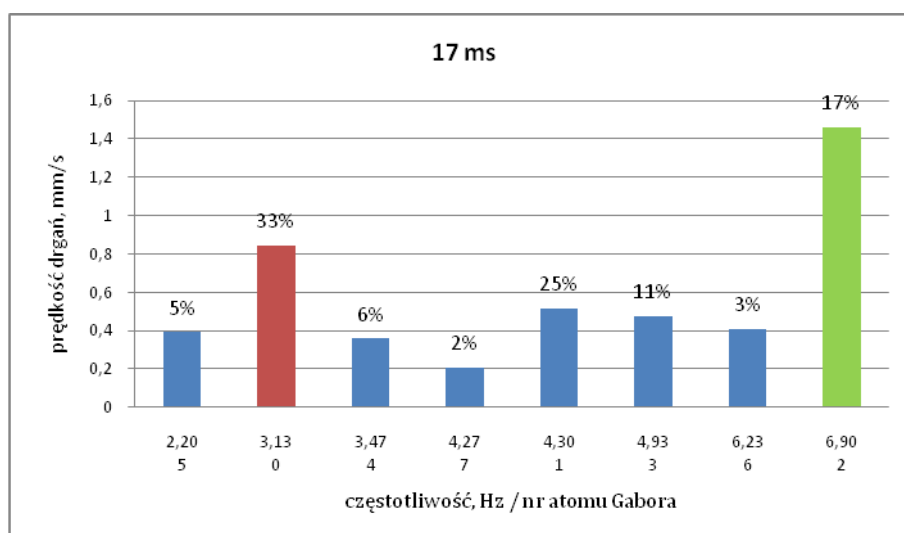
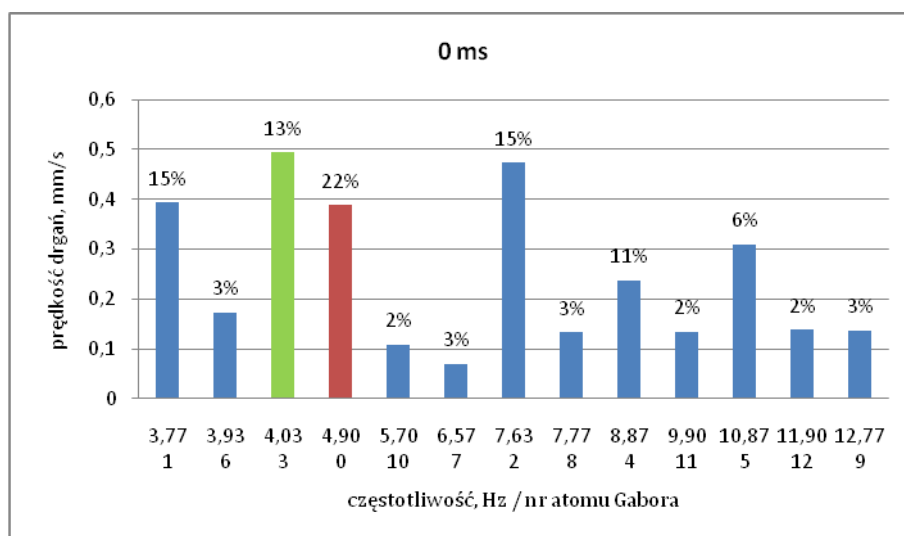


42 ms



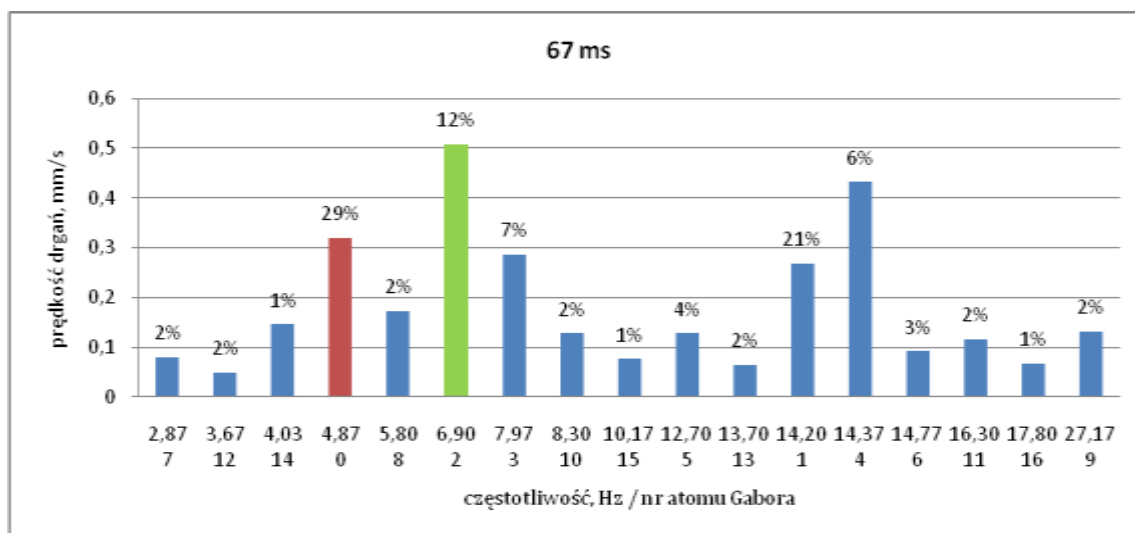
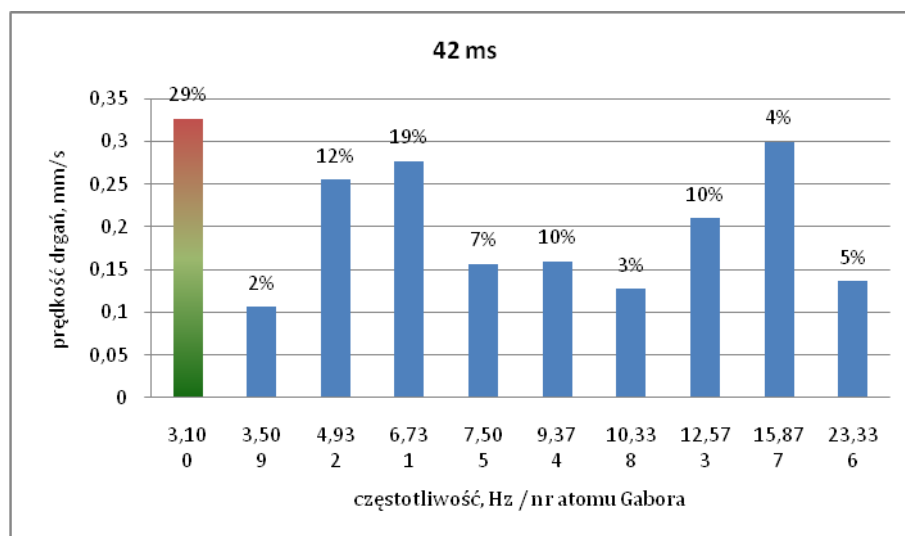
67 ms

**Rys. 6.10. Wynik analizy drgań metodą MP w postaci map przestrzennych – drgania zarejestrowane na fundamencie, a wzbudzone w czasie odpalania ładunków MW z różnym opóźnieniem milisekundowym**



**Rys. 6.11. Histogramy atomów Gabora dla drgań fundamentu wzbudzanych poszczególnymi opóźnieniami**





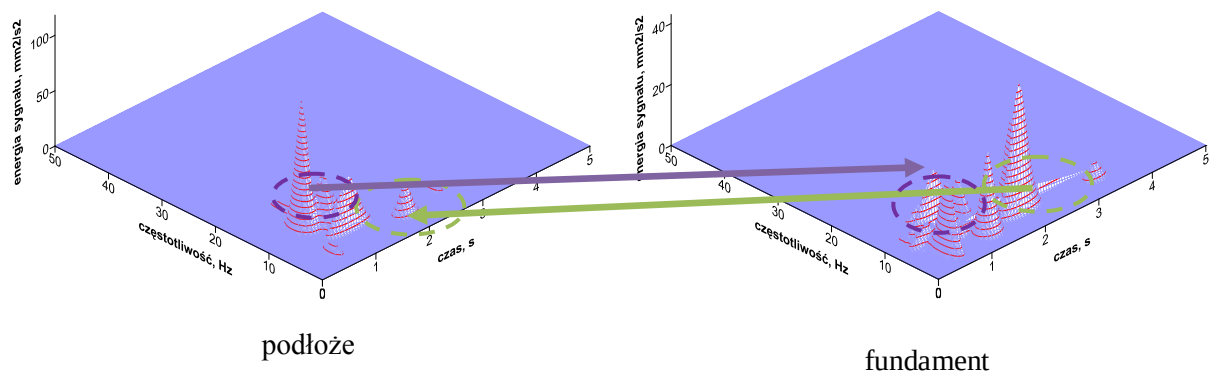
**Rys. 6.12. Histogramy atomów Gabora dla drgań fundamentu wzbudzanych poszczególnymi opóźnieniami**

Analizując wyniki drgań fundamentu obiektu, można zauważyć zmienność częstotliwości i intensywności (Rys. 6.8 ÷ 6.12), ale w odmienny sposób niż dla podłoża. Wyniki potwierdzają również spostrzeżenia, że opóźnienia wpływają na strukturę częstotliwościową drgań rejestrowanych na fundamencie. W sygnale dużo trudniej jest już odnaleźć FWOP lub bardzo do niego zbliżoną: 42 ms – 23,33 Hz, 67 ms – 14,37 Hz.

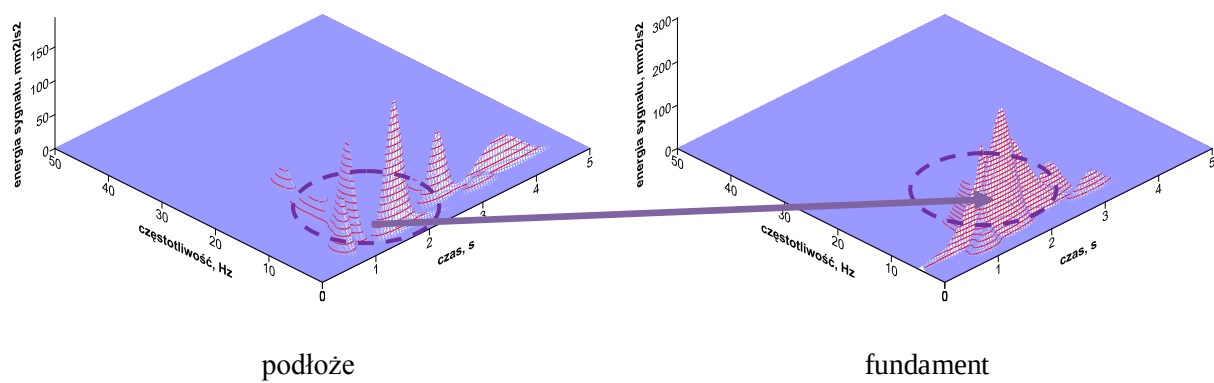
Porównując charakterystykę drgań wzbudzanych poszczególnymi opóźnieniami milisekundowymi, ze strukturą częstotliwościową sygnału od pojedynczego ładunku MW, można zauważyć, że:

- opóźnienie 17 ms wzbudza drgania o częstotliwości dominującej 3,13 Hz (33% energii sygnału), czyli niższą od 4,9 Hz charakterystyczną dla pojedynczego ładunku (22% energii sygnału); jednak dla pojedynczego atomu największa amplituda wystąpiła przy częstotliwości 4,03 Hz (13% energii sygnału)
- opóźnienie 25 ms jest najbardziej zbliżone charakterystyką do pojedynczego ładunku (4,8 Hz – 46% energii sygnału), a największa amplituda wystąpiła przy częstotliwości 3,67 Hz (23% energii sygnału),
- opóźnienie 42 ms obniżyło częstotliwość dominującą do 3,1 Hz (29% energii sygnału), a atom nr 2 o częstotliwości najbardziej zbliżonej do częstotliwości dominującej w pojedynczym ładunku reprezentuje 12% energii (4,93 Hz), na fundamencie wystąpiła również FWOP, ale w śladowej ilości – atom nr 6 o częstotliwości 23,33 (5% energii sygnału),
- opóźnienie 67 ms, o częstotliwość dominującą najbardziej zbliżonej do częstotliwości własnej fundamentu 4,87 Hz (29% energii sygnału); największa amplituda wystąpiła dla częstotliwości 6,9 Hz (12% energii sygnału); w strukturze sygnału pojawiają się również FWOP: 1/14,20 Hz (21% energii sygnału), 4/14,37 Hz (6%) i 6/14,77 (3%).

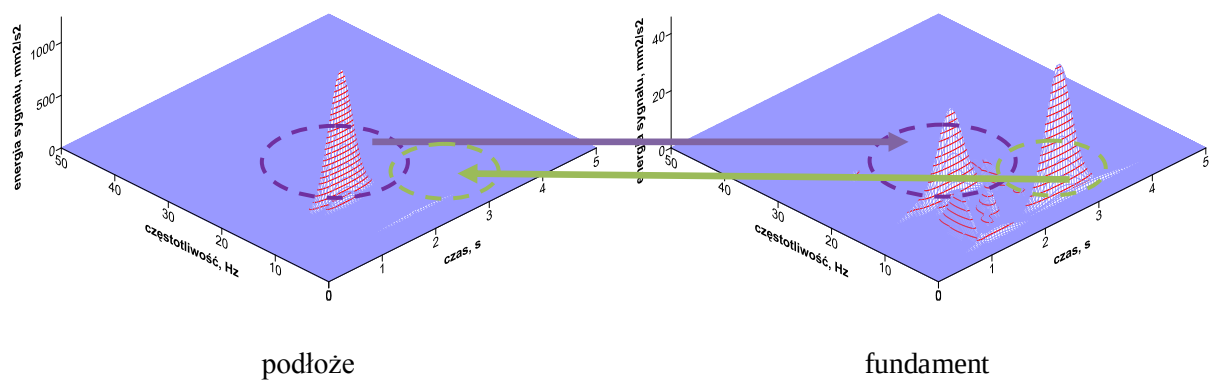
Analizując pozostałe składowe (załączniki I ÷ V, rys. Z1- 14 ÷ 16, Z2- 14 ÷ 16, Z3- 14 ÷ 16, Z4- 14 ÷ 16, Z5- 14 ÷ 16) widać również, że jest większa trudność w wymuszaniu określonych częstotliwości fundamentu obiektu, niż w przypadku podłoża, i dopiero opóźnienie 67 ms w wyraźny sposób zarysowało FWOP.



0 ms



17 ms



67 ms

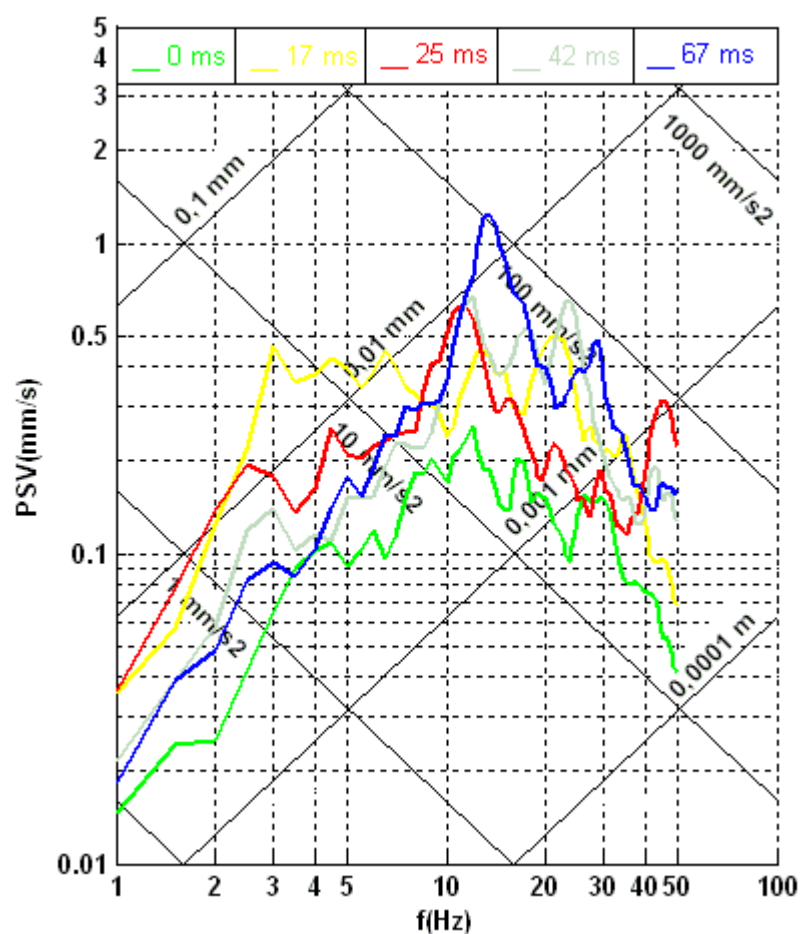
Rys. 6.13. Porównanie struktury drgań przy przejściu z podłoża do fundamentu dla wybranych opóźnień

Na rysunku 6.13 przedstawiono porównanie struktury częstotliwościowej sygnałów zarejestrowanych w podłożu i na fundamencie obiektu dla opóźnień 0 ms, 17 ms i 67 ms. W przypadku odpalania pojedynczego ładunku MW w podłożu, dominującą częstotliwością było 11,53 Hz, które po przejściu do fundamentu wytłumiło się i zostały tylko częstotliwości niższe w granicach 4 – 5 Hz. W przypadku opóźnienia 17 ms niezauważalna jest taka zmiana, zarówno w podłożu jak i na fundamencie dominują niższe częstotliwości w granicach 3 Hz, ale największa amplituda atomu wystąpiła przy częstotliwości około 7 Hz. Zwraca uwagę również fakt wzrostu energii sygnału na fundamencie dla tych częstotliwości. Odmierna sytuacja wystąpiła przy opóźnieniu 67 ms, dla którego w podłożu dominująca częstotliwość wynosiła 14,4 Hz, charakteryzująca się wysoką energią. Po przejściu do fundamentu wystąpiło tłumienie tej częstotliwości, a większość energii jest skoncentrowana w częstotliwości 5 Hz.

#### **6.1.2. Spektrum odpowiedzi drgań zarejestrowanych w otoczeniu kopalni gipsu A**

Zgodnie z przedstawionym na początku tego rozdziału programem analizy wyników pomiarów, w następnym etapie, przeprowadzono wraz z obliczeniami badanie wpływu opóźnienia milisekundowego na kształt krzywej spektrum odpowiedzi. Do obliczeń opisanych w rozdziale 4.3.1. wykorzystano program SPSS.

Wyniki obliczeń, w formie graficznej, przedstawiono dla jednej składowej poziomej na rysunkach 6.14 ÷ 6.18. Rysunki ilustrują pseudoprędkościowe spektrum odpowiedzi (*PSV*) zależne od częstotliwości. Pełną dokumentację analizy wszystkich składowych dla poszczególnych opóźnień zestawiono w załącznikach I ÷ V (Rys. Z1- 17÷19, Z2- 17÷19, Z3- 17÷19, Z4- 17÷19, Z5- 17÷19).



Rys. 6.14. Pseudoprędkościowe spektra odpowiedzi drgań zarejestrowanych na stanowisku A1 – składowa x

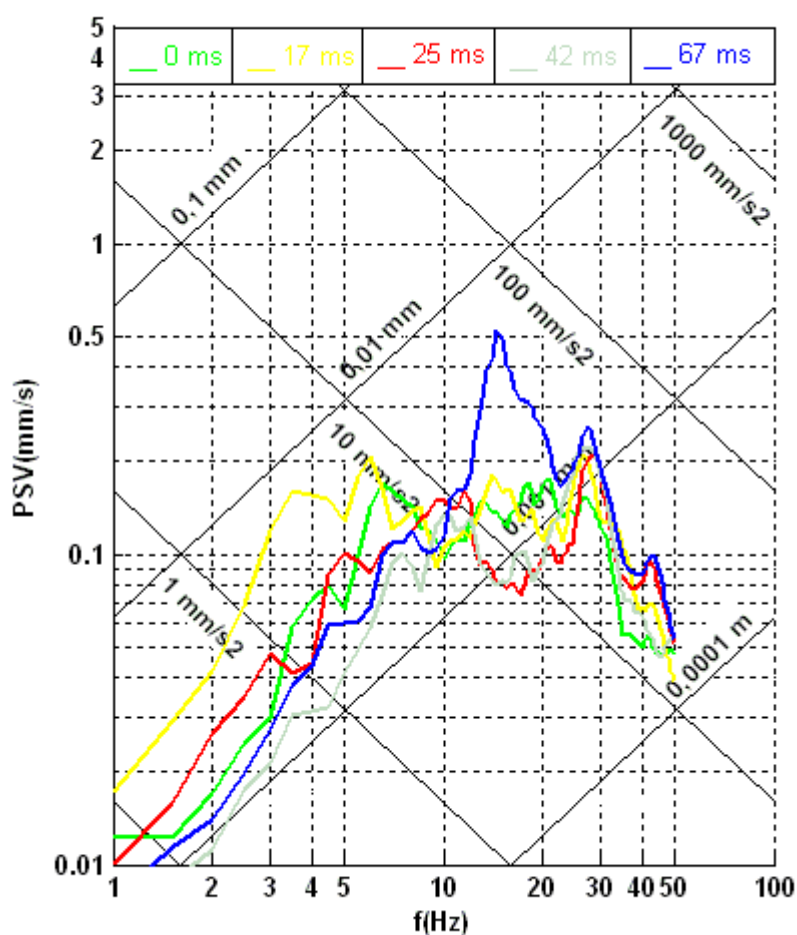
Rysunek 6.14 ilustruje krzywe spektrum odpowiedzi drgań, wzbudzanych odpalaniem ładunków MW z różnym opóźnieniem milisekundowym, wyznaczone dla podłoża na stanowisku 1. Z rysunku widać, że zastosowane opóźnienie spowodowało zmianę struktury rejestrowanych drgań:

- pojedynczy ładunek (0 ms) – drgania mogą być traktowane jako charakterystyczne dla podłoża, a ich spektrum odpowiedzi jako wzorcowe, spodziewana maksymalna odpowiedź obiektu na takie wymuszenie wyniosła 0,26 mm/s (maksymalna wartość *PSV*) i wystąpiła dla częstotliwości 12 Hz,
- opóźnienie 17 ms – maksymalna wartość *PSV* wystąpiła dla częstotliwości 21 Hz i wyniosła 0,51 mm/s, a kolejna wartość szczytowa dla częstotliwości 13 Hz wyniosła 0,45 mm/s,
- opóźnienie 25 ms – kształt krzywej *PSV* jest najbardziej zbliżony do krzywej uzyskanej z analizy dla pojedynczego ładunku, wartość maksymalna wystąpiła dla częstotli-

wości 11 Hz i wyniosła 0,6 mm/s, różnice w krzywych występują w zakresie wyższych częstotliwości około 45 Hz, co wynika z zastosowanego opóźnienia,

- opóźnienie 42 ms – spowodowało powstanie dwóch maksimów o bardzo zbliżonych wartościach jedno o częstotliwości 24 Hz (0,61 mm/s) – charakterystyczna częstotliwość opóźnienia, a drugie dla 12 Hz (0,62 mm/s),
- opóźnienie 67 ms – krzywa *PSV* ma największą wartość ze wszystkich krzywych spektralnych wyznaczonych dla poszczególnych opóźnień i wynosi 1,25 mm/s dla częstotliwości 14 Hz, która wynika z zastosowanego opóźnienia.

Rysunek 6.15 ilustruje tę samą składową na stanowisku w podłożu, tylko bardziej oddalonym od miejsca wykonywania robót strzałowych (st. A2).

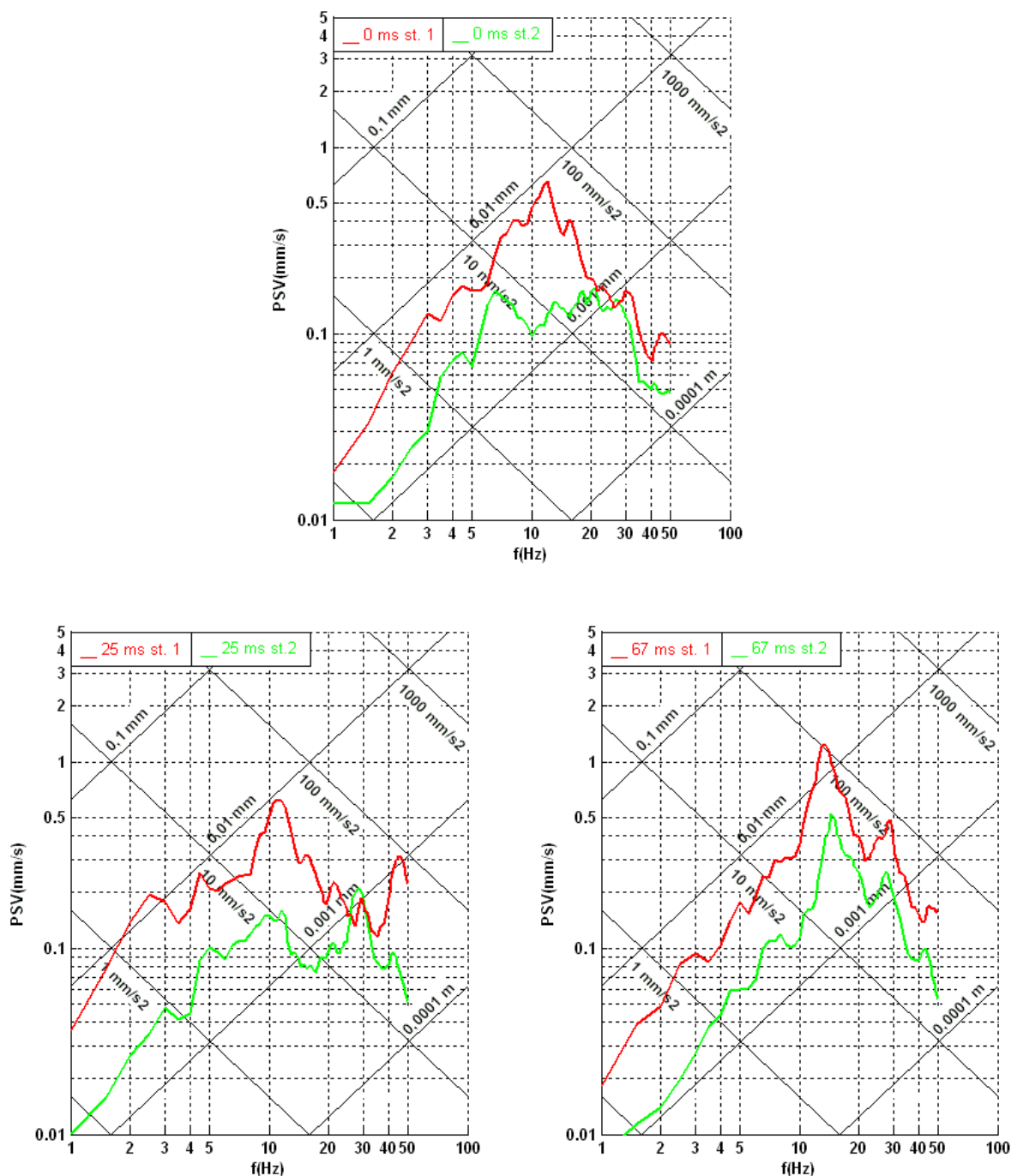


Rys. 6.15. Pseudoprędkościowe spektra odpowiedzi drgań zarejestrowanych na stanowisku A2 – składowa x

Analizując rysunek 6.15 widać, że maksymalne wartości *PSV* jak i same kształty krzywych są już do siebie bardzo zbliżone dla większości opóźnień. Wyjątek stanowi opóźnienie 67 ms, które to dla częstotliwości 14,5 Hz ma największą wartość *PSV* i wynosi

0,51 mm/s. W przypadku *PSV*, obliczonych dla wszystkich opóźnień, z wyjątkiem opóźnienia 67 ms, widać że maksima występują dla częstotliwości 29 Hz.

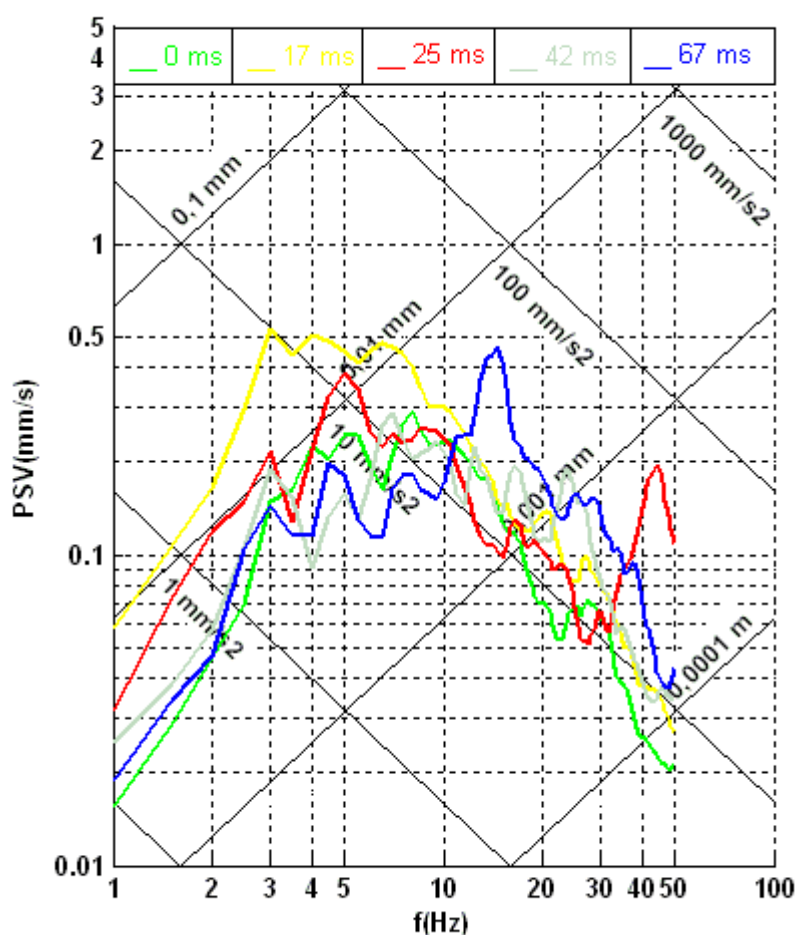
Na rysunku 6.16 przedstawiono przykładowe *PSV* z obu stanowisk w celu lepszej wizualizacji omawianego problemu.



**Rys. 6.16. Porównanie PSV dla stanowiska A1 i A2 dla różnych opóźnień – składowa x**

Spektrum odpowiedzi wyznaczone dla stanowiska A2 znacznie się różni od spektrum odpowiedzi dla stanowiska A1, co świadczy o zmianie podłoża. Częstotliwość 12 Hz została

stłumiona, natomiast częstotliwości 6 i  $20 \div 30$  Hz zostały na zbliżonym poziomie. W przypadku opóźnienia 25 ms widać wyraźne wzmocnienie PSV przy częstotliwości 29 Hz. Dla opóźnienia 67 ms kształty krzywych PSV są bardzo do siebie zbliżone, tylko krzywa PSV wyznaczona dla stanowiska A2 jest przesunięta w dół, co jest spowodowane mniejszą intensywnością drgań na tym stanowisku (wpływ odległości).



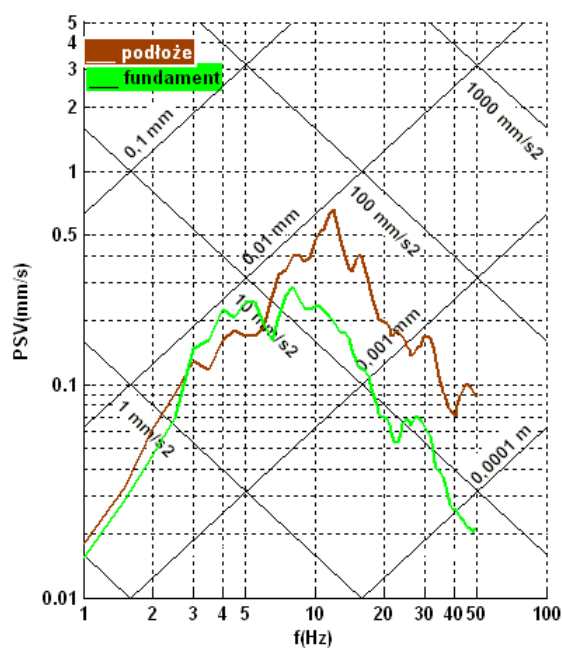
**Rys. 6.17.** Pseudoprędkościowe spektra odpowiedzi drgań zarejestrowanych na stanowisku A1' – składowa x

Chociaż metoda spektrum odpowiedzi zakłada, że drgania są mierzone w podłożu i wyznaczana jest spodziewana odpowiedź obiektu jako układu o jednym stopniu swobody, to w celu weryfikacji zostało obliczone PSV drgań zarejestrowanych na fundamencie obiektu (rys. 6.17) posadowionego na podłożu stanowiska A1 (stanowisko A1').

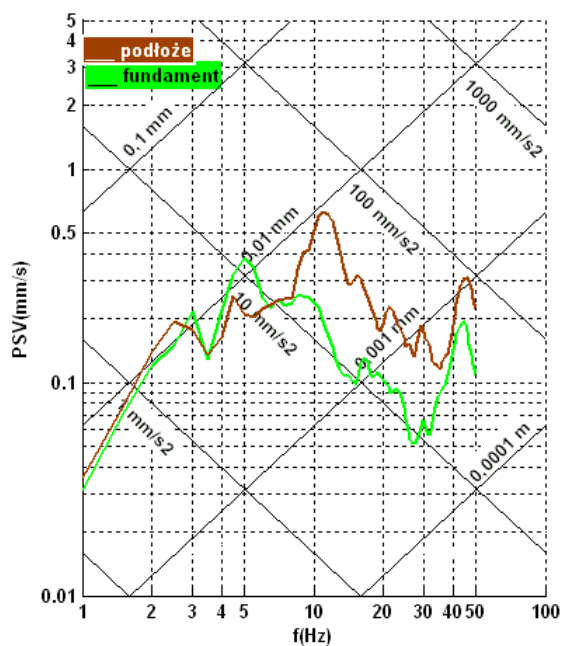
Na fundamencie obiektu dominują niższe częstotliwości  $3 \div 10$  Hz. Jedynie dla opóźnienia 67 ms PSV ma wartość maksymalną dla częstotliwości 14 Hz. W celu lepszego zobrazowania problemu zmiany krzywej PSV przy przejściu drgań z podłoża do fundamentu obiektu przedstawiono przykładowo trzy opóźnienia dla składowej x na rysunku 6.18.



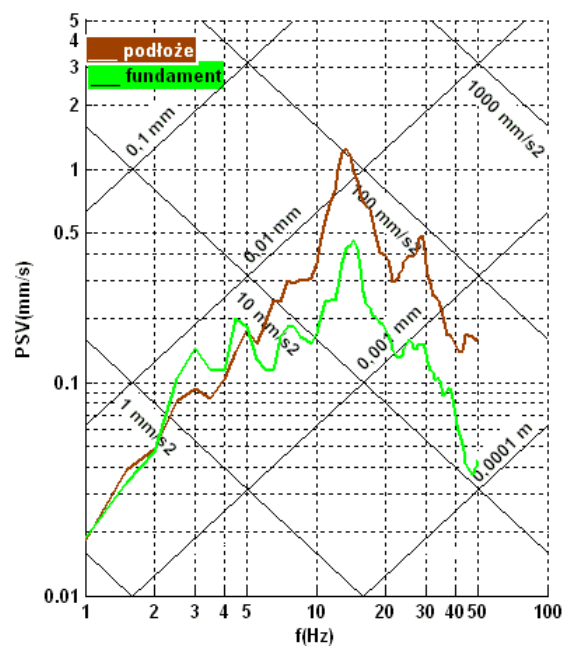
0 ms



25 ms



67 ms



**Rys. 6.18. Porównanie PSV dla stanowiska A1 i A1' dla różnych opóźnień – składowa x**

Dokonując porównania krzywych *PSV* widać, że wyższe częstotliwości zostały wytłumione, a niższe zostały wzmocnione w zakresie  $5 \div 10$  Hz. Mimo tłumienia jakie występuje podczas przejścia sygnału zauważalne są FWOP. W przypadku obiektu również potwierdza

się istotny wpływ zastosowanego opóźnienia na częstotliwość dominującą, zwłaszcza dla opóźnienia 67 ms.

Otrzymane spektra odpowiedzi pozwalają na porównywanie bezpośrednie efektu sejsmicznego wzbudzanego stosowaniem, do odpalania ładunków MW, różnych opóźnień milisekundowych. Dla lepszego ujęcia ilościowego zmian zastosowano miarę decybelową, która jest stosowana do określania względnej mocy sygnałów. Ponieważ moc sygnałów czasowych (a takimi sygnałami są drgania) jest proporcjonalna do kwadratu prędkości (Lyons 2000), do analizy porównawczej zastosowano zależność:

$$w_{dB} = 20 \cdot \log_{10} \left( \frac{PSV_{ms}}{PSV_0} \right) \quad 6.1$$

gdzie:

$w_{dB}$  – współczynnik względnej mocy,

$PSV_{ms}$  – wartość  $PSV$  dla danego opóźnienia,

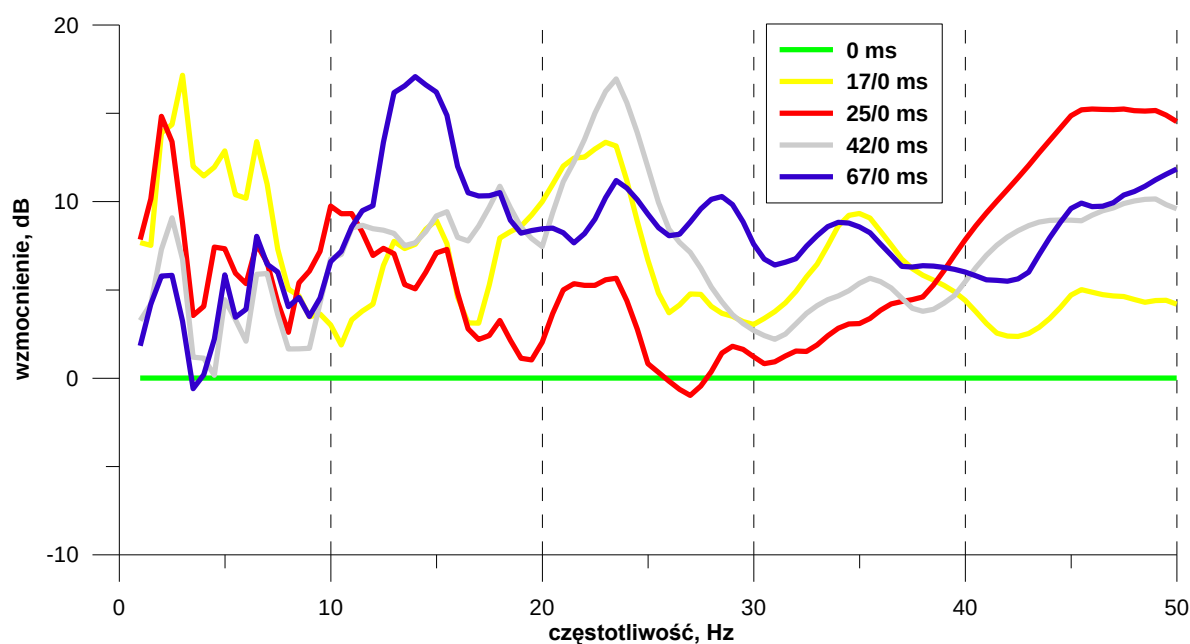
$PSV_0$  – wartość  $PSV$  dla pojedynczego ładunku,

Dzielenie przez wartość  $PSV_0$  zawsze wymusza przyrównanie do 0 dB pierwszej wartości – przyjmowanej jako poziom odniesienia. Stąd łatwość wnioskowania o wzmocnieniu lub tłumieniu względem poziomu odniesienia.

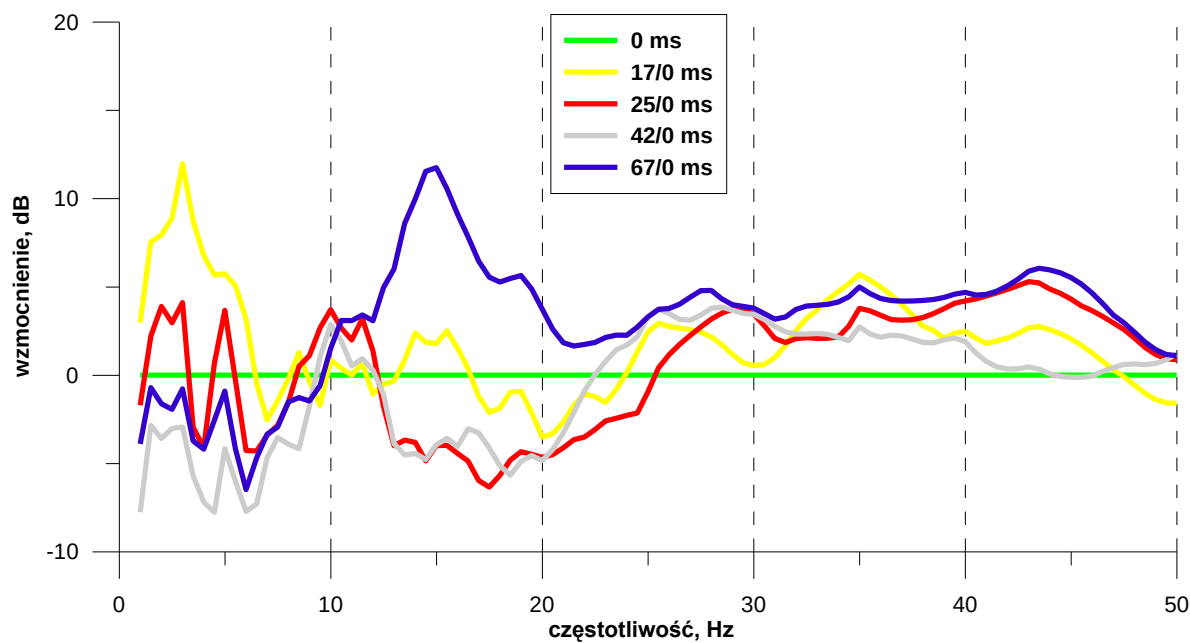
Wyznaczanie współczynnika względnej mocy sygnałów, przyjęto jako metodę porównania struktury częstotliwościowej  $PSV$ , dla drgań zarejestrowanych w czasie odpalania długich otworów, z zastosowaniem różnych opóźnień milisekundowych.

Jako poziom odniesienia do obliczeń przyjęto  $PSV$  będące wynikiem analizy efektu sejsmicznego odpalenia pojedynczego ładunku MW (na rysunkach oś odciętych zaznaczono kolorem zielonym).

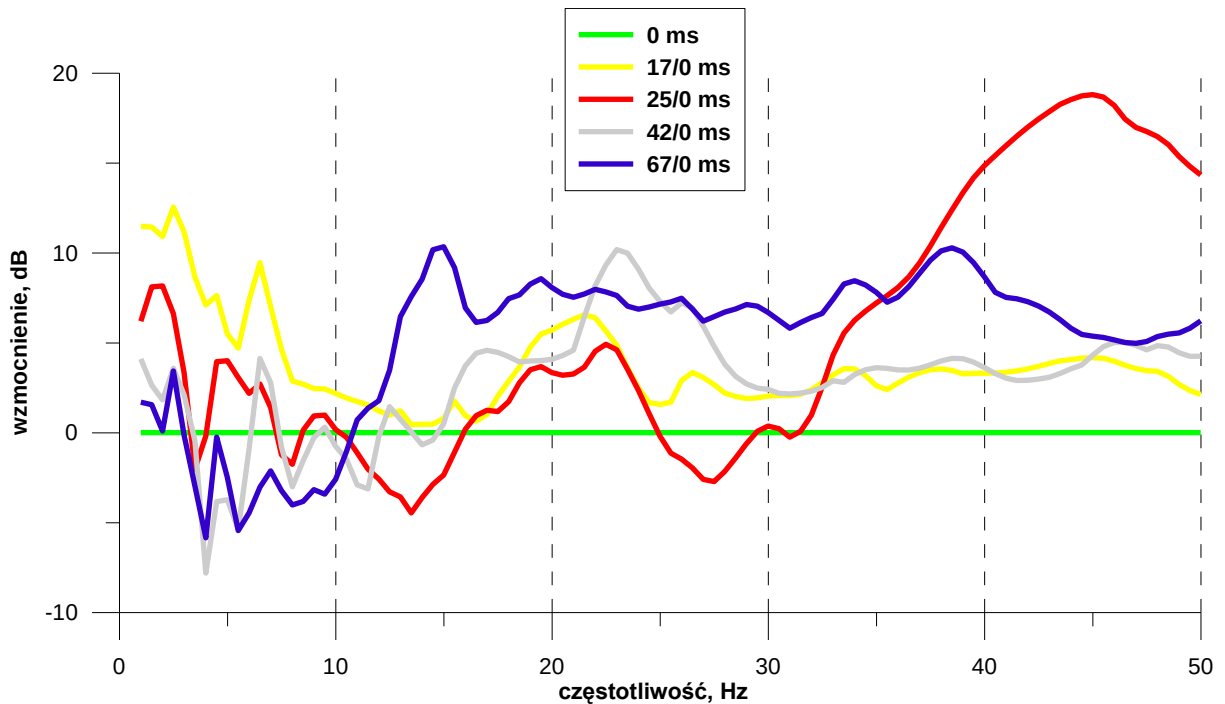
Wyniki obliczeń współczynnika względnej mocy drgań zarejestrowanych w czasie strzelania milisekundowego przedstawiono graficznie, przykładowo dla składowej  $x$  na każdym stanowisku pomiarowym, na rysunkach 6.19 ÷ 6.21.



Rys. 6.19. Względna moc drgań na stanowisku A1 – poziom odniesienia: odpalenie pojedynczego ładunku MW



Rys. 6.20. Względna moc drgań na stanowisku A2 – poziom odniesienia: odpalenie pojedynczego ładunku MW



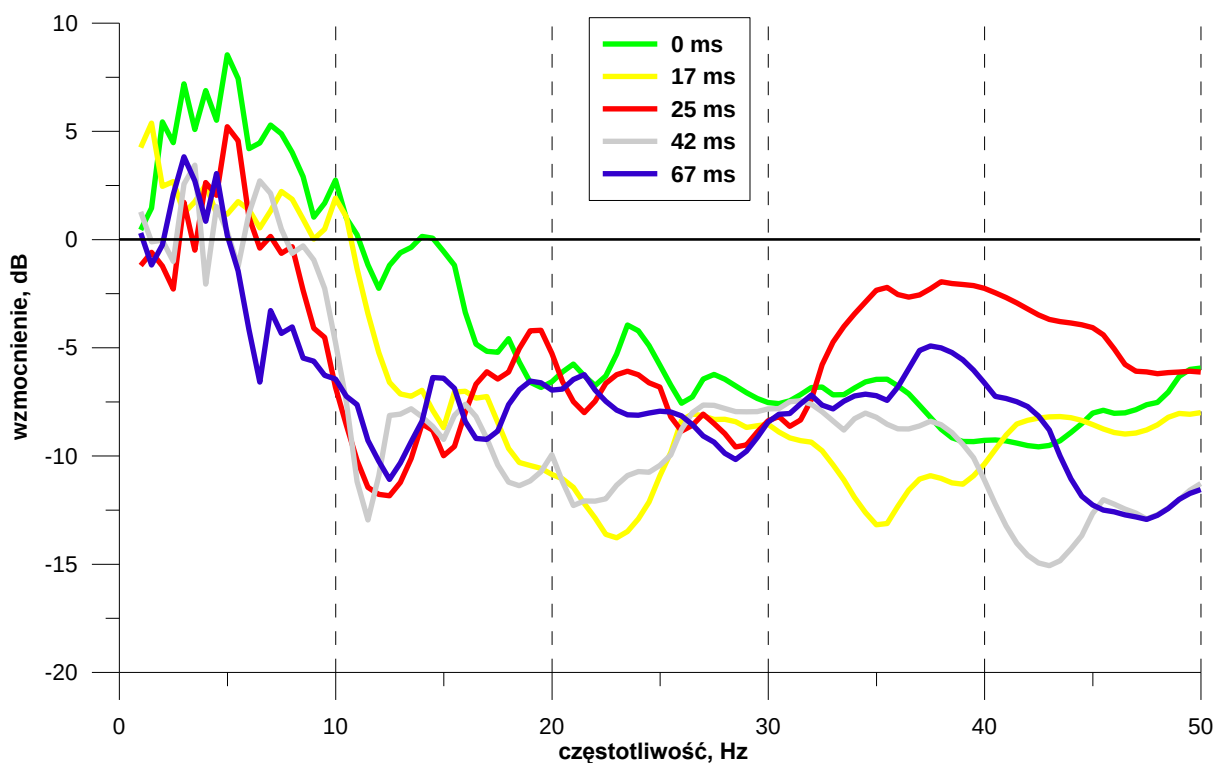
**Rys. 6.21. Względna moc drgań na stanowisku A1' – poziom odniesienia: odpalenie pojedynczego ładunku MW**

Na podstawie analizy przeprowadzonych obliczeń można stwierdzić, że:

- zastosowane opóźnienia milisekundowe w istotny sposób zmieniają charakterystykę częstotliwościową *PSV* drgań,
- istnieje wyraźny podział zakresów częstotliwości, na które oddziałują poszczególne opóźnienia milisekundowe: opóźnienie 17 ms powoduje wzmocnienie drgań w zakresie niższych częstotliwości, a opóźnienia 25 ms i 42 ms w zakresie częstotliwości wyższych, natomiast opóźnienie 67 ms powoduje wzmocnienie w zakresie 14,5 Hz (FWOP),
- częstotliwością rozdzielającą te dwie strefy jest częstotliwość dominująca dla drgań przyjętych jako poziom odniesienia, czyli w zakresie  $8 \div 12$  Hz obserwuje się najmniejszą zmienność,
- zarówno opóźnienia 25ms, 42 ms jak i 67 ms wzmacniają drgania w zakresie częstotliwości związanych z FWOP, odpowiednio 49 Hz, 23 Hz i 14,5 Hz,

Ważnym elementem analizy propagacji drgań w otoczeniu wykonywanych robót strzałowych jest nie tylko ich intensywność w podłożu, ale również rozpoznanie stopnia w jakim drgania te przenoszą się z podłoża do obiektów budowlanych. Tłumienie czy też wzmocnienie intensywności drgań, w poszczególnych pasmach częstotliwości, może w istotny sposób wpływać na ich oddziaływanie na obiekty.

Obliczenia mające na celu określenie mechanizmu przenoszenia się drgań z podłoża do obiektu przeprowadzono, podobnie jak dla drgań rejestrowanych w podłożu, jako analizę względnej mocy drgań – za poziom odniesienia przyjęto drgania rejestrowane w podłożu (stanowisko A1). Wyniki obliczeń przedstawiono na rysunku 6.22.



**Rys. 6.22. Wartości współczynnika tłumienia drgań przy przejściu drgań z podłoża do obiektu w zależności od częstotliwości i zastosowanego opóźnienia milisekundowego**

Na rysunku 6.18 można wydzielić dwie strefy zmian względnej mocy drgań. Pierwsza z nich to częstotliwości niższe w granicach od  $1 \div 10$  Hz – w zakresie tych częstotliwości względna moc drgań wykazuje istotne wzmocnienie drgań obiektu, w stosunku do drgań podłoża. W strefie częstotliwości powyżej 10 Hz drgania podłoża, po przeniesieniu do obiektu, ulegają zdecydowanemu tłumieniu. Oznacza to, że w zakresie tym fundament obiektu stanowi pewnego rodzaju filtr, który nie przenosi, w tym przypadku, częstotliwości powyżej 10 Hz. W przypadku opóźnienia 25 ms widać, że FWOP spowodowała zmniejszenie tłumienia w tym zakresie częstotliwości.

## 6.2. Analiza wyników badań prowadzonych w kopalni wapienia B

### 6.2.1. Analiza wyników badań prowadzonych w kopalni wapienia B – odpalanie ładunków MW systemem nieelektrycznym *Nonel Unidet*

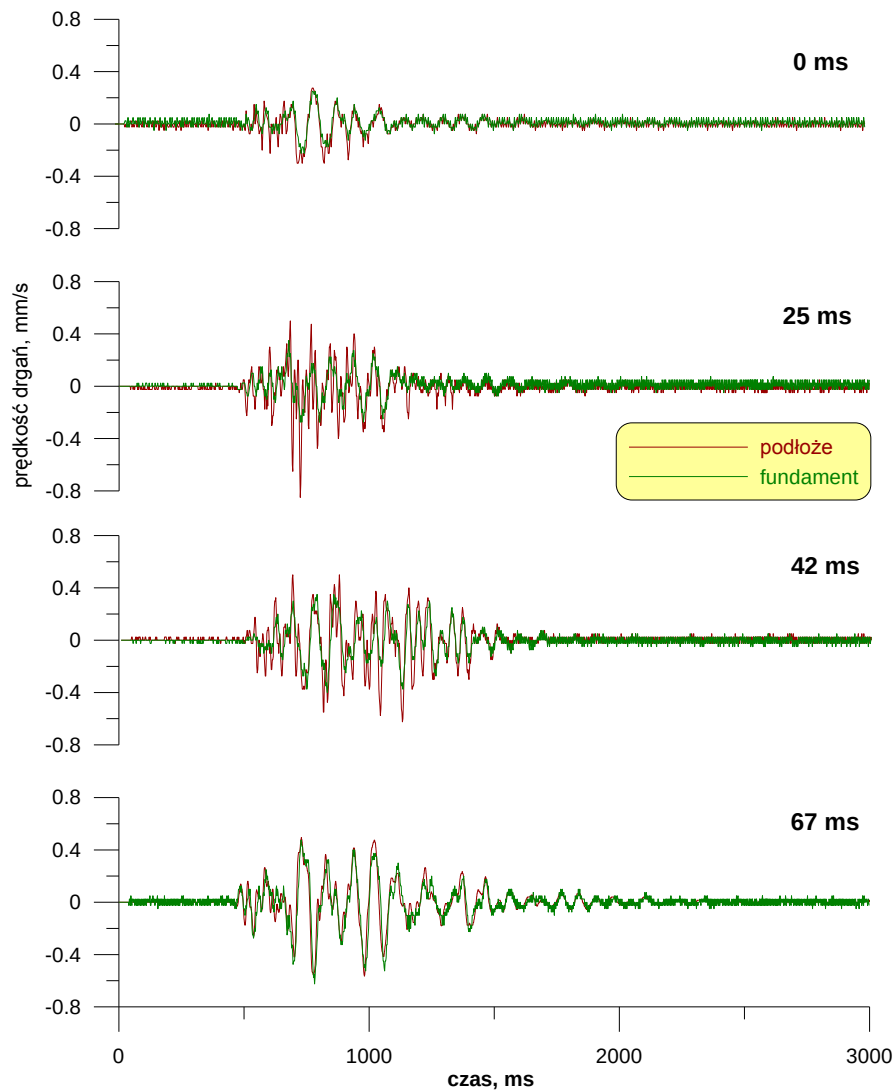
Wyniki pomiarów drgań zarejestrowanych przy odpalaniu ładunków MW z różnymi opóźnieniami zestawiono w tabeli 6.2, w której podano parametry drgań w postaci maksymalnych prędkości zarejestrowanych na poszczególnych składowych  $u_z$ ;  $u_x$ ;  $u_y$  i odpowiadających tym wartościom maksymalnym częstotliwościom  $f_z$ ;  $f_x$  i  $f_y$ , oraz wektorów: przestrzennego  $u_{zxy}$  i płaskiego  $u_{xy}$ .

Tabela 6.2. Wyniki pomiarów intensywności drgań

| Lp                  | Stano-<br>wisko | Odległość | Prędkość drgań, mm/s |       |       | Częstotliwość, Hz |       |       | Wektor, mm/s |          |
|---------------------|-----------------|-----------|----------------------|-------|-------|-------------------|-------|-------|--------------|----------|
|                     |                 | m         | $u_z$                | $u_x$ | $u_y$ | $f_z$             | $f_x$ | $f_y$ | $u_{zxy}$    | $u_{xy}$ |
| 1                   | 2               | 3         | 4                    | 5     | 6     | 7                 | 8     | 9     | 10           | 11       |
| <b>I</b><br>0 ms    | 1               | 660       | 0,40                 | 0,50  | 0,35  | 24,0              | 10,5  | 10,7  | 0,564        | 0,555    |
|                     | 1'              | 660       | 0,25                 | 0,50  | 0,30  | 8,1               | 8,8   | 11,0  | 0,533        | 0,515    |
|                     | 1''             | 660       |                      | 1,05  | 0,55  |                   | 9,4   | 11,0  |              | 1,064    |
| <b>II</b><br>25 ms  | 1               | 890       | 0,38                 | 0,63  | 0,88  | 19,0              | 30,1  | 34,7  | 0,903        | 0,903    |
|                     | 1'              | 890       | 0,28                 | 0,48  | 0,35  | 16,7              | 12,0  | 17,4  | 0,478        | 0,478    |
|                     | 1''             | 890       |                      | 1,05  | 0,65  |                   | 13,2  | 13,6  |              | 1,099    |
| <b>III</b><br>42 ms | 1               | 630       | 0,45                 | 0,58  | 0,65  | 29,8              | 38,5  | 17,7  | 0,670        | 0,654    |
|                     | 1'              | 630       | 0,28                 | 0,38  | 0,40  | 12,9              | 11,5  | 11,8  | 0,449        | 0,437    |
|                     | 1''             | 630       |                      | 1,30  | 2,08  |                   | 11,8  | 18,7  |              | 2,182    |
| <b>IV</b><br>67 ms  | 1               | 630       | 0,43                 | 0,64  | 0,57  | 11,9              | 9,5   | 11,6  | 0,732        | 0,729    |
|                     | 1'              | 630       | 0,45                 | 0,65  | 0,63  | 8,5               | 9,5   | 11,0  | 0,796        | 0,791    |
|                     | 1''             | 630       |                      | 1,15  | 1,20  |                   | 10,0  | 14,2  |              | 1,346    |

Pełną dokumentację zarejestrowanych drgań, czyli sejsmogramy, zestawiono w załącznikach VI, IX, XIV i XV (rys. Z6-1, Z9-1, Z14-1 i Z15-1).

Dla przykładu na rysunku 6.23 przedstawiono sejsmogramy drgań (składowa pozioma) zarejestrowanych, na stanowiskach nr B1 i nr B1', przy odpalaniu ładunków MW z wybranymi opóźnieniami milisekundowymi systemem nieelektrycznym.

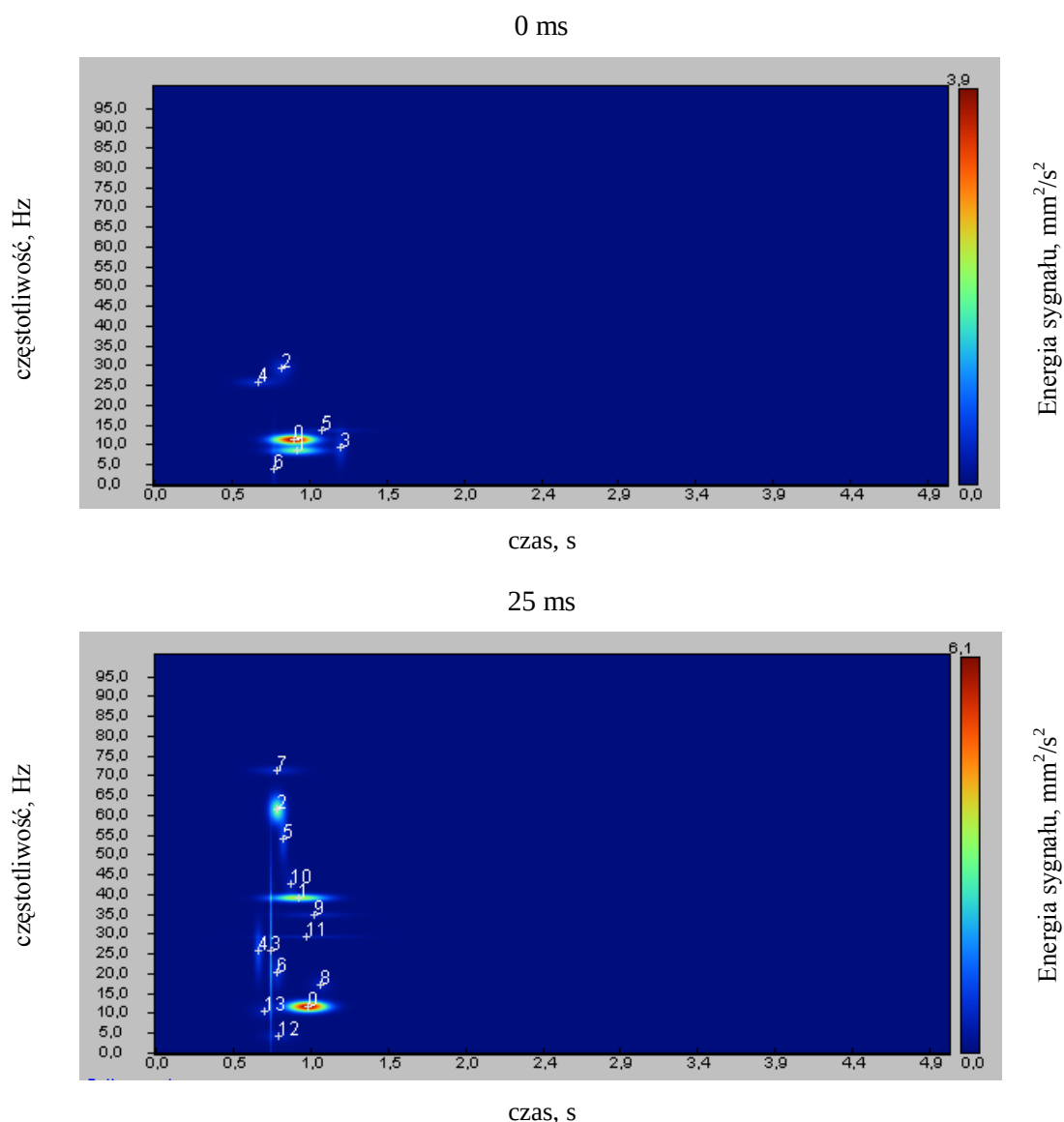


**Rys. 6.23. Sejsmogramy drgań podłoża i fundamentu obiektu**

Z wstępnej analizy zapisów drgań, wzbudzonych odpalaniem ładunków MW w otoczeniu kopalni wapienia B, nie można stwierdzić znaczącego wpływu opóźnienia milisekundowego na charakter drgań oraz na ich intensywność, a także na interakcję podłoża i fundamentu. Pojedynczy ładunek wzbudził drgania o najmniejszej intensywności i najkrótszym czasie trwania sygnału. Z kolei, przy opóźnieniu 25 ms wystąpiły drgania o największym poziomie intensywności w podłożu, ale „po przejściu” do obiektu drgania uległy znacznemu wytlumieniu i były najmniejsze spośród wzbudzonych przez poszczególne opóźnienia. Największy poziom intensywności drgań na fundamencie, wzbudziło opóźnienie 67 ms, przy którym intensywność drgań w podłożu i na fundamencie jest prawie taka sama oraz czas trwania drgań jest najdłuższy. Opóźnienie 42 ms wzbudziło zbliżony poziom intensywności do opóźnienia 25 ms, lecz sygnał jest dłuższy. Z przebiegów czasowych trudno zauważyć zmianę częstotliwości rejestrowanych drgań.

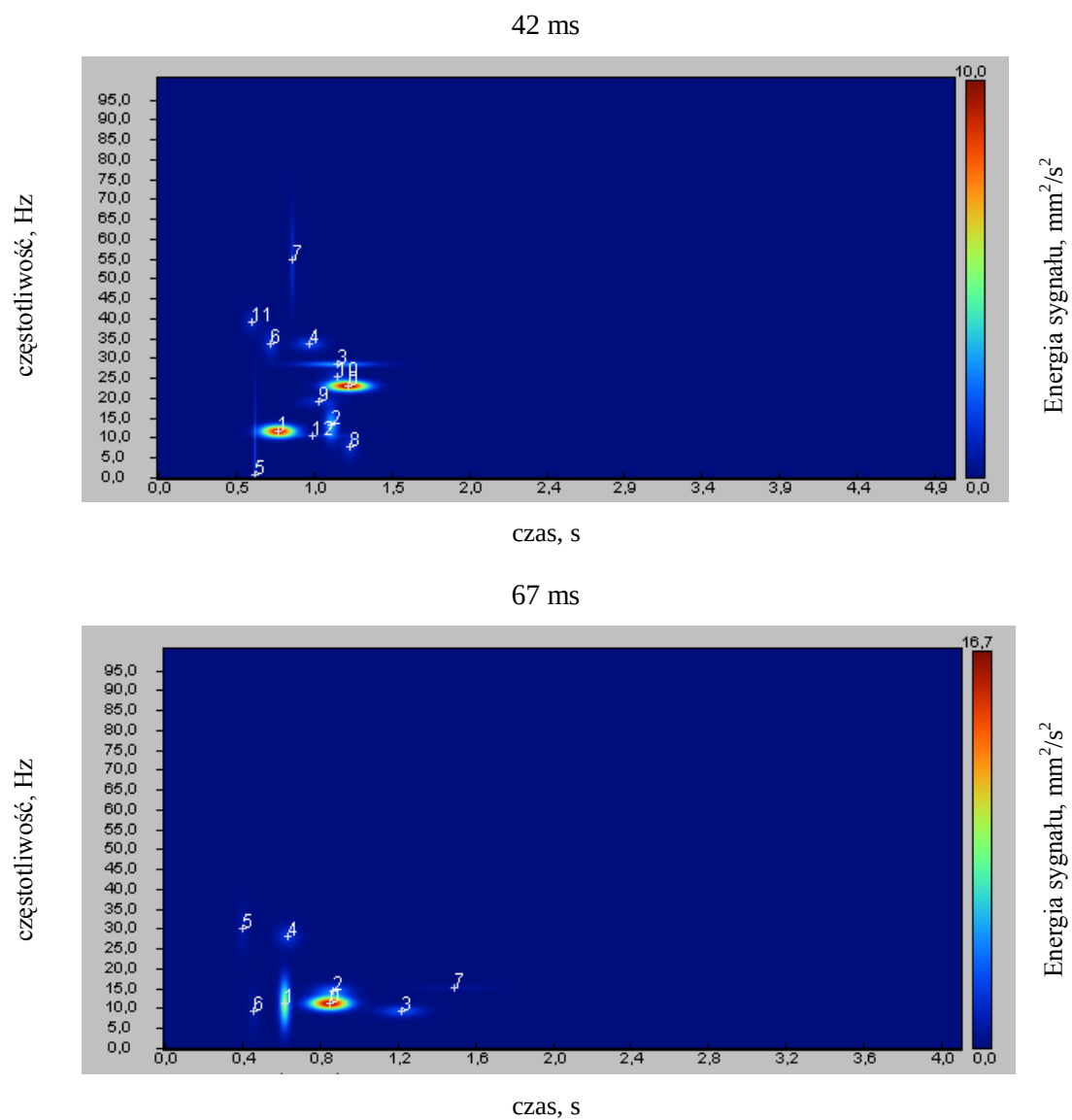
W celu lepszego rozpoznania problemu, przebiegi poddano podobnie jak w przypadku kopalni gipsu A, analizie czasowo – częstotliwościowej z wykorzystaniem metody MP. Rozkłady sygnałów przedstawiono w postaci mapy Wignera – Ville’a, przestrzennego obrazu tej mapy i struktury drgań w postaci histogramów atomów Gabora (z zastosowaniem kolorów jak w legendzie – Rys. 6.2).

Na rysunkach 6.24 do 6.27 przedstawiono graficznie wyniki obliczeń z zastosowaniem metody MP dla jednej ze składowych płaskich. Wynika z nich, że wielkość opóźnienia milisekundowego zmienia dominujące częstotliwości drgań. Do porównania, jako punkt odniesienia, przyjęto charakterystykę drgań wzbudzanych pojedynczym ładunkiem MW.

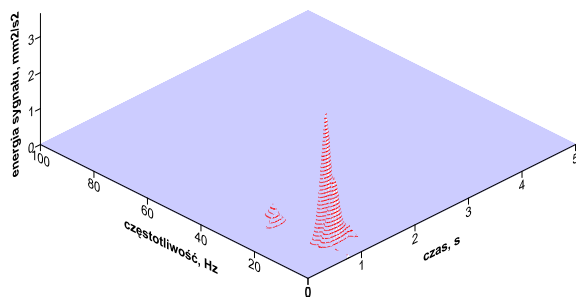


**Rys. 6.24.** Wynik analizy drgań metodą MP w postaci map Wignera Ville’a – drgania zarejestrowane w podłożu, a wzbudzone w czasie odpalania ładunków MW z różnym opóźnieniem milisekundowym

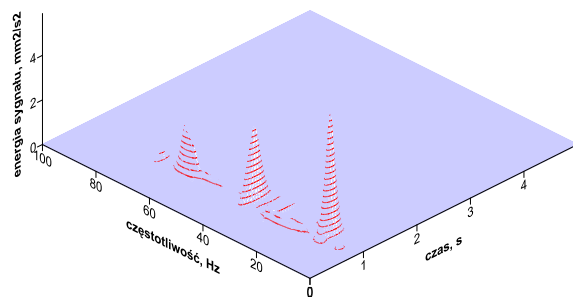




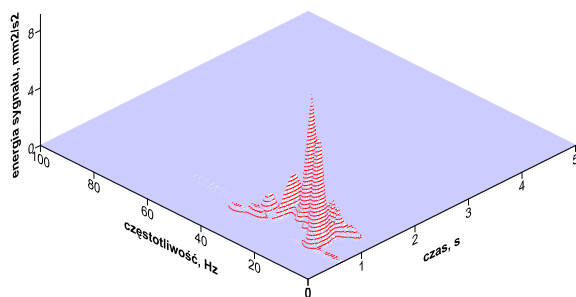
Rys. 6.25. Wynik analizy drgań metodą MP w postaci map Wignera Ville'a – drgania zarejestrowane w podłożu, a wzbudzone w czasie odpalania ładunków MW z różnym opóźnieniem milisekundowym



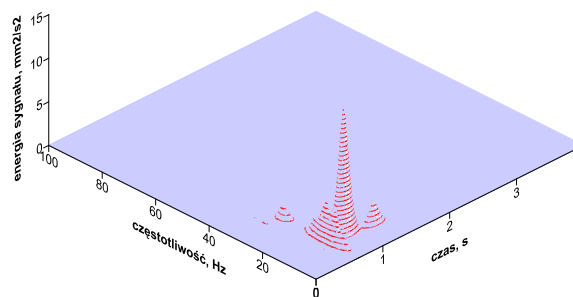
0 ms



25 ms

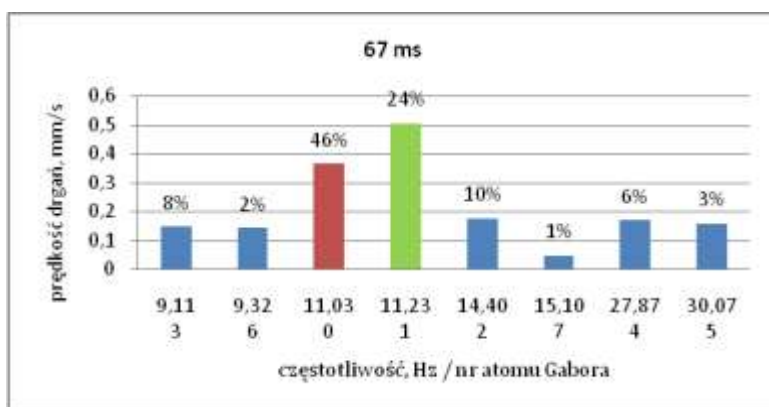
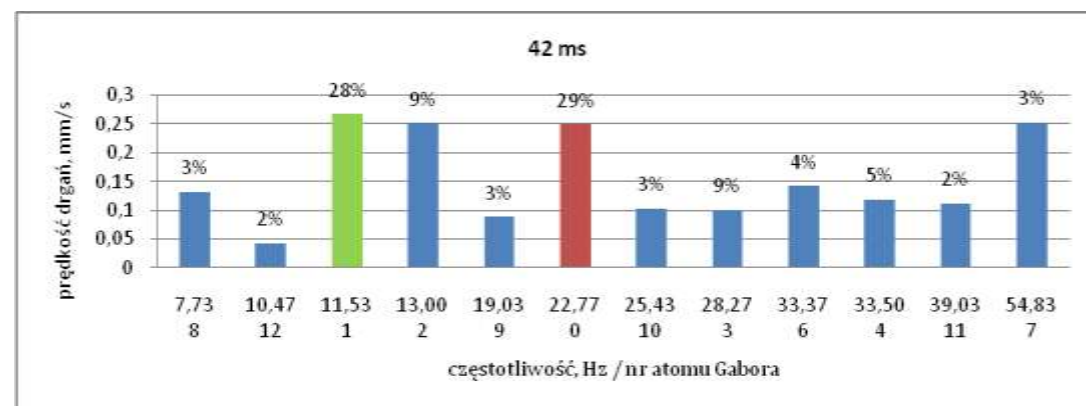
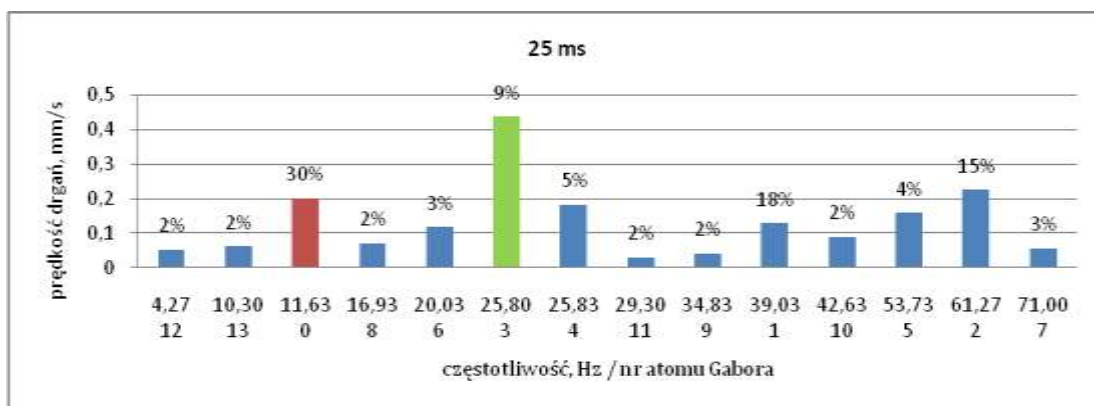
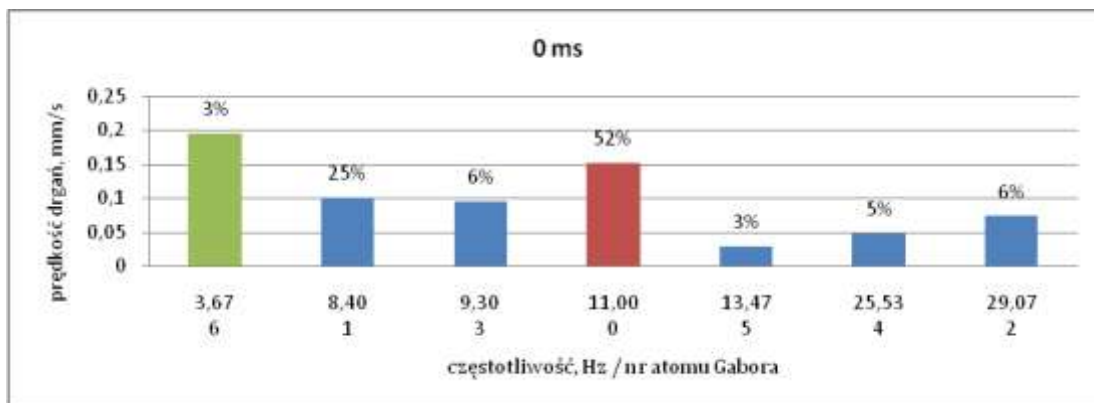


42 ms



67 ms

**Rys. 6.26. Wynik analizy drgań metodą MP w postaci map przestrzennych – drgania zarejestrowane w podłożu, a wzbudzone w czasie odpalania ładunków MW z różnym opóźnieniem milisekundowym**



Rys. 6.27. Histogramy atomów Gabora dla drgań podłoża wzbudzanych poszczególnymi opóźnieniami

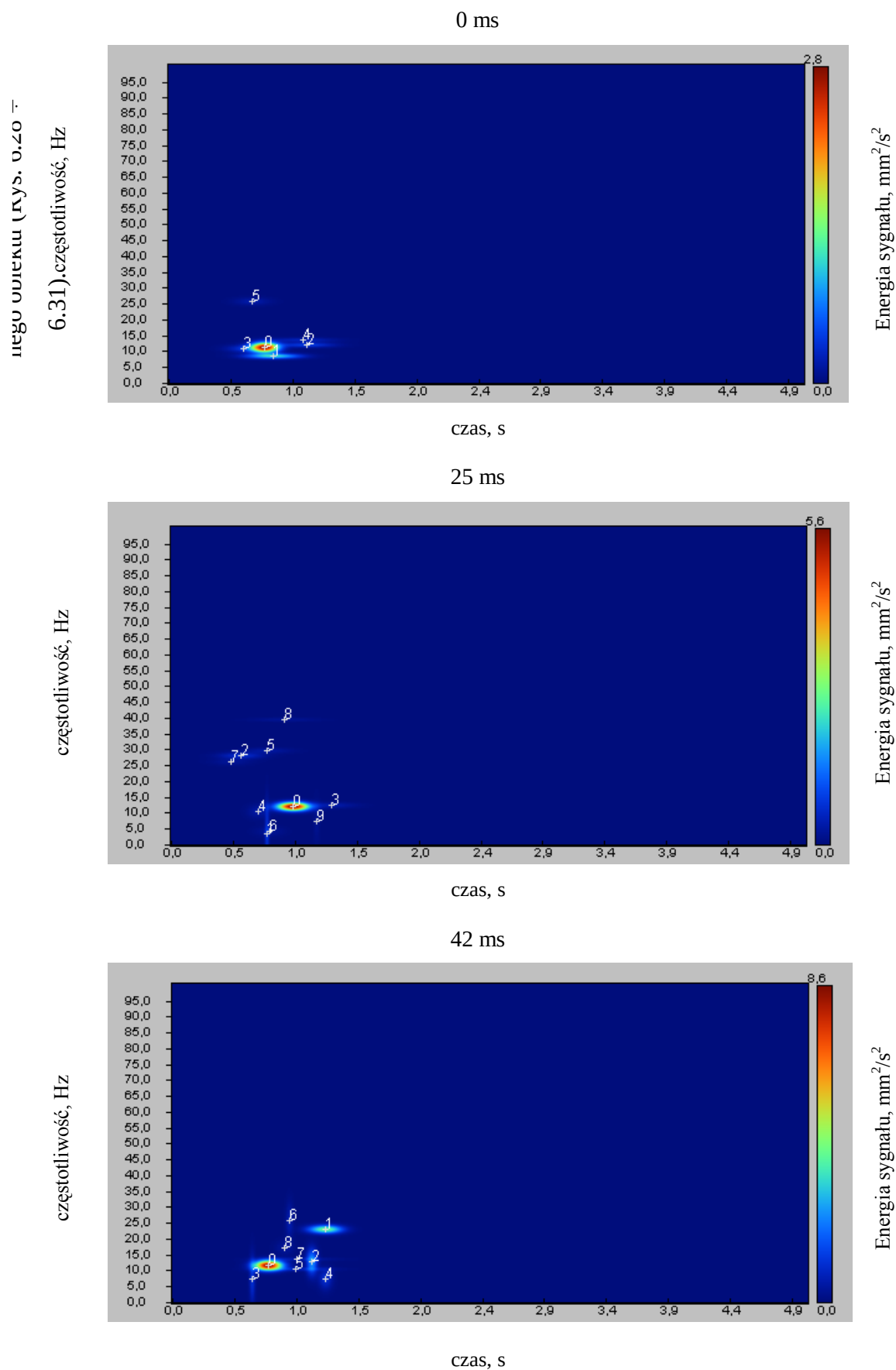
Analizując rys. 6.24 ÷ 6.27 potwierdza się spostrzeżenie z kopalni gipsu A, że opóźnienia wpływają na charakterystyki częstotliwościowe rejestrowanych drgań. W sygnale można zauważyć FWOP lub bardzo do niej zbliżoną: 25 ms – 39,03 Hz, 42 ms – 22,77 Hz, 67 ms – 14,4 Hz. Częstotliwość ta jest bardzo wyraźnie zaznaczona w przypadku opóźnienia 42 ms atom 0/22,77 Hz, czyli dominujący w strukturze wzbudzonych drgań, jest związany z FWOP.

Porównując charakterystykę drgań wzbudzanych poszczególnymi opóźnieniami milisekundowymi, ze strukturą częstotliwościową sygnału od pojedynczego ładunku MW, można zauważyć, że:

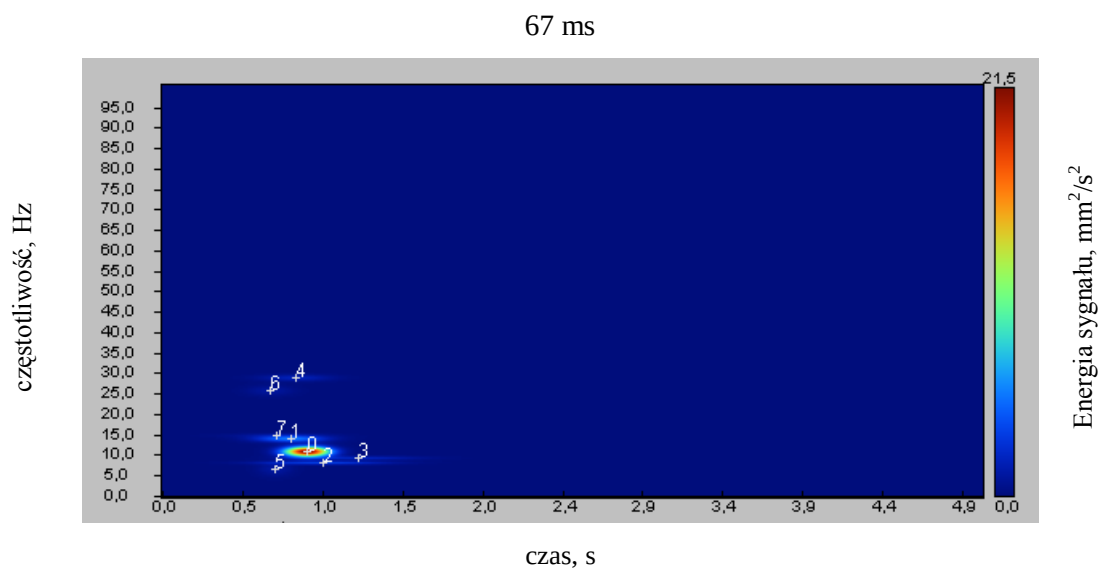
- opóźnienie 25 ms jest zbliżone charakterystyką do pojedynczego ładunku (11,63 Hz – 30% energii sygnału) – zauważalna FWOP 39,03 Hz, która opisuje 18 % energii sygnału,
- opóźnienie 42 ms wzbudziło drgania o FWOP, atom 0/22,77 Hz (29 % energii sygnału), natomiast kolejny atom nr 1/11,53 (28% energii sygnału) ma zbliżoną częstotliwość do atomu 0 w charakterystyce pojedynczego ładunku i posiada największą amplitudę drgań,
- opóźnienie 67 ms, jest najbardziej zbliżone pod względem charakterystyki częstotliwościowej do pojedynczego ładunku MW, gdzie pierwsze dwa atomy opisują 70% energii sygnału (0/11,03 Hz – 46%, 1/11,23 Hz – 24%), a FWOP została zawarta w kolejnym atomie Gabora, który opisuje 10 % energii sygnału (2/14,4 Hz).

Metoda MP potwierdziła wstępne wnioski wysunięte na podstawie analizy samych zapisów drgań. Opóźnienia w niewielkim stopniu zakłóciły częstotliwość własną drgań podłoża, dlatego trudno jest zauważyć różnice w samych przebiegach czasowych, co potwierdza, że ta analiza czasowa jest niewystarczająca. Najwyraźniej wpływ widać dla opóźnienia 42 ms.

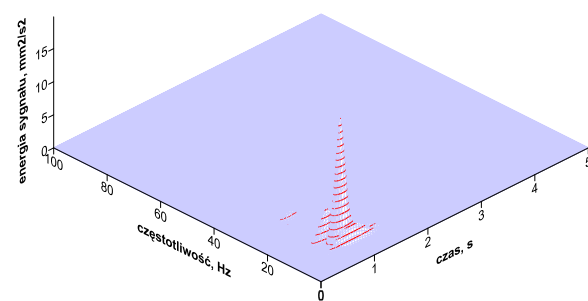
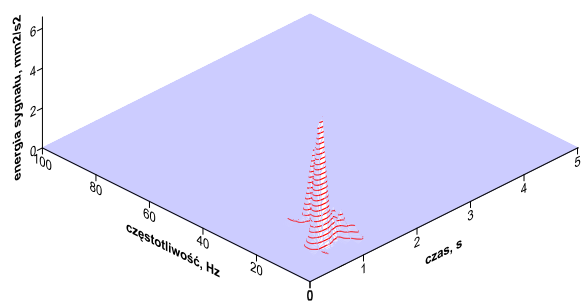
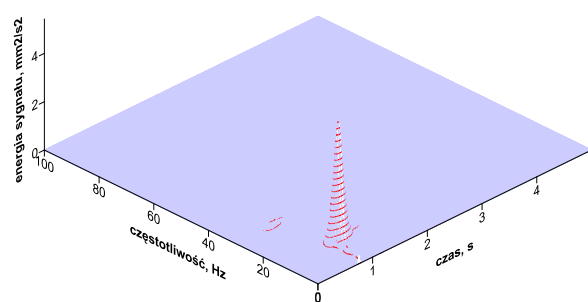
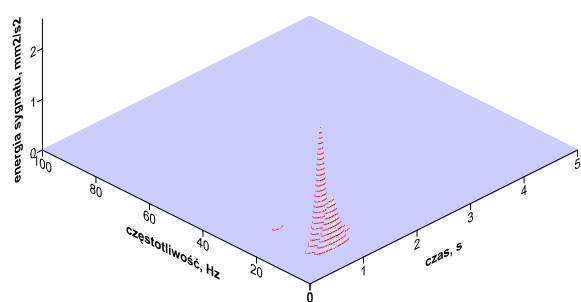
Analizując drugą składową poziomą (załączniki VI, IX, XIII i VIX, Rys. Z6- 9 ÷ 11, Z9- 9 ÷ 11, Z14- 9 ÷ 11 i Z15- 9 ÷ 11). można zauważyć, że druga składowa pozioma ma zbliżoną strukturę rejestrowanych drgań. Większe różnice, niż w przypadku kopalni gipsu A, w strukturze rejestrowanych drgań wykazuje składowa pionowa (załączniki VI, IX, XIII i VIX, Rys. Z6- 3 ÷ 5, Z9- 3 ÷ 5, Z14- 3 ÷ 5 i Z15- 3 ÷ 5).



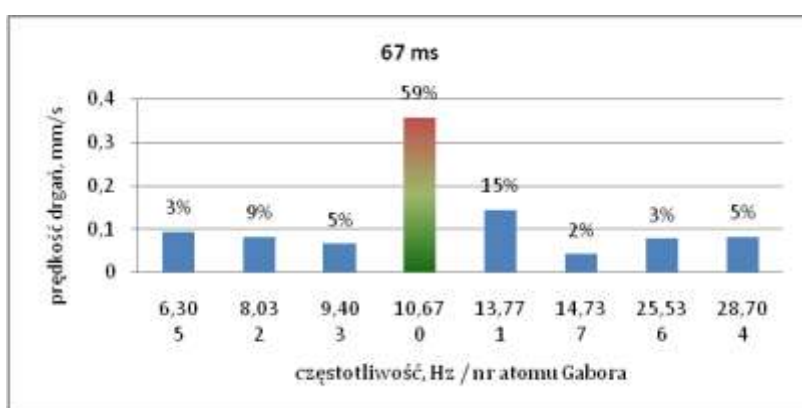
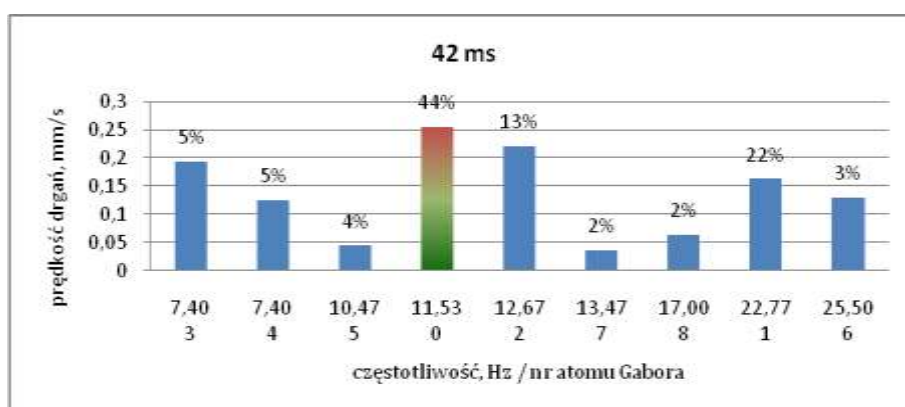
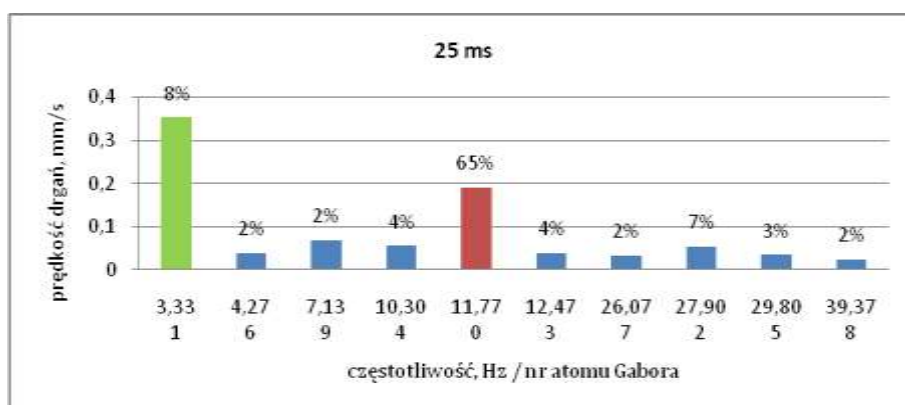
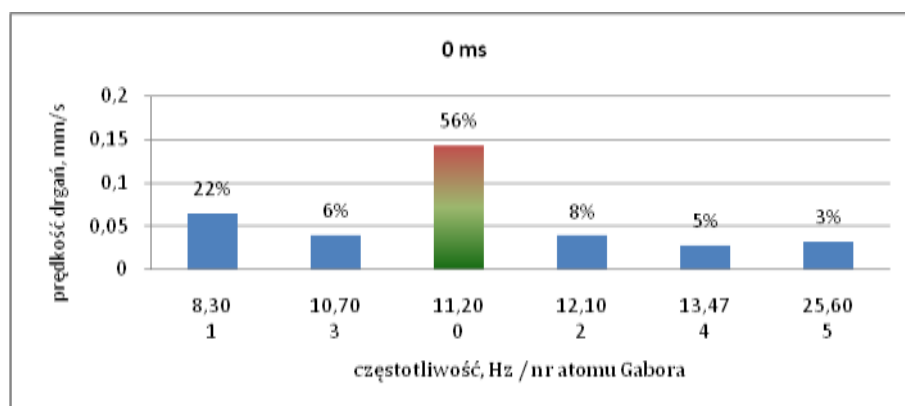
Rys. 6.28. Wynik analizy drgań metodą MP w postaci map Wignera Ville'a – drgania zarejestrowane na fundamencie, a wzbudzone w czasie odpalania ładunków MW z różnym opóźnieniem milisekundowym



**Rys. 6.29.** Wynik analizy drgań metodą MP w postaci map Wignera Ville'a – drgania zarejestrowane na fundamencie, a wzbudzone w czasie odpalania ładunków MW z różnym opóźnieniem milisekundowym



**Rys. 6.30.** Wynik analizy drgań metodą MP w postaci map przestrzennych – drgania zarejestrowane na fundamencie, a wzbudzone w czasie odpalania ładunków MW z różnym opóźnieniem milisekundowym



**Rys. 6.31. Histogramy atomów Gabora dla drgań fundamentu wzbudzanych poszczególnymi opóźnieniami**

Z rysunków 6.28 ÷ 6.31 wynika, że zmienność częstotliwości i intensywności drgań fundamentu jest mała. Zastosowane opóźnienia jak i odpalenie pojedynczego ładunku MW wzbudziły na fundamencie drgania o bardzo zbliżonym składzie częstotliwościowym, w których dominująca jest zawsze bliska 11 Hz.

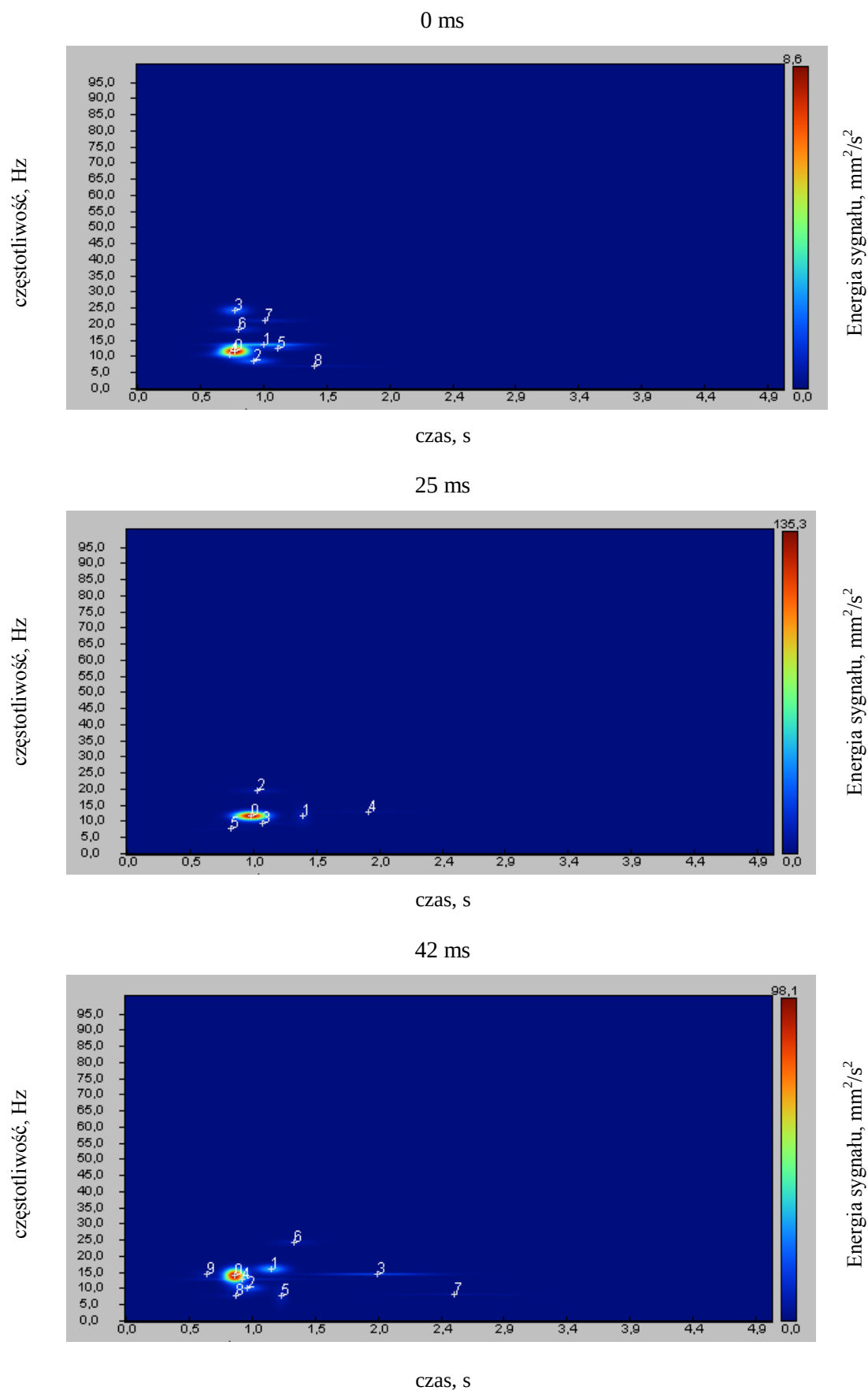
Porównując charakterystykę drgań wzbudzanych poszczególnymi opóźnieniami milisekundowymi, ze strukturą częstotliwościową sygnału od pojedynczego ładunku MW, można zauważyć, że:

- opóźnienie 25 ms wzbudza drgania o częstotliwości dominującej 11,77 Hz (65% energii sygnału), kolejny atom tłumaczy tylko 8% energii i ma częstotliwość 3,33 Hz, natomiast FWOP – 39,37 Hz wystąpiło w atomie 8, który tłumaczy zaledwie 2% energii,
- opóźnienie 42 ms również wzbudziło częstotliwość dominującą 11,53 Hz (44% energii sygnału), a atom nr 1 o częstotliwości najbardziej zbliżonej do FWOP tłumaczy 22% energii (22,77 Hz),
- opóźnienie 67 ms, tak samo jak pozostałe opóźnienia zadane systemem nieelektrycznym, wzbudziło częstotliwość 10,67 Hz (59% energii sygnału); w strukturze sygnału pojawiają się również częstotliwości zbliżone do FWOP: 1/13,77 Hz (15% energii sygnału), 7/14,73 Hz (2%).

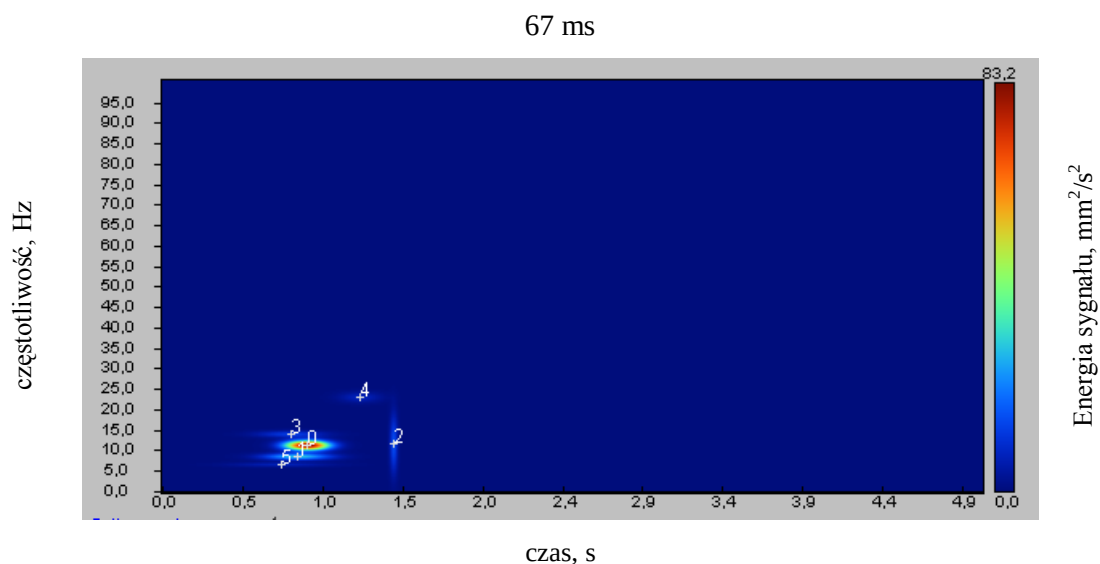
Analizując pozostałe składowe (załączniki VI, IX, XIII i VIX, Rys. Z6- 12 ÷ 14, Z6- 18 ÷ 20, Z9- 12 ÷ 14, Z9- 18 ÷ 20, Z14- 12 ÷ 14, Z14- 18 ÷ 20, Z15- 12 ÷ 14, Z15- 18 ÷ 20) widać również, że jest pewna trudność w wymuszaniu określonych częstotliwości fundamentu obiektu przez opóźnienie w tym punkcie pomiarowym i tylko opóźnienie 42 ms w wyraźny sposób zarysowało swoją FWOP.

Pomiary były również prowadzone na ścianie nośnej II kondygnacji obiektu (pierwszym piętrze), rezultaty przedstawiono graficznie na rysunkach 6.32 ÷ 6.35.

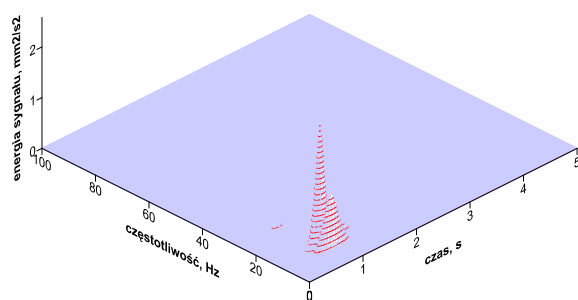




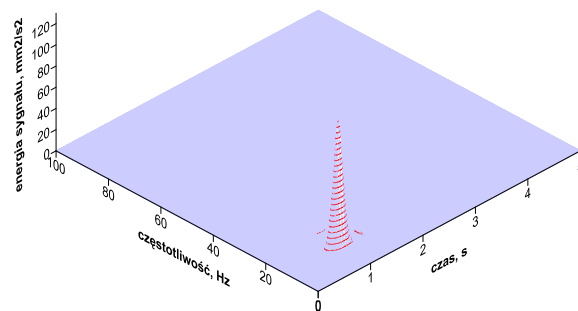
Rys. 6.32. Wynik analizy drgań metodą MP w postaci map Wignera Ville'a – drgania zarejestrowane na ścianie nośnej na piętrze obiektu, a wzbudzane w czasie odpalania ładunków MW z różnym opóźnieniem milisekundowym



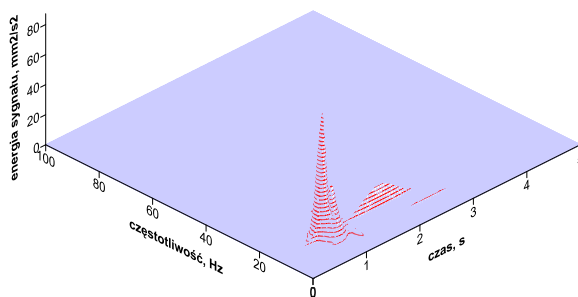
**Rys. 6.33. Wynik analizy drgań metodą MP w postaci map Wignera Ville'a – drgania zarejestrowane na ścianie nośnej na piętrze obiektu, a wzbudzone w czasie odpalania ładunków MW z różnym opóźnieniem milisekundowym**



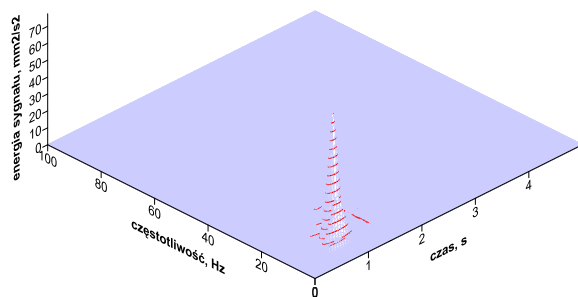
0 ms



25 ms

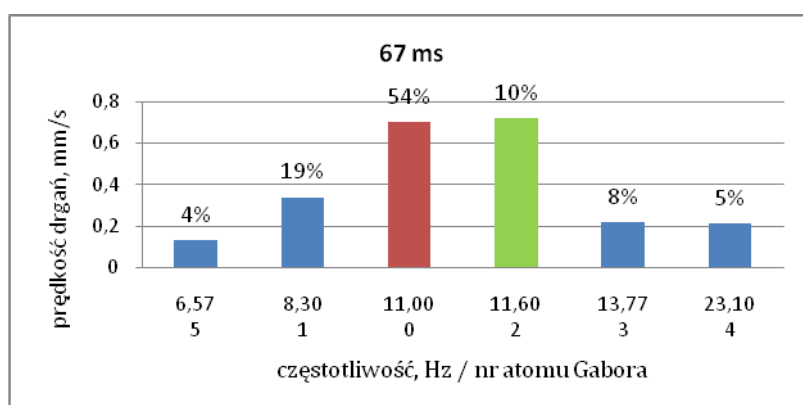
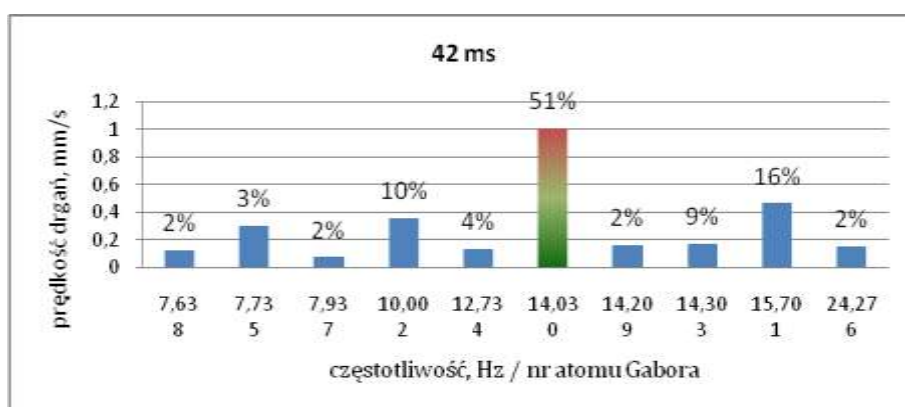
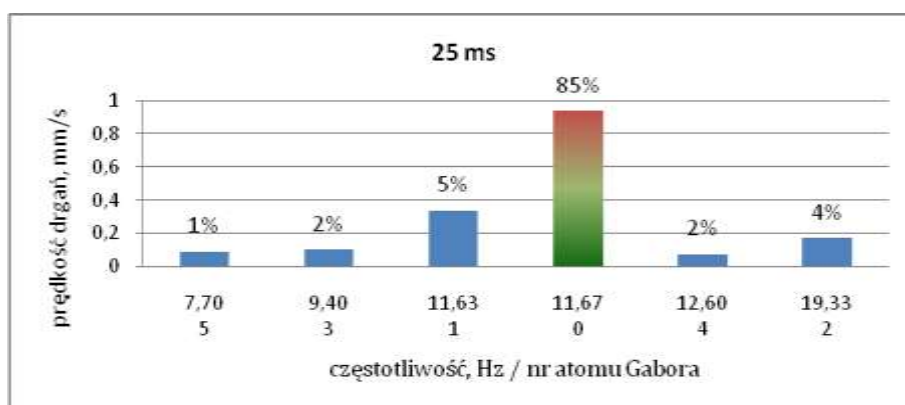
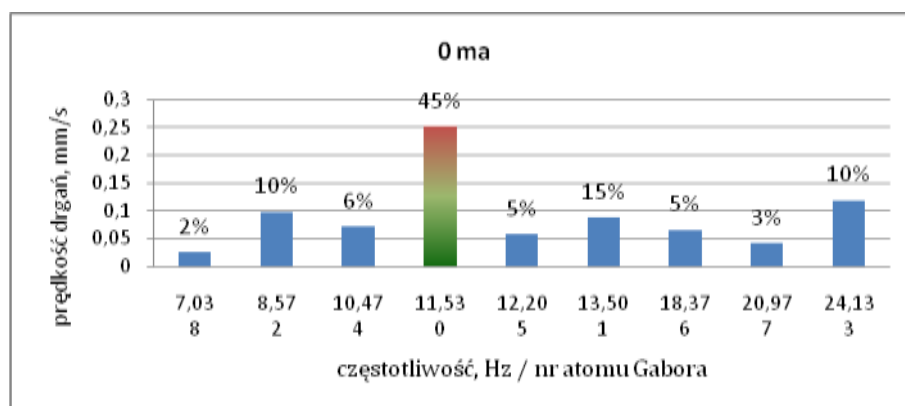


42 ms



67 ms

**Rys. 6.34. Wynik analizy drgań metodą MP w postaci map przestrzennych – drgania zarejestrowane na ścianie nośnej na piętrze obiektu, a wzbudzone w czasie odpalania ładunków MW z różnym opóźnieniem milisekundowym**



**Rys. 6.35. Histogramy atomów Gabora dla drgań ściany nośnej na piętrze obiektu wzbudzanych poszczególnymi opóźnieniami**

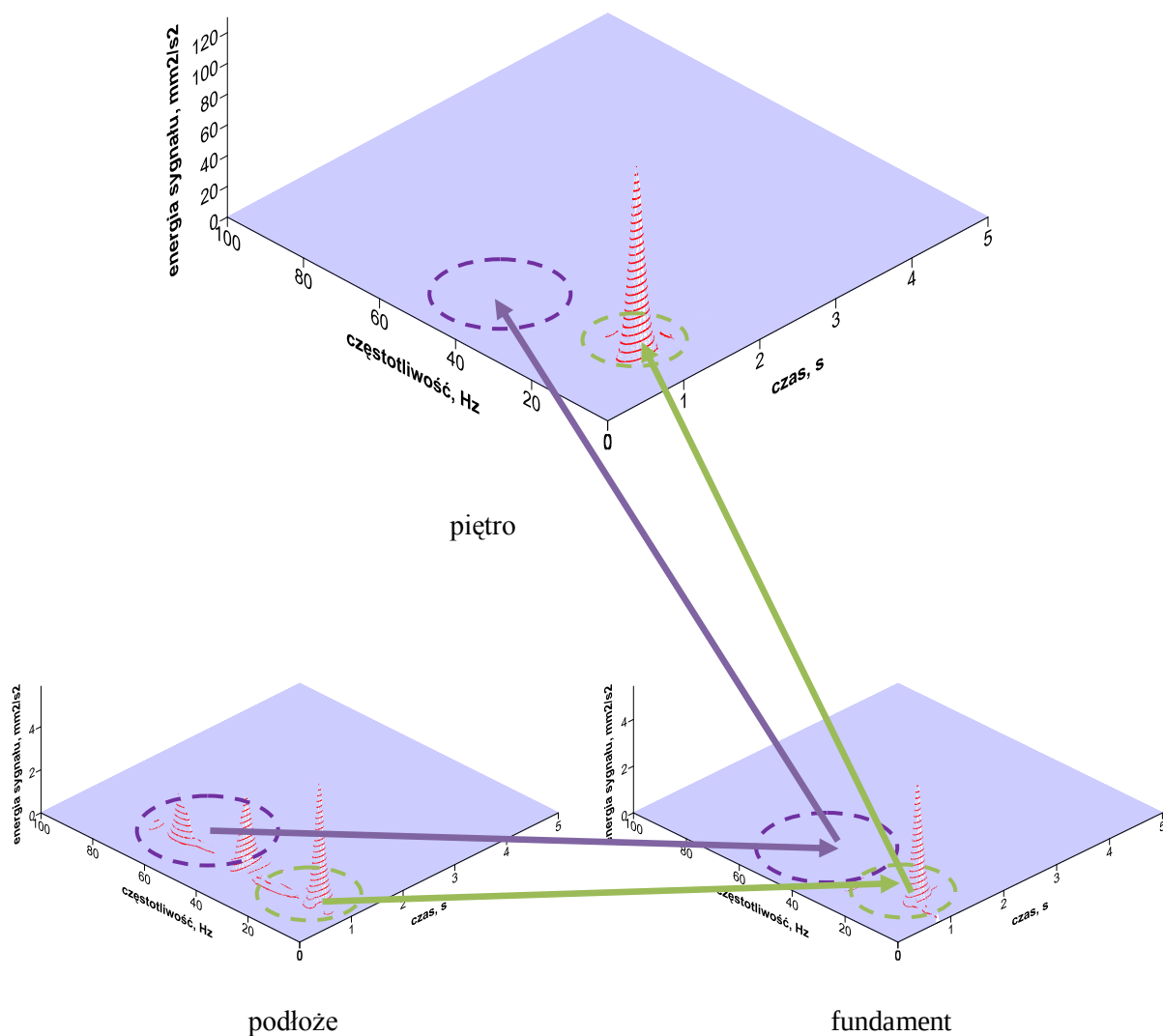
Analiza wyników drgań, zarejestrowanych na ścianie nośnej II kondygnacji obiektu, wskazuje na nieznaczną zmienność częstotliwości (Rys. 6.32 ÷ 6.35). Zastosowane opóźnienia jak i odpalenie pojedynczego ładunku MW, wzbudziły na ścianie nośnej II kondygnacji, drgania o bardzo zbliżonym składzie częstotliwościowym, w których dominująca jest zawsze bliska 11,5 Hz z wyjątkiem opóźnienia 42 ms, gdzie częstotliwość dominująca wynosi około 14 Hz.

Porównując charakterystykę drgań wzbudzanych poszczególnymi opóźnieniami milisekundowymi ze strukturą częstotliwościową sygnału od pojedynczego ładunku MW, można zauważyć, że:

- opóźnienie 25 ms wzbudziło drgania o częstotliwości dominującej 11,67 Hz (85% energii sygnału), brak FWOP,
- opóźnienie 42 ms wzbudziło częstotliwość dominującą 14,03 Hz (51% energii sygnału), a atom nr 1 o częstotliwości najbardziej zbliżonej do FWOP tłumaczy 2% energii (24,27 Hz),
- opóźnienie 67 ms, tak samo jak pojedynczy ładunek i opóźnienie 25 ms zadane systemem nieelektrycznym, wzbudziło częstotliwość 11,00 Hz (54% energii sygnału); w strukturze sygnału pojawiają się również częstotliwości zbliżone do FWOP: 3/13,77 Hz (8% energii sygnału).

Dokonując analizy drugiej składowej poziomej (załączniki VI, IX, XIII i VIX, Rys. Z6- 24 ÷ 26, Z9- 24 ÷ 26, Z14- 24 ÷ 26, Z15- 24 ÷ 26) zauważyć można, że częstotliwości ściany nośnej na piętrze obiektu mają częstotliwość drgań własnych rzędu 11 ÷ 12 Hz, natomiast zastosowane opóźnienia praktycznie nie wpłynęło na zmianę struktury rejestrowanego sygnału.

W celu przeanalizowania interakcji podłoże – obiekt, na rysunku 6.36 przedstawiono porównanie map struktury czasowo – częstotliwościowej drgań zarejestrowanych na piętrze tego obiektu dla opóźnienia 25 ms.



**Rys. 6.36. Porównanie struktury drgań przy przejściu z podłoża do fundamentu i na piętro obiektu dla opóźnienia 25 ms**

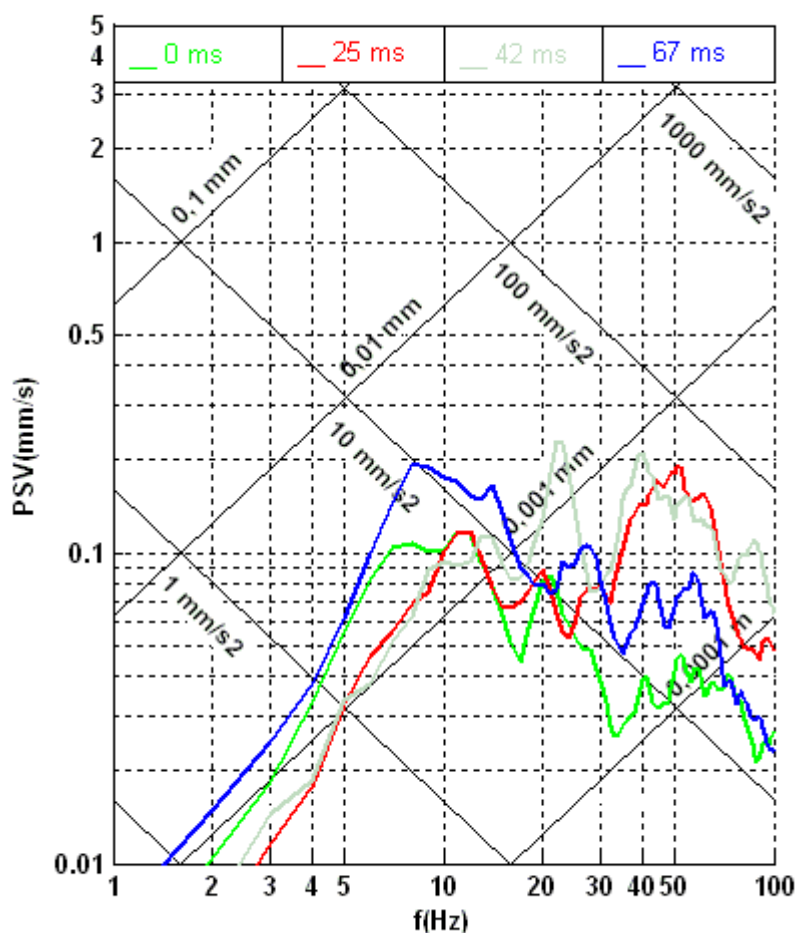
Na rysunku 6.36 przedstawiono porównanie struktury częstotliwościowej sygnałów drgań zarejestrowanych w podłożu, na fundamencie i piętrze obiektu, wzbudzonych odpaleniem ładunków MW z opóźnieniem 25 ms. Drgania zarejestrowane w podłożu charakteryzowały się wystąpieniem w wyraźny sposób FWOP 39,03 Hz. Drgania te po przejściu na fundament obiektu wytłumiły się całkowicie, a drgania o częstotliwości rzędu 11 Hz pozostały bez zmian. Na ścianie nośnej na piętrze obiektu również brak jest FWOP, a dominuje, podobnie jak w podłożu częstotliwość 11 Hz (30% energii sygnału). Energia sygnału na piętrze

obiektu znacząco wzrosła. Widać wyraźnie zatem, że częstotliwość charakterystyczna dla podłoża jest zbliżoną do częstotliwości drgań własnych obiektu, co może prowadzić do wzmocnienia drgań.

### 6.2.2. Spektrum odpowiedzi drgań zarejestrowanych w otoczeniu kopalni wapienia B – opóźnienie zadawane systemem nieelektrycznym

Podobnie jak w przypadku kopalni gipsu A, w dalszej części obliczeń przeprowadzono analizę krzywych spektrum odpowiedzi drgań.

Wyniki obliczeń, dla jednej składowej poziomej, przedstawiono w formie graficznej na rysunkach 6.37 ÷ 6.39. Rysunki obrazują zmiany kształtu krzywych spektrum odpowiedzi w zależności od zastosowanego opóźnienia. Pełną dokumentację wszystkich składowych dla poszczególnych opóźnień załączono w formie graficznej w załącznikach VI, IX, XIV i XV (Rys. Z6- 27 ÷ 29, Z9- 27 ÷ 29, Z14- 27 ÷ 29, Z15- 27 ÷ 29).



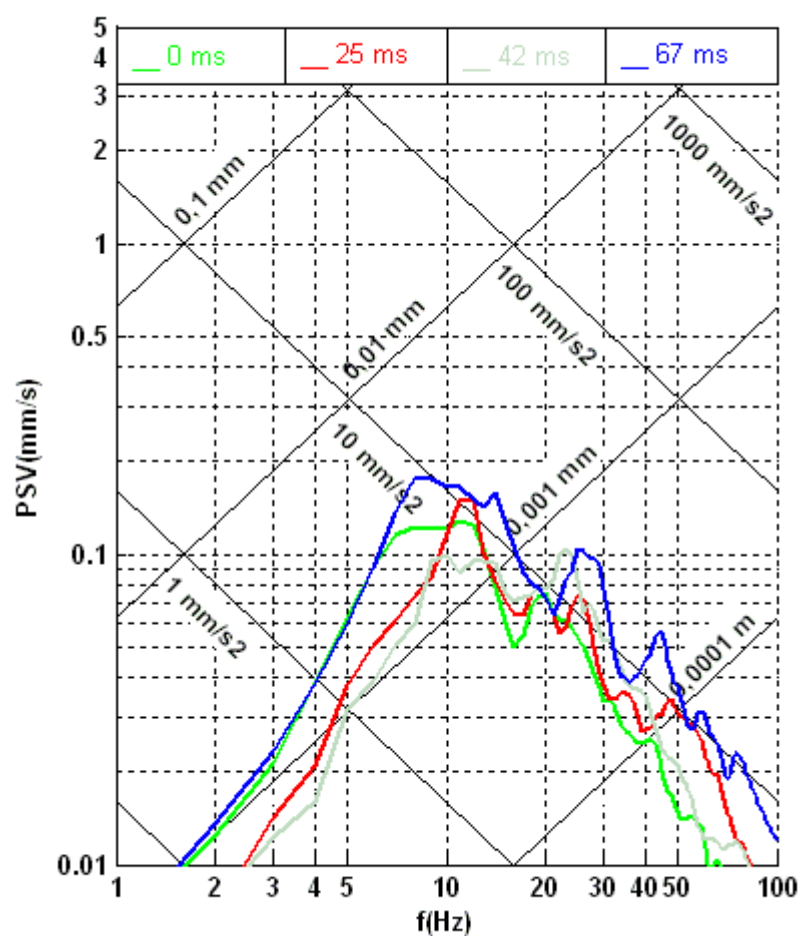
Rys. 6.37. Pseudoprędkościowe spektrum odpowiedzi drgań zarejestrowanych na stanowisku B1 – składowa x

Rysunek 6.30 ilustruje krzywe spektrum odpowiedzi drgań, wyznaczone dla podłoża na stanowisku B1. Z rysunku widać, że zastosowane opóźnienie spowodowało zmianę struktury rejestrowanych drgań:

- pojedynczy ładunek (0 ms) – charakteryzuje podłoże, którego *PSV* może być traktowane jako wzorcowe, spodziewana maksymalna odpowiedź obiektu na wymuszenie wyniosła 0,12 mm/s (maksymalna wartość *PSV*) i wystąpiła w zakresie częstotliwości  $7 \div 12$  Hz,
- opóźnienie 25 ms – wartość maksymalna wystąpiła dla częstotliwości 50 Hz i wyniosła prawie 0,2 mm/s, występuje też lokalny wzrost *PSV* w zakresie częstotliwości niższych 12 Hz,
- opóźnienie 42 ms – spowodowało powstanie dwóch maksimów o bardzo zbliżonych wartościach, z czego jedno ma największą wartość z wszystkich krzywych *PSV* wyznaczonych dla poszczególnych opóźnień, jedno dla częstotliwości 23 Hz (0,22 mm/s) – charakterystyczna FWOP, a drugie dla 40 Hz (0,21 mm/s),
- opóźnienie 67 ms – kształt krzywej *PSV* jest najbardziej zbliżony do krzywej uzyskanej z analizy dla pojedynczego ładunku, swoje maksimum osiąga przy częstotliwości 8 Hz i wynosi 0,95 mm/s, zauważalny jest również niewielki pik dla częstotliwości 14 Hz, która jest FWOP.

Widać zatem, że mimo różnych opóźnień wyraźnie występują w każdym *PSV* częstotliwości własne podłoża w zakresie  $8 \div 12$  Hz, a każde opóźnienie powoduje zmianę krzywych spektralnych w zakresie wyższych częstotliwości.

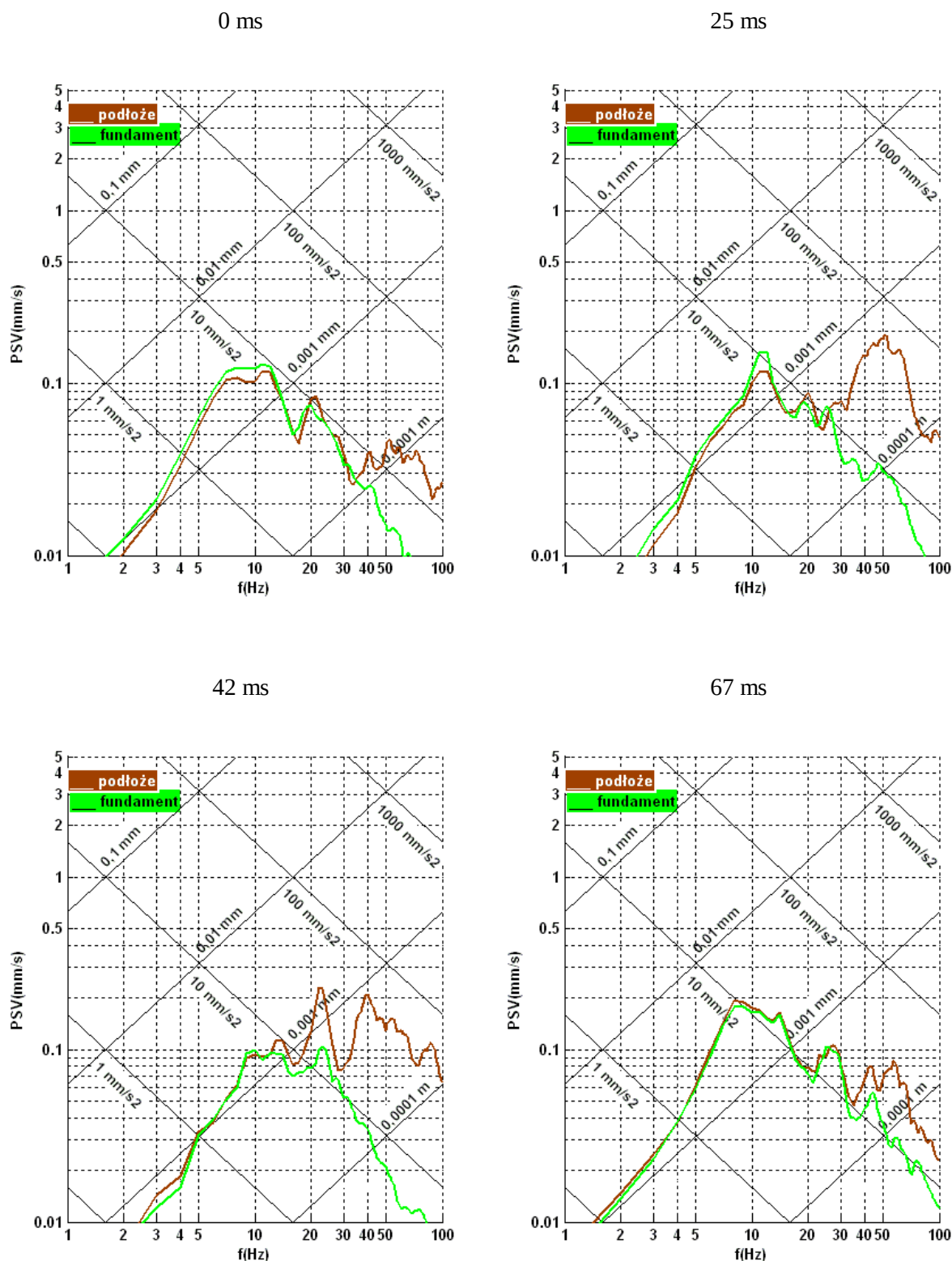
Rysunek 6.38 ilustruje tę samą składową, tylko na stanowisku znajdującym się na fundamencie obiektu (st. B1') posadowionego na tym podłożu.



Rys. 6.38. Pseudoprędkościowe spektrum odpowiedzi drgań zarejestrowanych na stanowisku B1' – składowa x

Na fundamencie obiektu dominują zdecydowanie niższe częstotliwości  $6 \div 14$  Hz, a kształty krzywych *PSV* są do siebie bardzo zbliżone. Jedynie, dla opóźnień 42 ms i 67 ms, *PSV* ma niewielkie wzmocnienia w zakresie częstotliwości  $23 \div 28$  Hz w porównaniu do krzywej *PSV*, uzyskanej dla drgań zarejestrowanych od pojedynczego ładunku. W celu lepszego zobrazowania problemu zmiany krzywej *PSV* przy przejściu drgań z podłoża do fundamentu obiektu, przedstawiono przykładowe opóźnienia dla składowej x na rysunku 6.39.



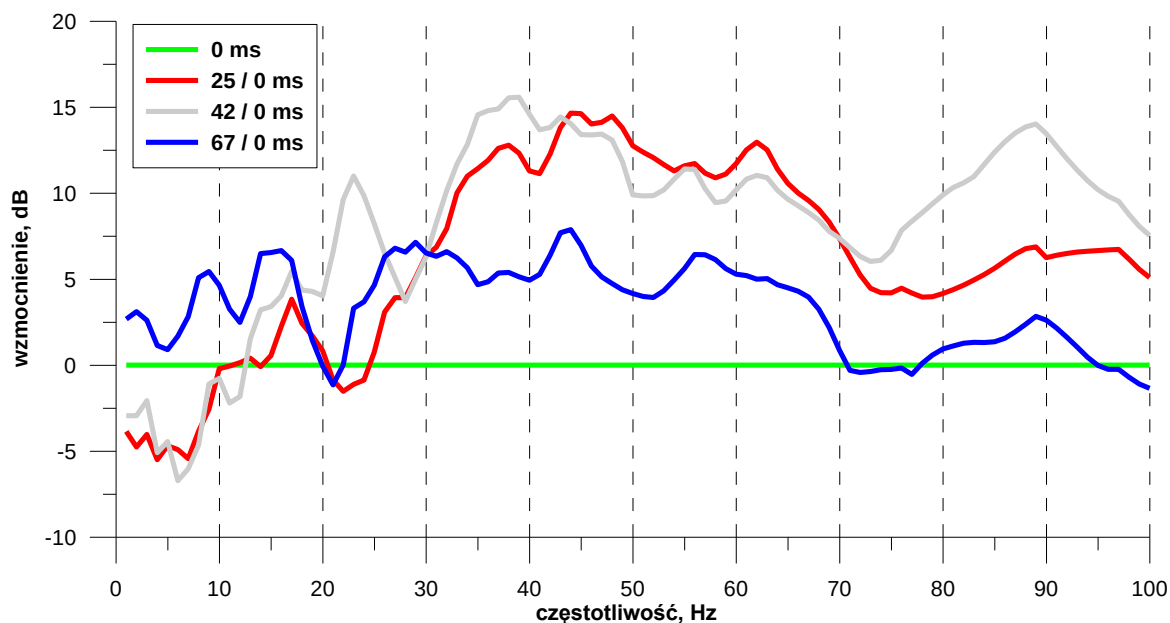


Rys. 6.39. Porównanie PSV dla stanowiska 1 i 1' dla różnych opóźnień – składowa x

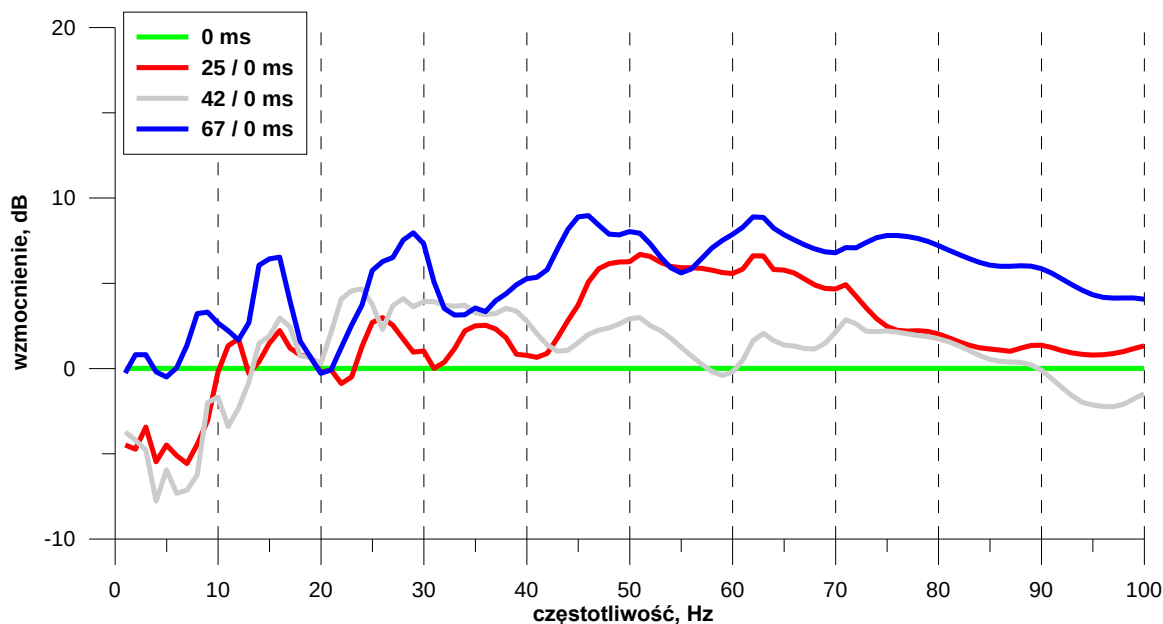
Na rysunku 6.39 można dostrzec tłumienie wyższych częstotliwości, gdy niższe pozostają bez zmian, a w przypadku pojedynczego ładunku MW i opóźnienia 25 ms nawet nie-

wielkie wzmocnienie niższych częstotliwości. W przypadku pojedynczego ładunku krzywe są bardzo do siebie zbliżone, tłumienie częstotliwości występuje powyżej 33 Hz, a wzmocnienie w przedziale  $7 \div 12$  Hz. Opóźnienie 67 ms ma kształt krzywych PSV oraz zmiany częstotliwości bardzo podobne do pojedynczego otworu.

W dalszej kolejności, do określenia wpływu opóźnienia milisekundowego na kształt krzywych PSV, wykorzystano współczynnik względnej mocy sygnału (Rys. 6.40 i 6.41).



Rys. 6.40. Względna moc drgań na stanowisku B1 – poziom odniesienia: odpalenie pojedynczego ładunku MW

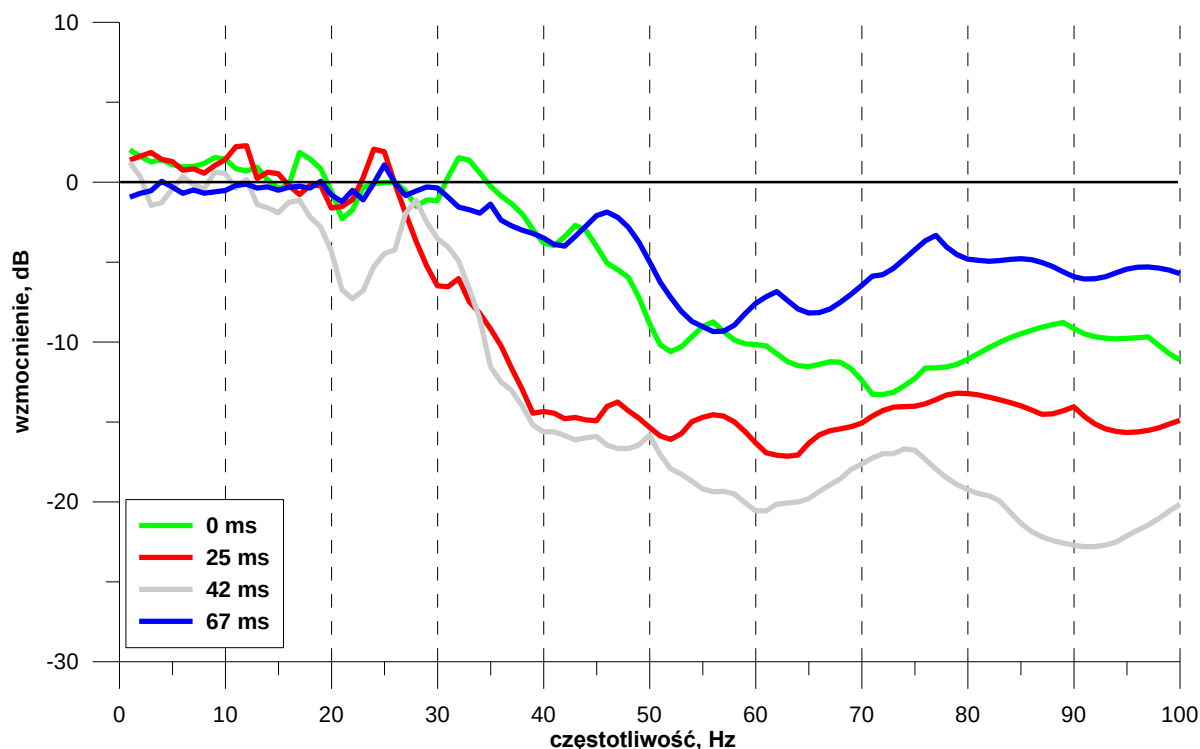


Rys. 6.41. Względna moc drgań na stanowisku B1' – poziom odniesienia: odpalenie pojedynczego ładunku MW

Analizując rysunki 6.40 i 6.41 będące graficznym obrazem obliczeń, można zauważyć, że:

- zastosowane opóźnienia milisekundowe zadawane systemem nieelektrycznym, w istotny sposób zmieniają charakterystykę częstotliwościową *PSV* drgań w podłożu, oraz w mniejszym stopniu na fundamencie,
- istnieje wyraźny podział przedziałów częstotliwości, na które oddziałują poszczególne opóźnienia milisekundowe: opóźnienia 25 ms i 42 ms powodują wzmocnienie drgań w przedziale wyższych częstotliwości, a tłumienie do 12 Hz, natomiast opóźnienie 67 ms powoduje wzmocnienie praktycznie w całym zakresie częstotliwości zarówno w podłożu jak i na fundamencie,
- częstotliwością rozdzielającą te dwie strefy, jest częstotliwość dominująca dla drgań przyjętych jako poziom odniesienia, czyli w przedział  $10 \div 12$  Hz dla których to obserwuje się najmniejszy wpływ,
- zarówno opóźnienia 25ms, 42 ms jak i 67 ms wzmacniają drgania w zakresie częstotliwości związanych z FWOP, odpowiednio 49 Hz, 23 Hz i 14,5 Hz,
- kierunek zmienności względnej mocy dla poszczególnych opóźnień wykazuje pewną prawidłowość, która jest zbliżona dla poszczególnych składowych na stanowiskach pomiarowych,
- przy opóźnieniu 67 ms, największe wzmocnienia występują w FWOP oraz w jego krotności, co nie jest zauważalne dla pozostałych opóźnień.

W dalszej części obliczono, podobnie jak dla drgań rejestrowanych w podłożu, współczynnik względnej mocy drgań – przyjmując za poziom odniesienia drgania rejestrowane w podłożu (stanowisko B1). Wyniki obliczeń przedstawiono na rysunku 6.42.



Rys. 6.42. Wartości współczynnika tłumienia drgań przy przejściu drgań z podłoża do obiektu w zależności od częstotliwości i zastosowanego opóźnienia milisekundowego

Na rysunku 6.42 można wydzielić dwie strefy zmian względnej mocy drgań. Pierwsza z nich to częstotliwości niższe w granicach od  $1 \div 27$  Hz – w zakresie tych częstotliwości względna moc drgań wykazuje niewielkie wzmocnienie, lub utrzymuje się na zbliżonym poziomie bliskim 0, co oznacza że drgania w nieznacznym stopniu ulegają modyfikacji przy przejściu z podłoża do fundamentu. Natomiast w strefie częstotliwości powyżej 27 Hz (dla opóźnienia 42 ms jest to powyżej 16 Hz) drgania podłoża, po przeniesieniu się do obiektu, ulegają zdecydowanemu tłumieniu.

### 6.2.3. Analiza wyników badań z kopalni wapienia B – odpalanie ładunków MW systemem elektronicznym *i-kon*

Wyniki pomiarów drgań zarejestrowanych w czasie odpalenia ładunków MW systemem elektronicznym, zestawiono w tabeli 6.3, w której podano parametry drgań w postaci maksymalnych prędkości zarejestrowanych na poszczególnych składowych  $u_z$ ;  $u_x$ ;  $u_y$  i odpowiadających tym wartościom maksymalnym częstotliwościom  $f_z$ ;  $f_x$  i  $f_y$ , oraz wektorów: przestrzennego  $u_{zxy}$  i płaskiego  $u_{xy}$ .

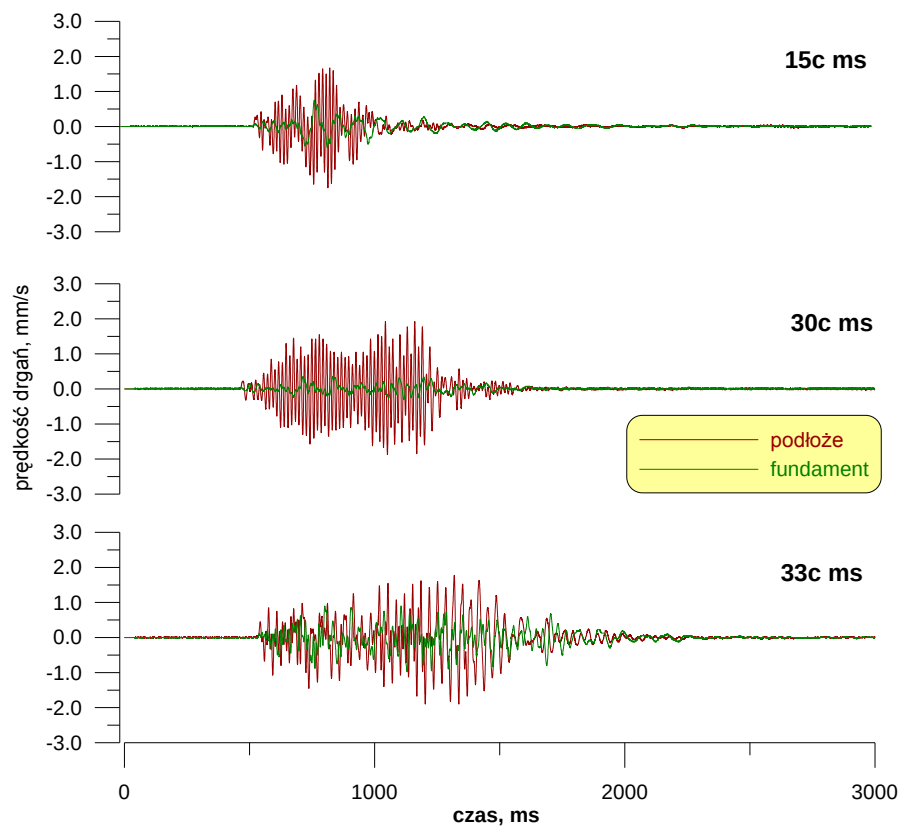
**Tabela 6.3. Wyniki pomiarów intensywności drgań**

| Lp                   | Stano-<br>wisko | Odległość | Prędkość drgań, mm/s |       |       | Częstotliwość, Hz |       |       | Wektor, mm/s |          |
|----------------------|-----------------|-----------|----------------------|-------|-------|-------------------|-------|-------|--------------|----------|
|                      |                 | m         | $u_z$                | $u_x$ | $u_y$ | $f_z$             | $f_x$ | $f_y$ | $u_{zy}$     | $u_{xy}$ |
| 1                    | 2               | 3         | 4                    | 5     | 6     | 7                 | 8     | 9     | 10           | 11       |
| <b>V</b><br>15 ms    | 1               | 680       | 0,63                 | 1,75  | 1,05  | 43,90             | 67,90 | 58,8  | 1,837        | 1,820    |
|                      | 1'              | 680       | 0,53                 | 0,75  | 1,00  | 12,5              | 11,5  | 9,0   | 1,202        | 1,175    |
| <b>VI</b><br>20 ms   | 1               | 710       | 1,3                  | 4,28  | 4,03  | 68,00             | 56,00 | 59,6  | 4,754        | 4,746    |
|                      | 1'              | 710       | 0,70                 | 0,83  | 0,58  | 28,4              | 27,8  | 21,2  | 0,941        | 0,870    |
| <b>VII</b><br>25 ms  | 1               | 640       | 0,58                 | 0,85  | 0,98  | 25,0              | 32,5  | 25,0  | 1,114        | 1,085    |
|                      | 1'              | 640       |                      | 0,53  | 0,50  |                   | 10,0  | 13,0  |              | 0,827    |
| <b>VIII</b><br>30 ms | 1               | 800       | 0,75                 | 1,93  | 1,28  | 56,20             | 63,30 | 57,1  | 2,241        | 2,221    |
|                      | 1'              | 800       | 0,48                 | 0,35  | 0,38  | 32,1              | 14,0  | 9,4   | 0,537        | 0,461    |
| <b>IX</b><br>33 ms   | 1               | 670       | 0,85                 | 1,90  | 1,30  | 28,1              | 45,0  | 25,4  | 1,960        | 1,904    |
|                      | 1'              | 670       | 0,38                 | 0,98  | 1,35  | 19,8              | 31,8  | 25,7  | 1,488        | 1,488    |
| <b>X</b><br>33 ms    | 1               | 700       | 0,75                 | 1,80  | 1,88  | 57,5              | 52,6  | 54,3  | 1,912        | 1,888    |
|                      | 1'              | 700       |                      | 0,33  | 0,38  |                   | 30,1  | 22,5  |              | 0,958    |

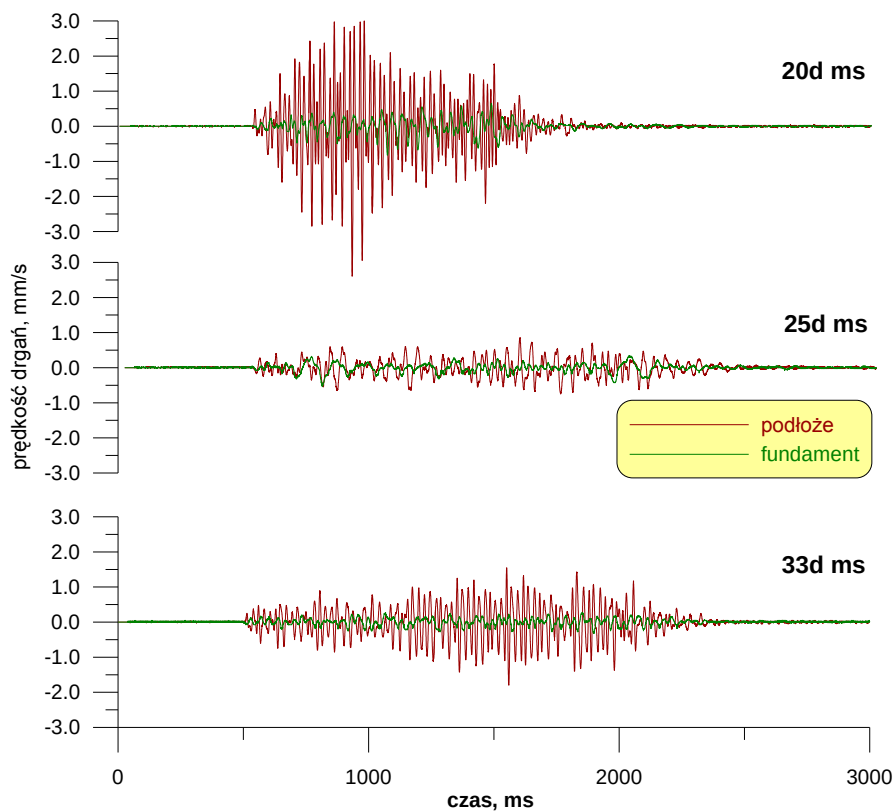
Dokumentację zarejestrowanych drgań (sejsmogramy) zestawiono w załącznikach VII, VIII, X ÷ XIII (rys. Z7-1, Z8-1, Z10-1, Z11-1, Z12-1 i Z13-1).

Dla przykładu na rysunkach 6.43 i 6.44 przedstawiono sejsmogramy drgań (składowa pozioma) zarejestrowanych, na stanowiskach nr B1 i nr B1' przy odpalaniu ładunków MW z różnymi opóźnieniami milisekundowymi.

Porównawczo odpalono dwie serie o opóźnieniu 33 ms, z których jedną o ładunku ciągłym oznaczono 33c, a drugą o ładunku dzielonym – 33d. Ponadto ładunkami dzielonymi odpalono także serie otworów o opóźnieniach 20 ms i 25 ms, oznaczając odpowiednio 20d i 25d.



**Rys. 6.43. Sejsmogramy drgań podłoża i fundamentu dla różnych opóźnień milisekundowych – ładunek całkowity**

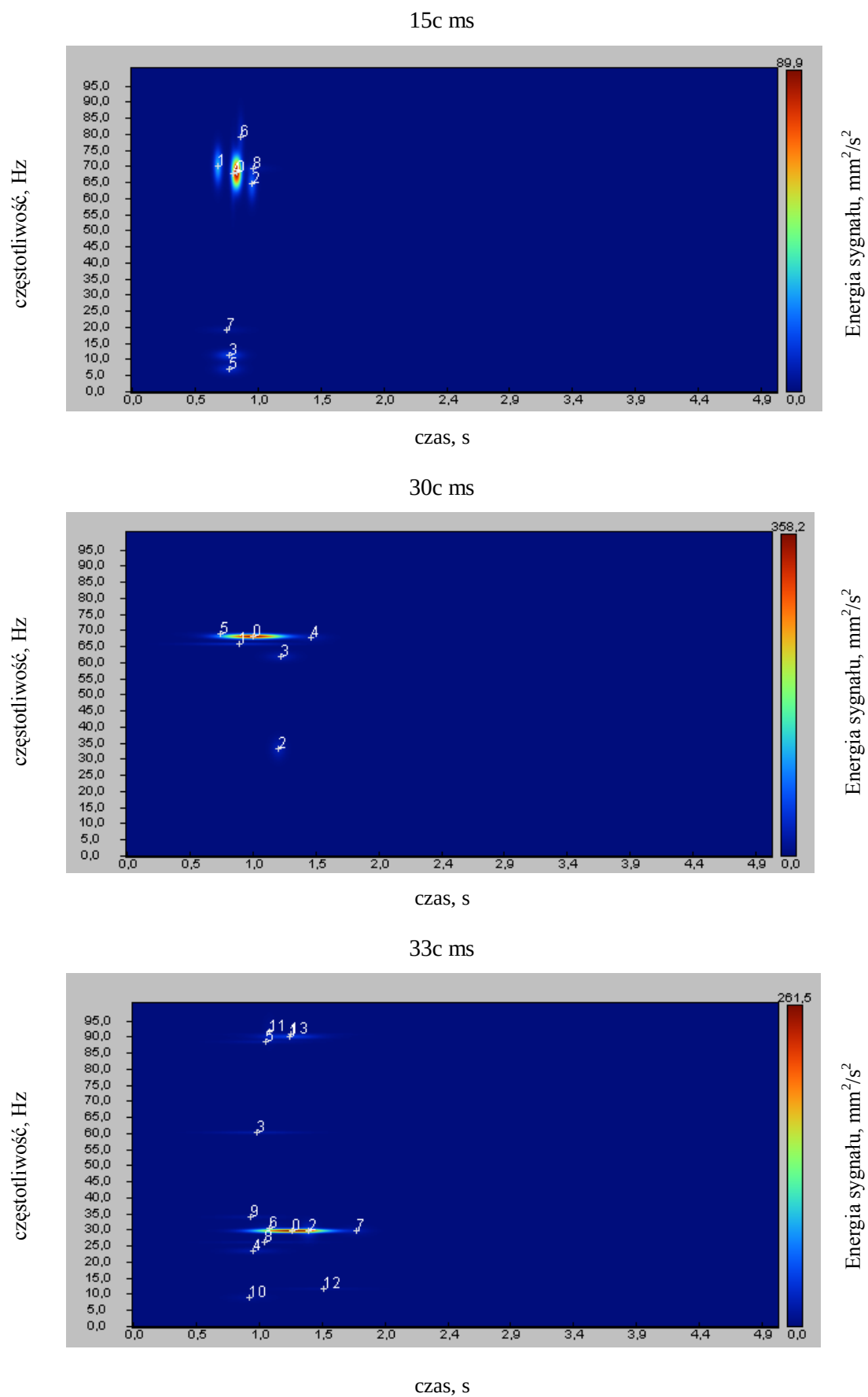


**Rys. 6.44. Sejsmogramy drgań podłoża i fundamentu dla różnych opóźnień milisekundowych – ładunek dzielony**

Wstępna analiza zapisów zarejestrowanych drgań, wzbudzonych odpalaniem ładunków MW systemem elektronicznym, wskazuje znaczący wpływ opóźnienia milisekundowego na charakter drgań, ich intensywność oraz sposób „przenoszenia się” do fundamentu. Opóźnienie 20d ms, mimo że zadane w ładunkach dzielonych, wzbudziło drgania o największym poziomie intensywności w podłożu, ale po przejściu do obiektu drgania uległy znacznemu wytłumieniu. Analizując wszystkie przebiegi (załączniki VII, VIII, X ÷ XIII, rys. Z7-1, Z8-1, Z10-1, Z11-1, Z12-1 i Z13-1) widać, że opóźnienie 30c ms i 33d ms spowodowało obniżenie poziomu rejestrowanych drgań na fundamencie poniżej poziomu zarejestrowanego od pojedynczego ładunku (załącznik VI Rys. Z6-1). Największy poziom intensywności na fundamencie wzbudziło opóźnienie 15c ms przy którym wystąpiło najmniejsze tłumienie przy przejściu z podłoża do fundamentu obiektu. Opóźnienia 30c ms i 33c ms mają zbliżony poziom intensywności między sobą w podłożu, ale różny na fundamencie. Dzięki zastosowaniu mniejszego ładunku MW na opóźnienie udało się, w przypadku opóźnień 25d ms i 33d ms, znacznie obniżyć poziom rejestrowanych drgań zarówno w podłożu jak i na fundamencie.

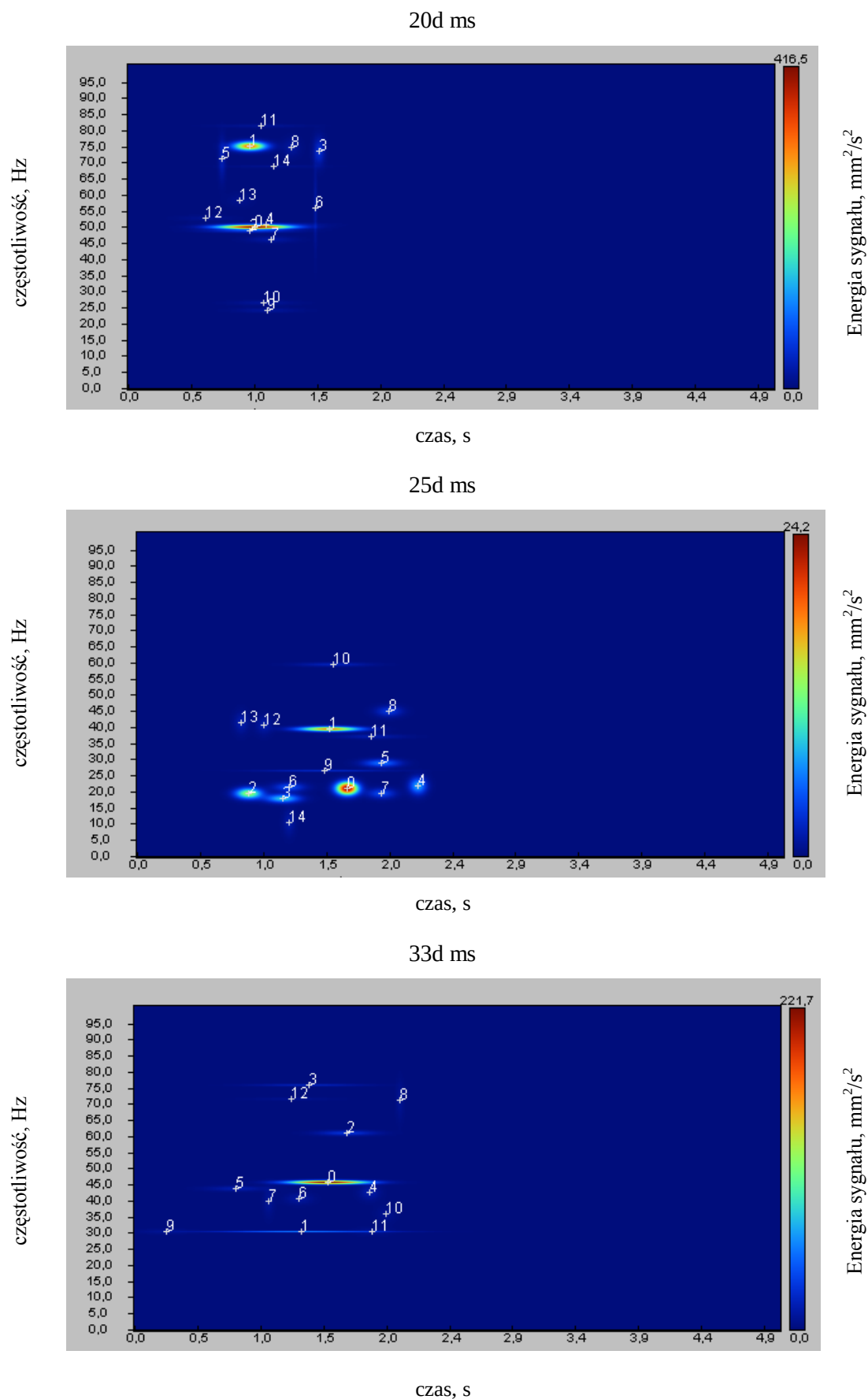
W celu dokładniejszego przeanalizowania sejsmogramów poddano je podobnie jak w poprzednich przypadkach, analizie czasowo – częstotliwościowej z wykorzystaniem metody MP. Rozkłady sygnałów przedstawiono w postaci: mapy Wignera – Ville’a, przestrzennego obrazu tej mapy i struktury drgań w postaci histogramów atomów Gabora (kolory zastosowane jak w legendzie – rys. 6.2).

Na rysunkach 6.45 do 6.49 przedstawiono graficznie wyniki obliczeń z zastosowaniem metody MP dla jednej ze składowych poziomych. Wynika z nich, że wielkość opóźnienia milisekundowego zmienia dominujące częstotliwości drgań. Do porównań, jako punkt odniesienia, przyjęto charakterystykę drgań wzbudzanych pojedynczym ładunkiem MW.

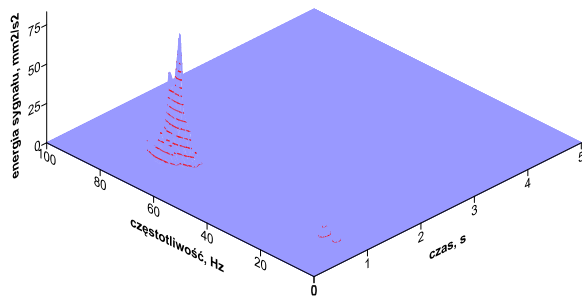


Rys. 6.45. Wynik analizy drgań metodą MP w postaci map Wignera Ville'a – drgania zarejestrowane w podłożu, a wzbudzone w czasie odpalania ładunków MW z różnym opóźnieniem milisekundowym

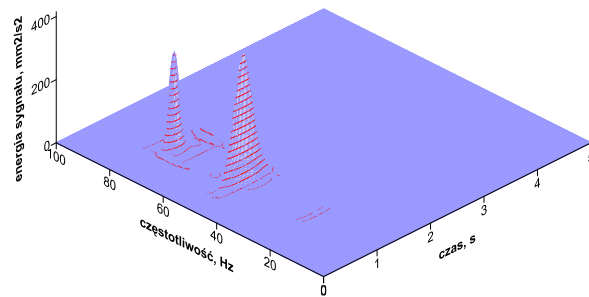




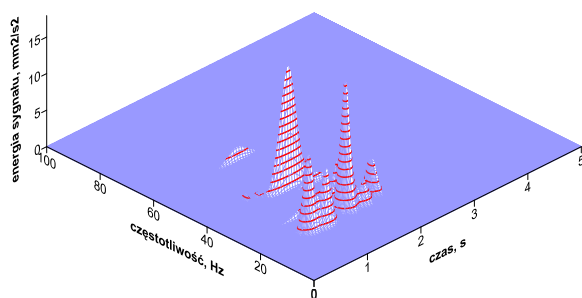
Rys. 6.46. Wynik analizy drgań metodą MP w postaci map Wignera Ville'a – drgania zarejestrowane w podłożu, a wzbudzone w czasie odpalania ładunków MW z różnym opóźnieniem milisekundowym



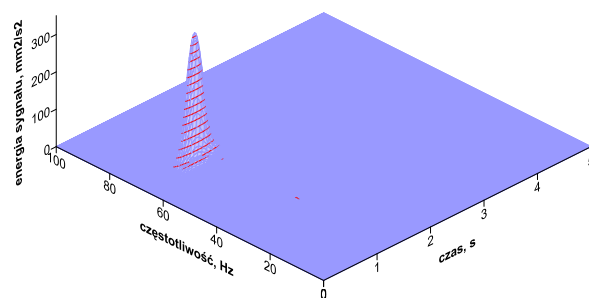
15c ms



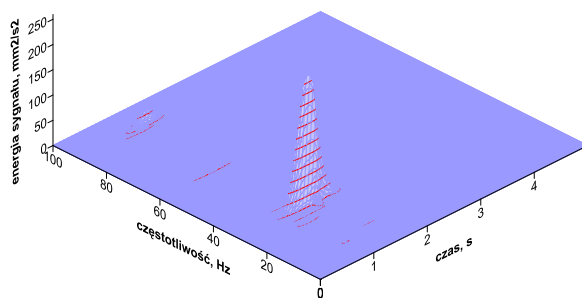
20d ms



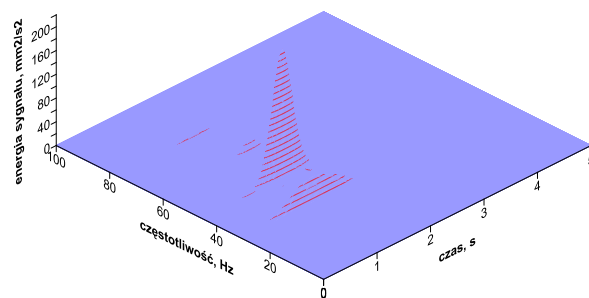
25d ms



30c ms

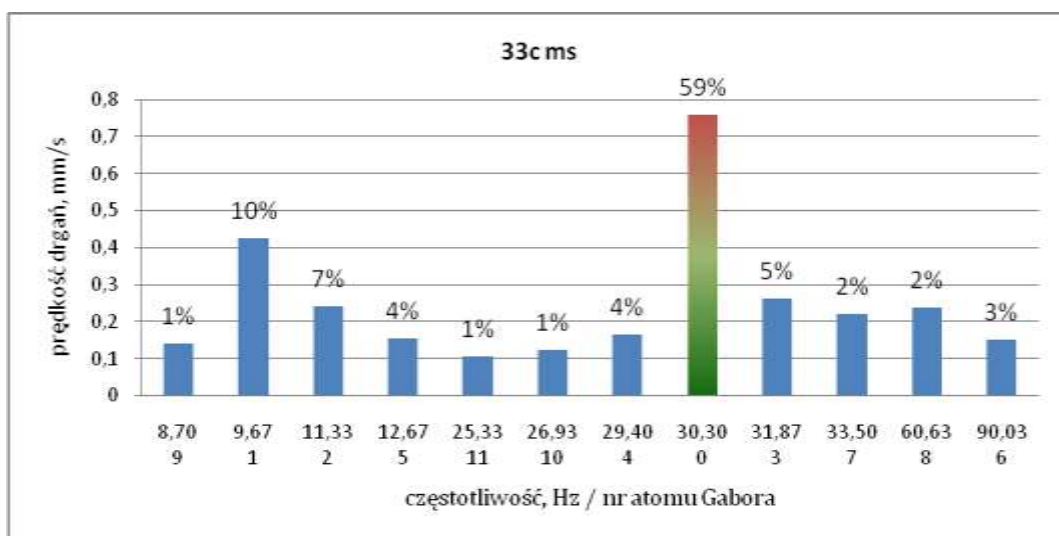
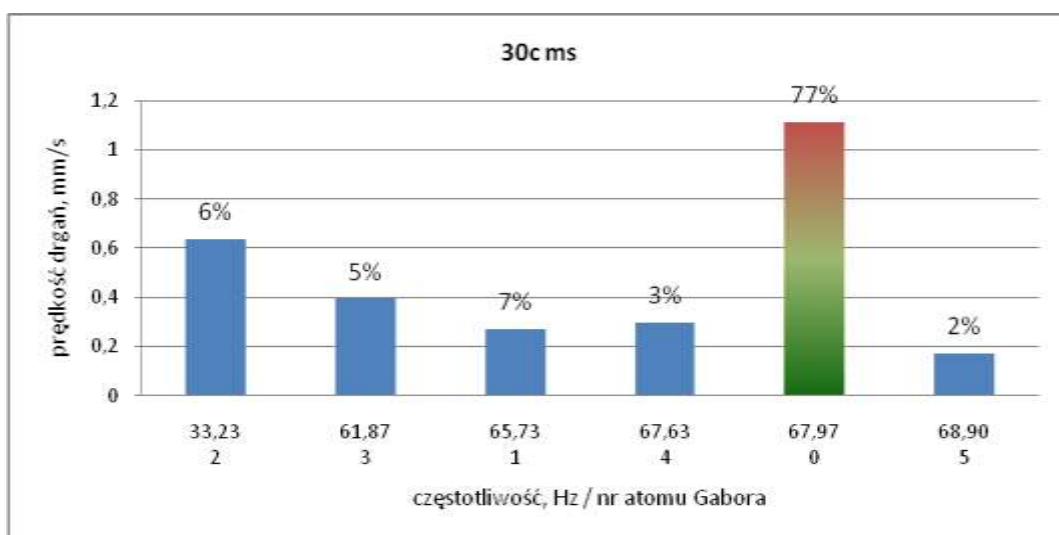
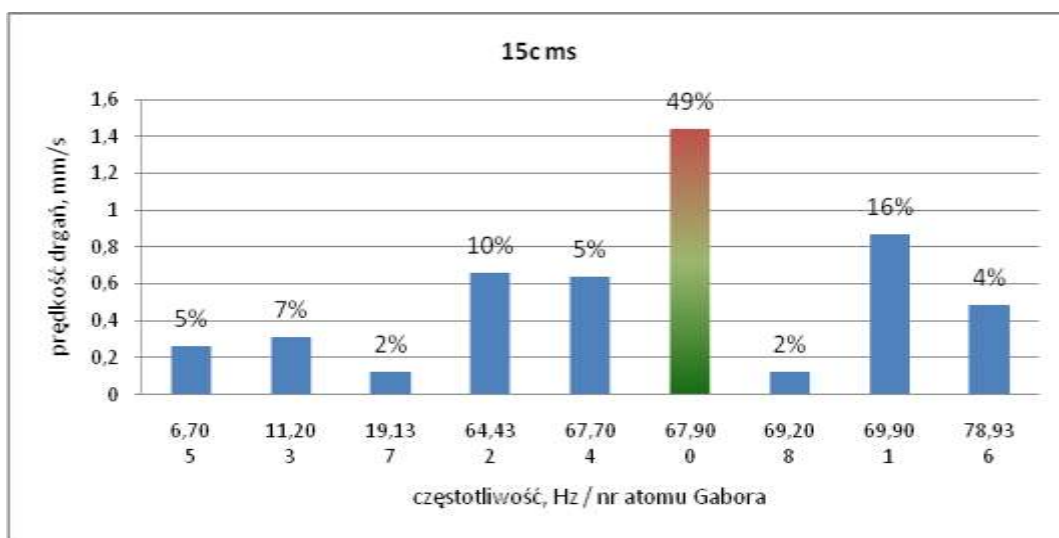


33c ms

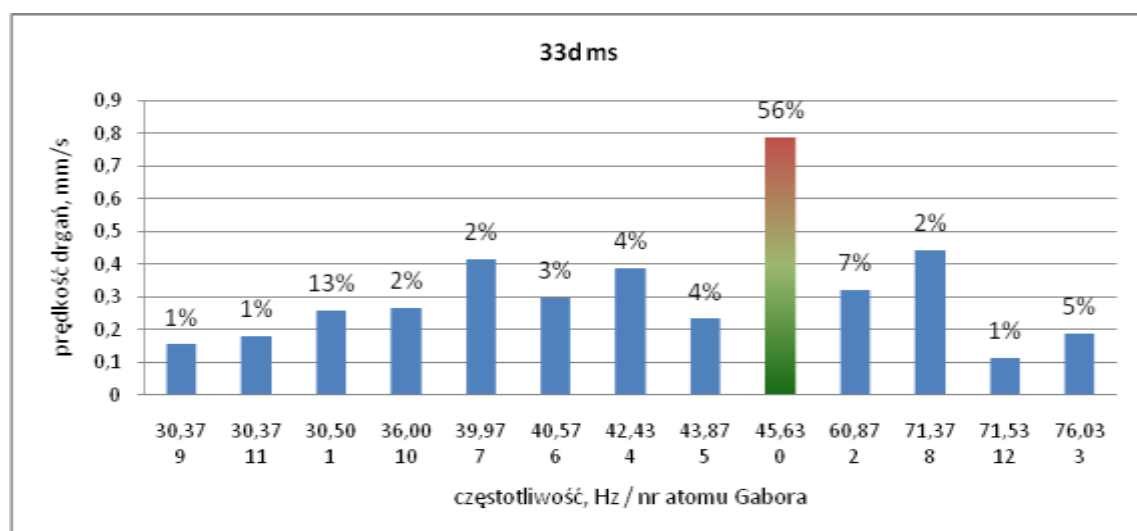
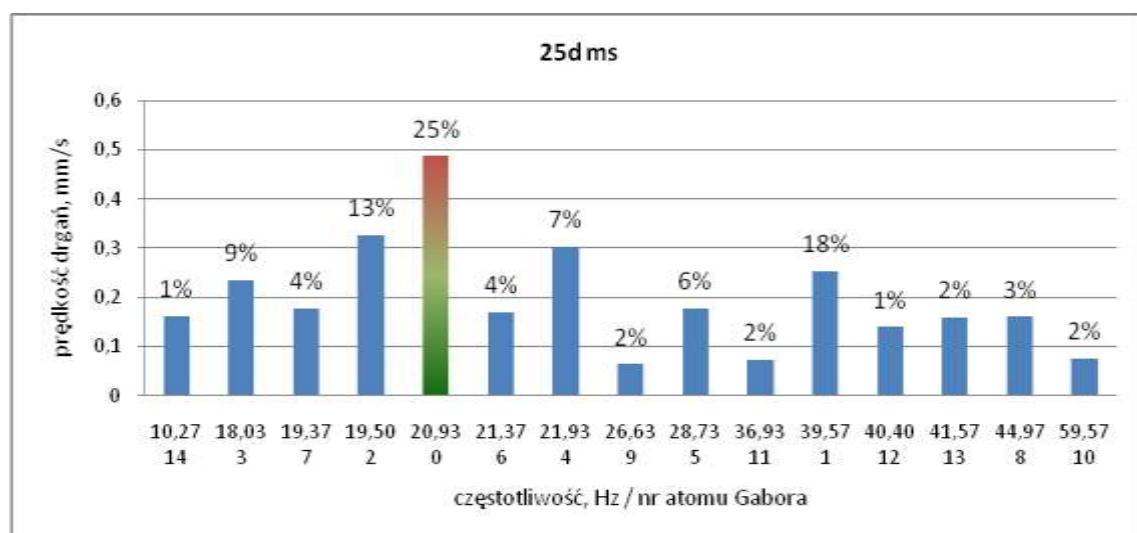
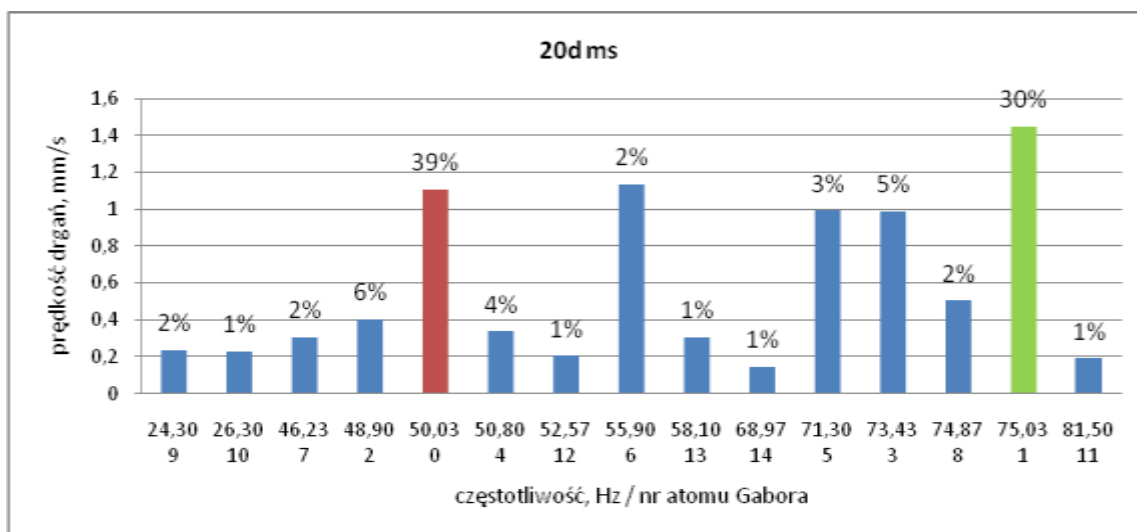


33d ms

**Rys. 6.47. Wynik analizy drgań metodą MP w postaci map przestrzennych – drgania zarejestrowane w podłożu, a wzbudzone w czasie odpalania ładunków MW z różnym opóźnieniem milisekundowym**



Rys. 6.48. Histogramy atomów Gabora dla drgań podłoża wzbudzanych poszczególnymi opóźnieniami dla ładunku ciągłego



Rys. 6.49. Histogramy atomów Gabora dla drgań podłoża wzbudzanych poszczególnymi opóźnieniami dla ładunku dzielonego

Analizując wyniki drgań podłoża (Rys. 6.45 ÷ 6.49) widać w jak wyraźny sposób zastosowane opóźnienie wpłynęło na zmiany częstotliwości i intensywności. Wyniki ponownie potwierdzają wcześniejsze spostrzeżenia, że opóźnienie wpływa na charakterystyki częstotliwościowe rejestrowanych drgań. W sygnale występuje już bardzo przejrzyste FWOP: 15c ms – 67,9 Hz, 33c ms – 30,3 Hz, 20d ms – 50,03 Hz.

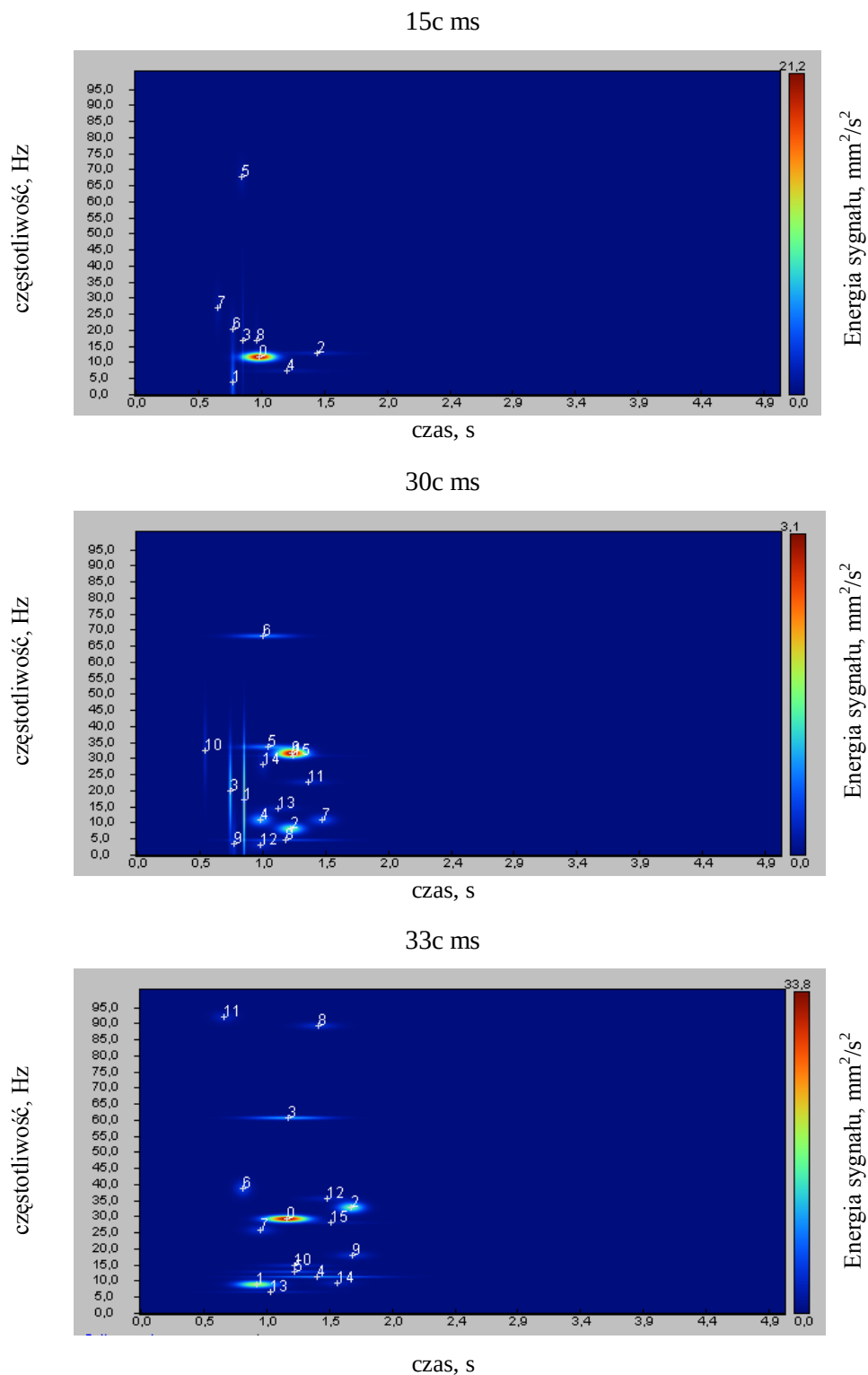
Porównując charakterystykę drgań wzbudzanych poszczególnymi opóźnieniami milisekundowymi, ze strukturą częstotliwościową sygnału od pojedynczego ładunku MW (Rys. 6.20 ÷ 6.22), można zauważyć, że:

- opóźnienie 15c ms wzbudza drgania o częstotliwości dominującej 67,90 Hz (49% energii sygnału), czyli zdecydowanie wyższą od 11,00 Hz, charakterystycznej dla pojedynczego ładunku (52% energii sygnału), atom najbardziej zbliżony do częstotliwości 11 Hz to atom nr 3/11,2 Hz, który reprezentuje 7% energii sygnału,
- opóźnienie 20d ms wzbudziło drgania o częstotliwości dominujące 50,03 Hz (39% energii sygnału), która jest również FWOP, kolejna częstotliwość będąca 1,5 krotnością FWOP – 75,03 Hz reprezentuje 30% energii sygnału,
- opóźnienie 25d ms wzbudziło drgania o częstotliwości dominującej 20, 93 Hz (25% energii sygnału), natomiast FWOP 39,57 Hz reprezentuje 18% energii sygnału i występuje w atomie 1,
- opóźnienie 30c ms podwyższyło częstotliwość drgań dwukrotnie wyższej niż to wynika z zastosowanego opóźnienia, a więc wzbudziło częstotliwość 67,97 Hz, która opisuje aż 77% energii sygnału, FWOP to 33,23 Hz (6% energii sygnału),
- opóźnienie 33c ms, wzbudziło FWOP 30,30 Hz (59% energii sygnału), wystąpiła też częstotliwość zbliżona do częstotliwości własnej podłoża 2/11,33 Hz (7% energii sygnału).
- opóźnienie 33d ms podwyższyło częstotliwość drgań związaną z zastosowanym opóźnieniem do 45,64 Hz (56% energii sygnału), natomiast częstotliwość 30,5 Hz charakterystyczna dla tego opóźnienia to zaledwie 13% energii sygnału.

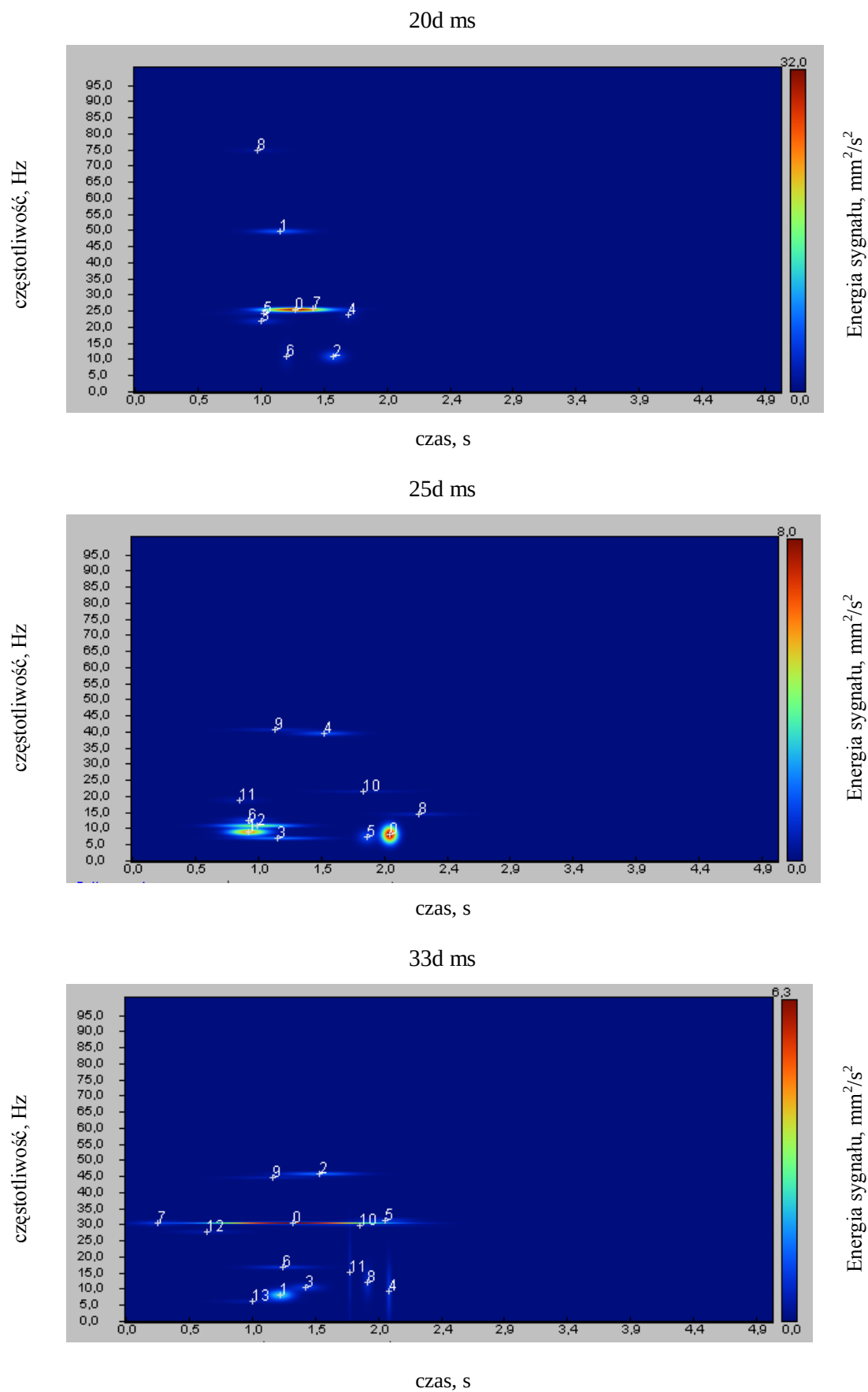
Można zauważyć, że opóźnienie zadawane systemem elektronicznym w wyraźny sposób wymusza w podłożu FWOP. W sygnale występują również częstotliwości będące wielokrotnością FWOP – 0,5; 1,5; 2 i nawet 3FWOP. Bardziej uwidacznia się to dla ładunku dzielonego, gdzie liczba odpalanych ładunków jest dwukrotnie większa, ale wystąpiło to również przy ładunku całkowitym dla opóźnienia 30c ms.

Analizując drugą składową poziomą (załączniki VII, VIII, X ÷ XIII, Rys. Z7- 8 ÷ 10, Z8- 8 ÷ 10, Z10- 8 ÷ 10, Z11- 8 ÷ 10, Z12- 8 ÷ 10 i Z13- 8 ÷ 10) można zauważyć duże podobieństwo

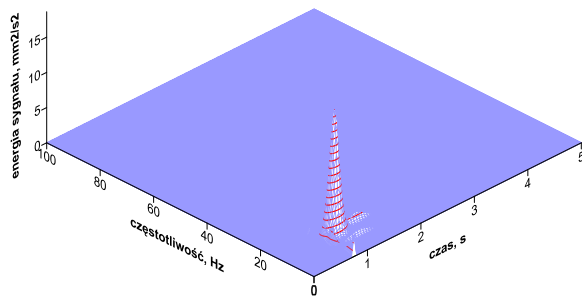
w strukturze sygnału między składowymi. Częstotliwości są bardzo do siebie zbliżone, różnice są tylko w kolejności występowania tych częstotliwości w poszczególnych atomach. Bardzo podobną strukturę do poziomych składowych ma składowa pionowa (załączniki VII, VIII, X ÷ XIII, Rys. Z7- 2 ÷ 4, Z8- 2 ÷ 4, Z10- 2 ÷ 4, Z11- 2 ÷ 4, Z12- 2 ÷ 4 i Z13- 2 ÷ 4).



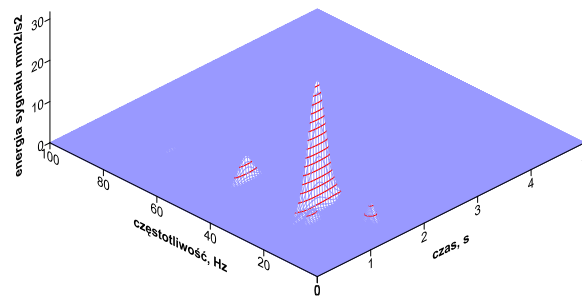
**Rys. 6.50. Wynik analizy drgań metodą MP w postaci map Wignera Ville'a – drgania zarejestrowane na fundamencie, a wzbudzone w czasie odpalania ładunków MW z różnym opóźnieniem milisekundowym**



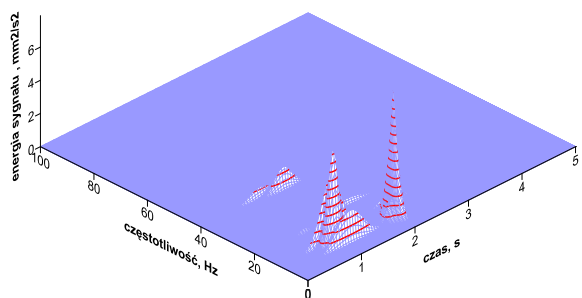
Rys. 6.51. Wynik analizy drgań metodą MP w postaci map Wignera Ville'a – drgania zarejestrowane na fundamencie, a wzbudzone w czasie odpalania ładunków MW z różnym opóźnieniem milisekundowym



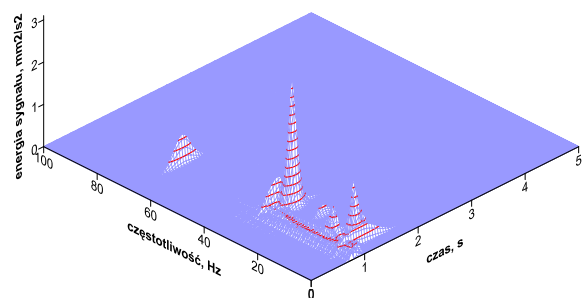
15c ms



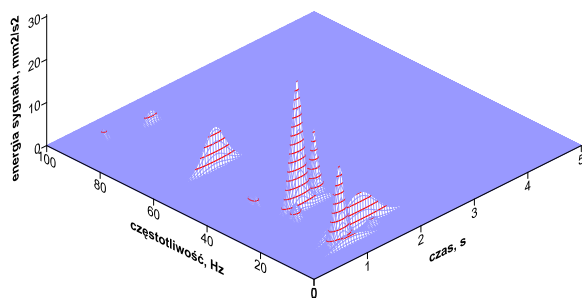
20d ms



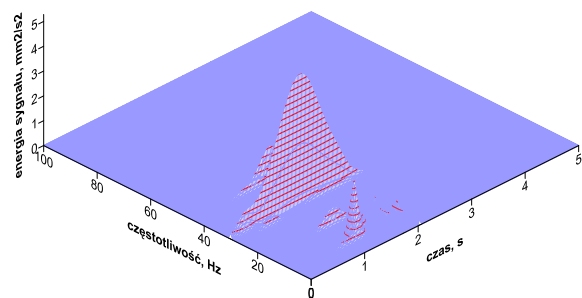
25d ms



30c ms



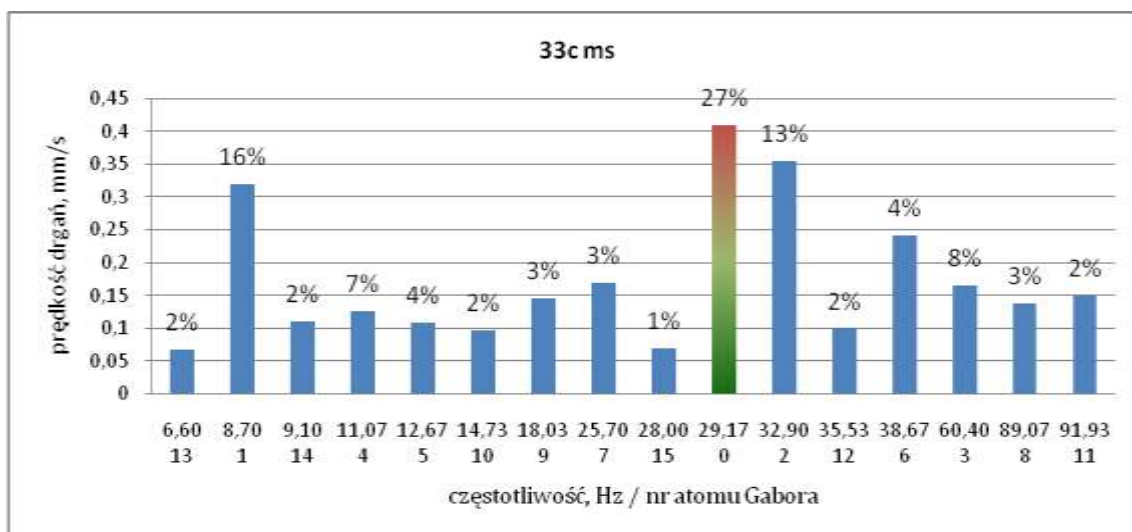
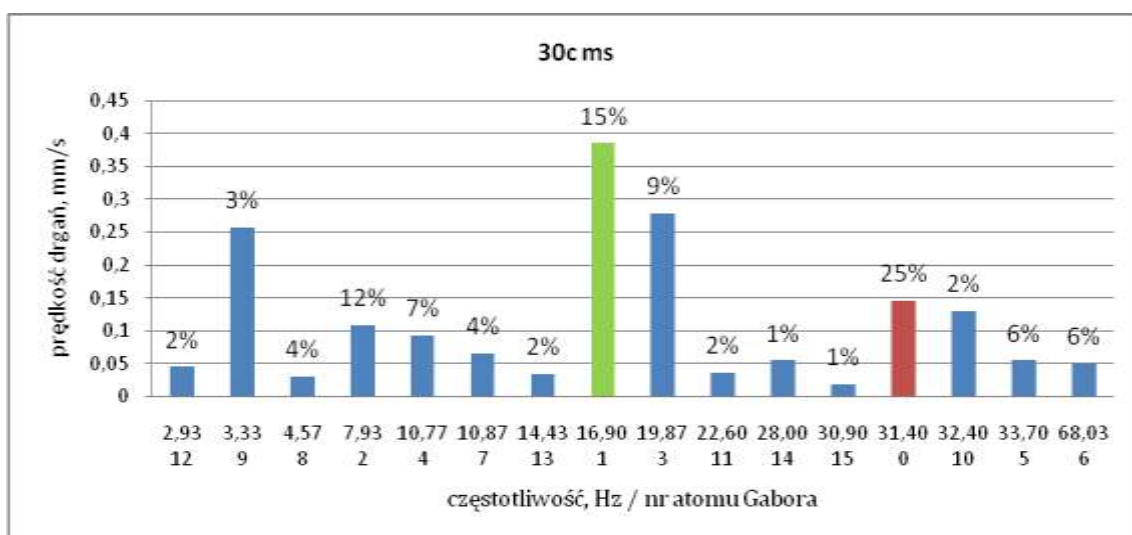
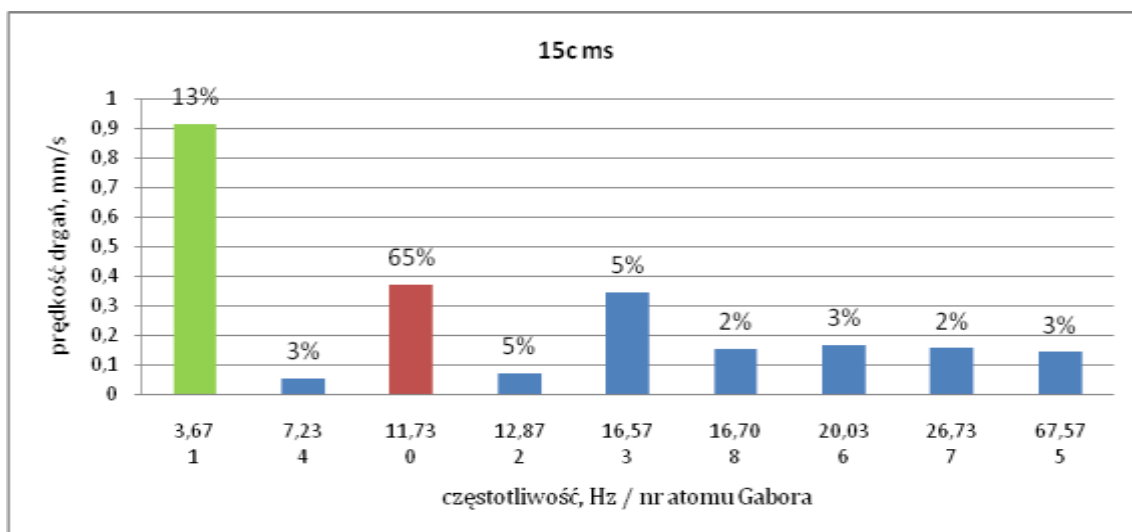
33c ms



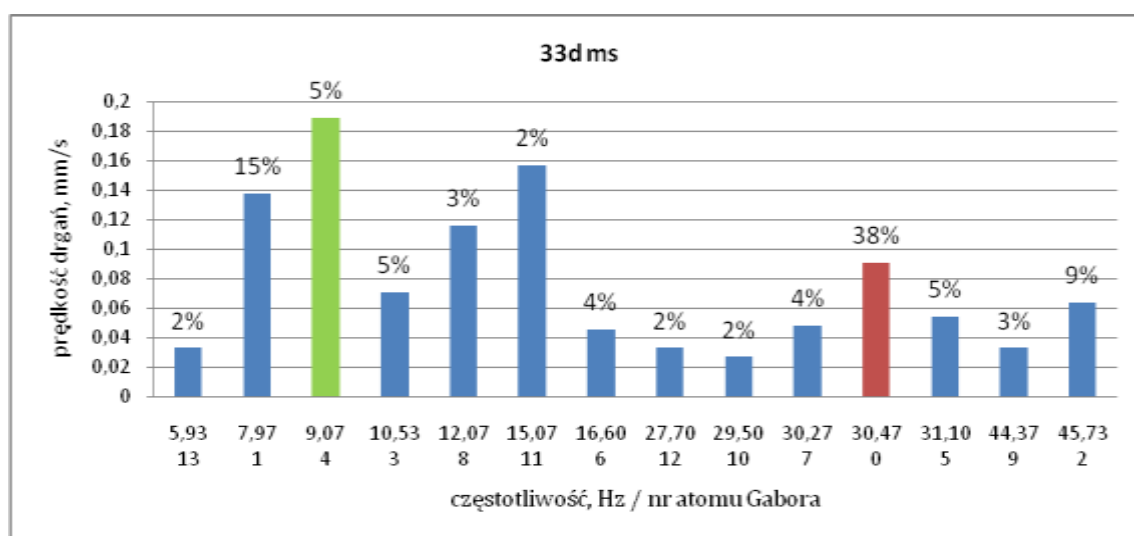
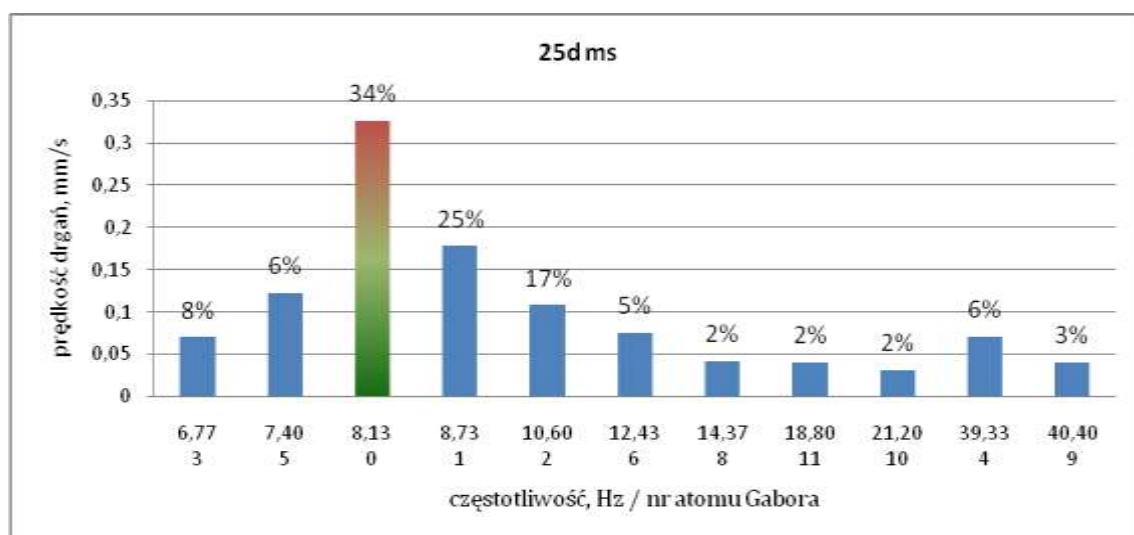
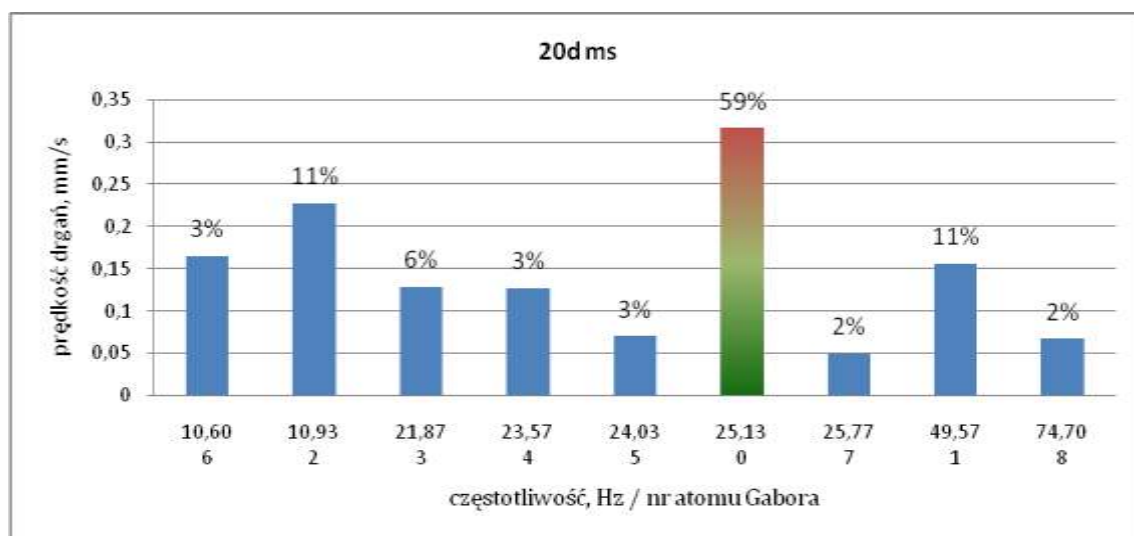
33d ms

**Rys. 6.52. Wynik analizy drgań metodą MP w postaci map przestrzennych – drgania zarejestrowane na fundamencie, a wzbudzone w czasie odpalania ładunków MW z różnym opóźnieniem milisekundowym**





Rys. 6.53. Histogramy atomów Gabora dla drgań fundamentu wzbudzanych poszczególnymi opóźnieniami dla ładunku ciągłego



Rys. 6.54. Histogramy atomów Gabora dla drgań fundamentu wzbudzanych poszczególnymi opóźnieniami dla ładunku dzielonego

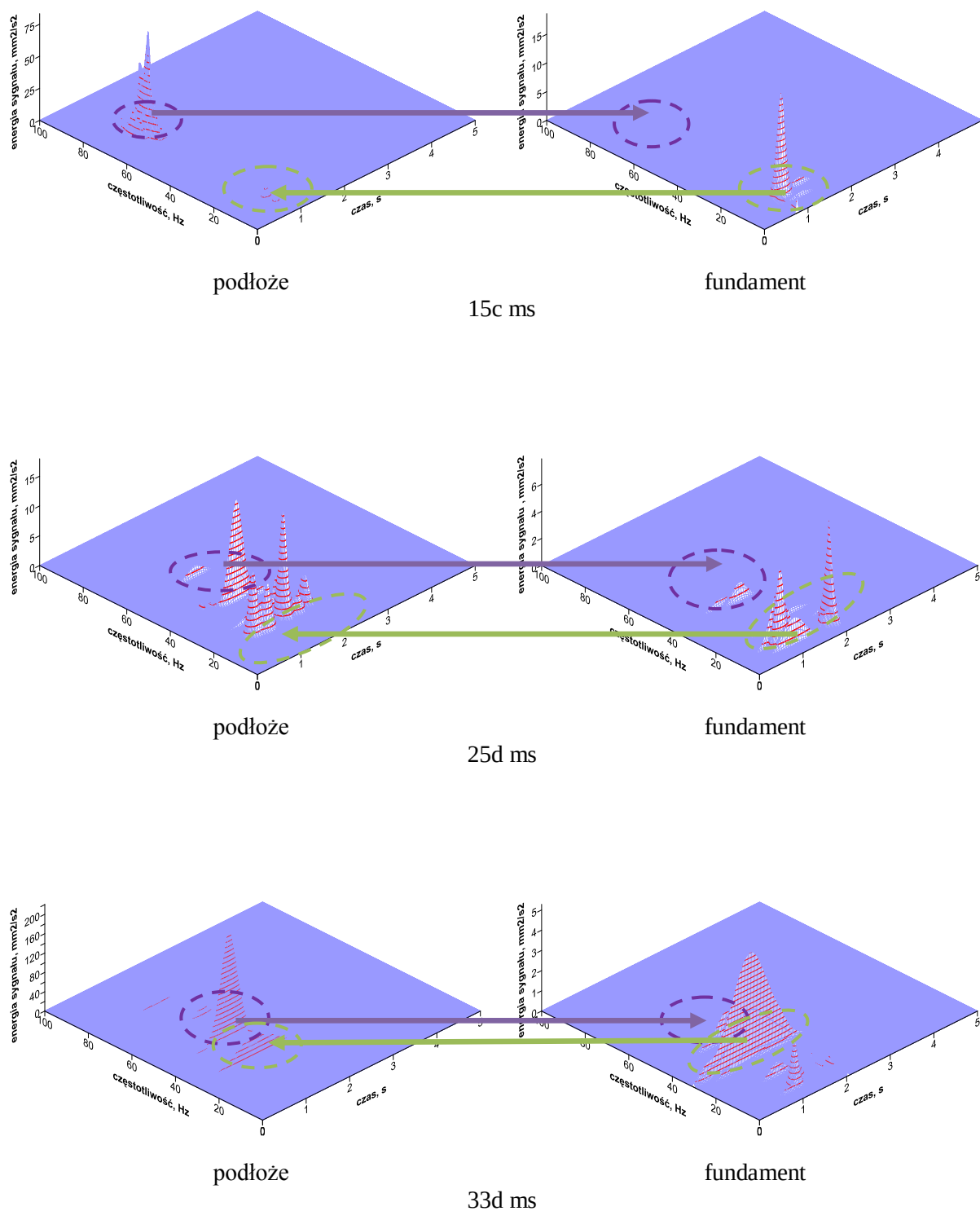
Analiza wyników drgań fundamentu potwierdza poprzednie spostrzeżenia. W sygnale można bez problemu znaleźć FWOP lub bardzo do niej zbliżoną: 33d ms – 30,47 Hz, 33c ms – 29,17 Hz.

Porównując charakterystyki drgań wzbudzanych poszczególnymi opóźnieniami milisekundowymi ze strukturą częstotliwościową sygnału od pojedynczego ładunku MW (Rys. 6.50 ÷ 6.54), można zauważyć, że:

- opóźnienie 15c ms wzbudziło drgania o częstotliwości dominującej 11,73 Hz (65% energii sygnału), czyli praktycznie taką samą jak częstotliwość własna fundamentu uzyskana przy odpalaniu pojedynczego ładunku 11,20 Hz, FWOP to zaledwie 3% energii sygnału – 5/67,57 Hz,
- opóźnienie 20d ms wzbudziło drgania o częstotliwości dominujące 25,13 Hz (59% energii sygnału), czyli częstotliwości która zgodnie z polską skalą szkodliwości SWD I jest najbardziej szkodliwa dla obiektu, FWOP to 49,57 Hz (11% energii sygnału), a częstotliwość bliska częstotliwości drgań własnych obiektu to 10,93 (11% energii sygnału),
- opóźnienie 25d ms spowodowało wystąpienie drgań o niższych częstotliwościach niż charakterystyczne dla obiektu, a wynoszące 8,13 Hz (34% energii sygnału) i 8,73 Hz (25% energii sygnału), natomiast FWOP 39,33 Hz tłumaczy 6% energii sygnału (atom 4),
- opóźnienie 30c ms wzbudziło drgania o FWOP 31,40 Hz (25% energii sygnału) oraz częstotliwości niższe – 1/16,90 Hz (15% energii sygnału),
- opóźnienie 33c ms wzbudziło drgania o częstotliwości dominującej wynikłej z zastosowanego opóźnienia 29,17 Hz (27% energii sygnału) oraz częstotliwości niższe niż charakterystyczne dla obiektu – 1/16,90 Hz (15% energii sygnału),
- opóźnienie 33d ms podobnie jak opóźnienie 33c wzbudziło drgania o FWOP 30,47 Hz (38% energii sygnału) oraz częstotliwości niższe od częstotliwości drgań własnych obiektu – 1/7,97 Hz (15% energii sygnału).

Analizując drugą składową poziomą (załączniki VII, VIII, X ÷ XIII, Rys. Z7- 17 ÷ 19, Z8- 17 ÷ 19, Z10- 14 ÷ 16, Z11- 17 ÷ 19, Z12- 12 ÷ 19 i Z13- 14 ÷ 16) można zauważyć duże podobieństwo w strukturze sygnału między składowymi. Częstotliwości są bardzo do siebie zbliżone, różnice są tylko w kolejności występowania tych częstotliwości w poszczególnych atomach. Bardzo podobną strukturę do płaskich składowych ma również składowa pionowa (załączniki VII, VIII, XI, XII, Rys. Z7- 11 ÷ 13, Z8- 11 ÷ 13, Z11- 11 ÷ 13, Z12- 12 ÷ 19).

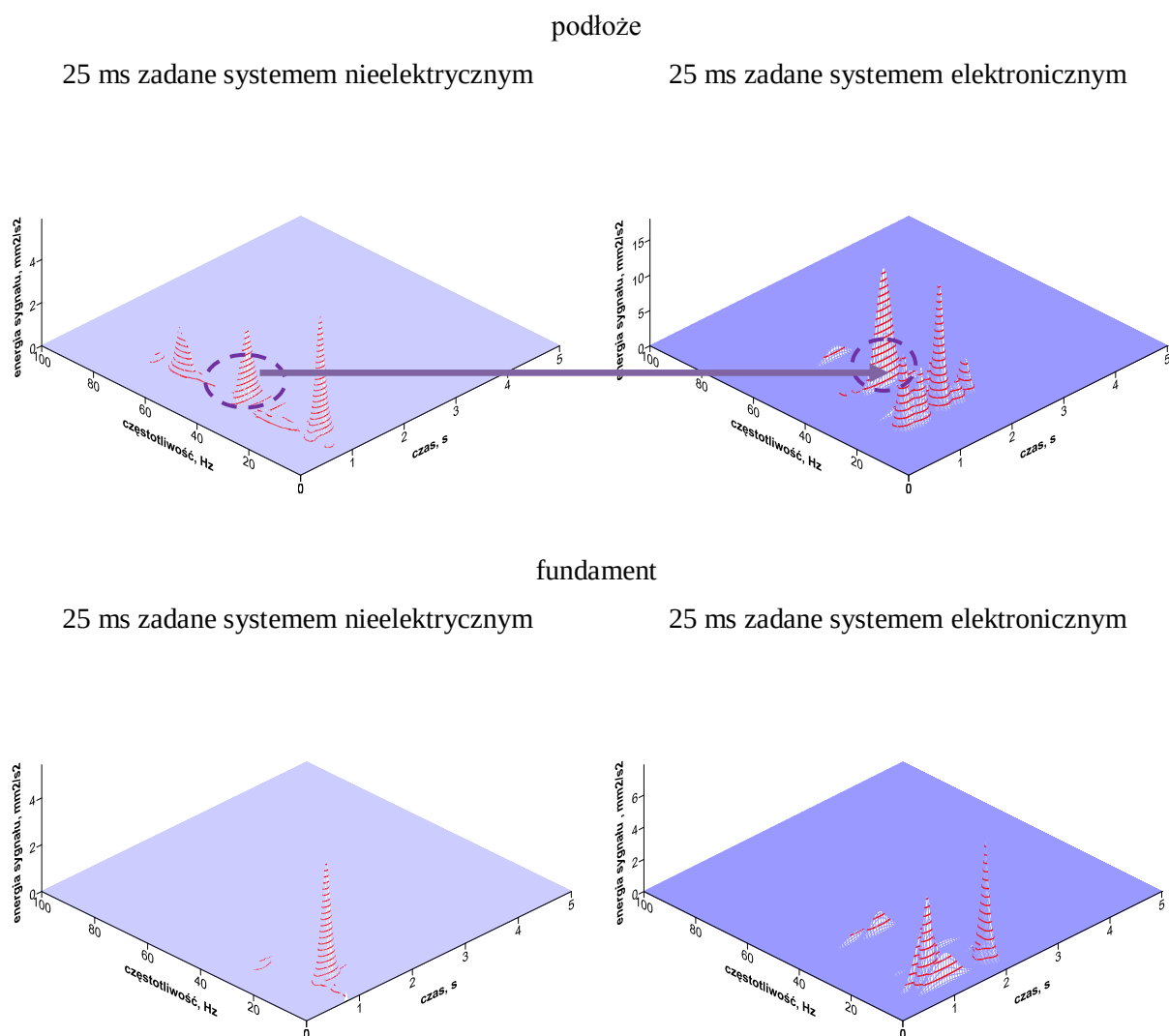
W dalszej części porównano struktury częstotliwościowe drgań zarejestrowanych w podłożu i na fundamencie obiektu (Rys. 6.55).



Rys. 6.55. Porównanie struktury drgań przy przejściu z podłoża do fundamentu

Na rysunku 6.55 przedstawiono porównanie struktury częstotliwościowej sygnałów zarejestrowanych w podłożu i na fundamencie obiektu dla opóźnień 15c ms, 25d ms i 33d ms. W przypadku opóźnienia 15c ms, przy „przejściu” sygnału z podłoża do fundamentu, wystąpiło silne tłumienie wyższych FWOP, natomiast niższe pozostały na niezmiennym poziomie. W przypadku opóźnienia 25d ms również zauważalna jest taka zmiana. Częstotliwości wyższe 40 i 20 Hz zostały wytłumione, natomiast na fundamencie pojawiły się niższe około 8 Hz. Taka sama sytuacja jest dla opóźnienia 33d ms, gdzie częstotliwość 45 Hz została wytłumiona. Dominuje FWOP – 30 Hz oraz częstotliwości niższe 8 – 9 Hz

W celu porównania efektów użycia systemu nieelektrycznego i elektronicznego na rysunku 6.56 zestawiono wyniki analizy MP, w postaci map trójwymiarowych, dla opóźnienia 25 ms zadawanego tymi systemami w tym samym punkcie pomiarowym.



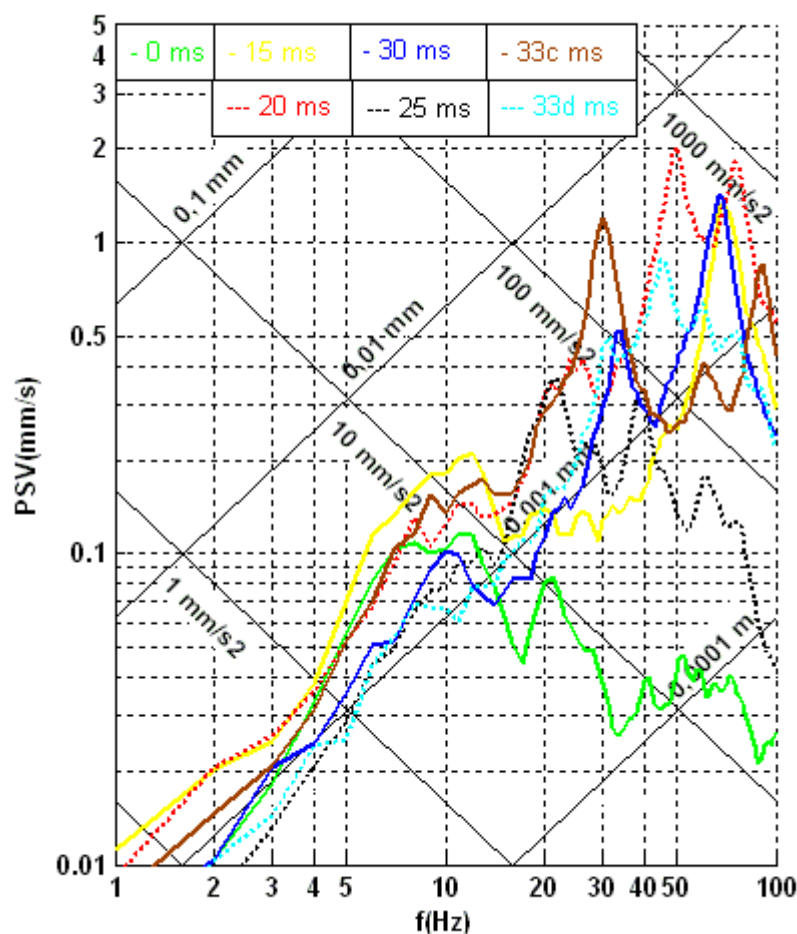
**Rys. 6.56. Zestawienie rozkładu energii w sygnałach drgań wzbudzonych odpalaniem ładunków z opóźnieniem 25 ms systemem nieelektrycznym i elektronicznym**

Z rysunku 6.56 widać, że opóźnienie 25 ms zadane różnym systemem inicjowania ładunków wzbudza drgania o nieco innej strukturze częstotliwościowej. Porównując drgania, zarejestrowane w podłożu w obu przypadkach widoczna jest FWOP – około 40 Hz, jednak dla opóźnienia zadanego systemem nieelektrycznym widać wyraźną dominację częstotliwości charakterystycznej dla podłoża – 11 Hz, a dla systemu elektronicznego 20 Hz. W przypadku drgań na fundamencie obiektu, dla opóźnienia zadanego systemem nieelektrycznym widać, że dominuje częstotliwość około 11 Hz, czyli taka sama jak w podłożu. Poziom rejestrowanych drgań jest praktycznie taki sam, więc nie ma tłumienia, a wręcz przeciwnie w tym zakresie doszło do niewielkiego wzmocnienia drgań. Opóźnienie zadane systemem elektronicznym zaburzyło częstotliwość drgań własną zarówno podłoża jak i fundamentu. Na fundamencie spowodowało obniżenie częstotliwości do 8 Hz. Zmalała też intensywność – drgania uległy tłumieniu.

#### **6.2.4. Spektrum odpowiedzi drgań zarejestrowanych w otoczeniu kopalni wapienia B – opóźnienie zadawane systemem elektronicznym *i-kon***

Podobnie jak w poprzednich omawianych przypadkach, w dalszej części poddano analizie krzywe spektrum odpowiedzi drgań.

Wyniki obliczeń, przedstawiono dla jednej składowej poziomej w formie graficznej na rysunkach 6.57 ÷ 6.60. Rysunki obrazują zmiany kształtu krzywych spektrum odpowiedzi w zależności od zastosowanego opóźnienia. Linia przerywaną, na rysunkach 6.57 i 6.58, zaznaczono spektra odpowiedzi wykonane dla drgań wzbudzonych podczas odpalania ładunków dzielonych, natomiast linią ciągłą odpalanie ładunków ciągłych. Pełną dokumentację wszystkich składowych dla poszczególnych opóźnień zestawiono w formie graficznej w załącznikach VII, VIII, X ÷ XIII (Rys. Z7- 20 ÷ 22, Z8- 20 ÷ 22, Z10- 17 ÷ 19, Z11- 20 ÷ 22, Z12- 20 ÷ 22, Z13- 17 ÷ 19).



Rys. 6.57. Pseudoprędkościowe spektra odpowiedzi drgań podłoża – składowa x

Rysunek 6.57 ilustruje krzywe spektrum odpowiedzi drgań, wyznaczone dla podłoża na stanowisku 1. Z rysunku widać, że zastosowane opóźnienie spowodowało zmianę krzywych *PSV*:

- pojedynczy ładunek (0 ms) – stanowi charakterystykę podłoża i krzywa *PSV* może być traktowana jako wzorcowa, spodziewana maksymalna odpowiedź obiektu na takie wymuszenie wyniosła 0,12 mm/s (maksymalna wartość *PSV*) i wystąpiła dla częstotliwości 12 Hz,
- opóźnienie 15c ms – maksymalna wartość *PSV* wystąpiła dla częstotliwości 67 Hz i wyniosła 1,40 mm/s, w odniesieniu do pojedynczego ładunku, opóźnienie to powoduje największe wzmocnienie w zakresie  $8 \div 12$  Hz,
- opóźnienie 20d ms – pomimo że opóźnienie było zadawane między ładunkami dzielnymi spowodowało osiągnięcie maksymalnej wartości *PSV* ze wszystkich wyznaczonych dla opóźnień i wyniosło 2,00 mm/s dla częstotliwości 50 Hz, a kolejna wartość

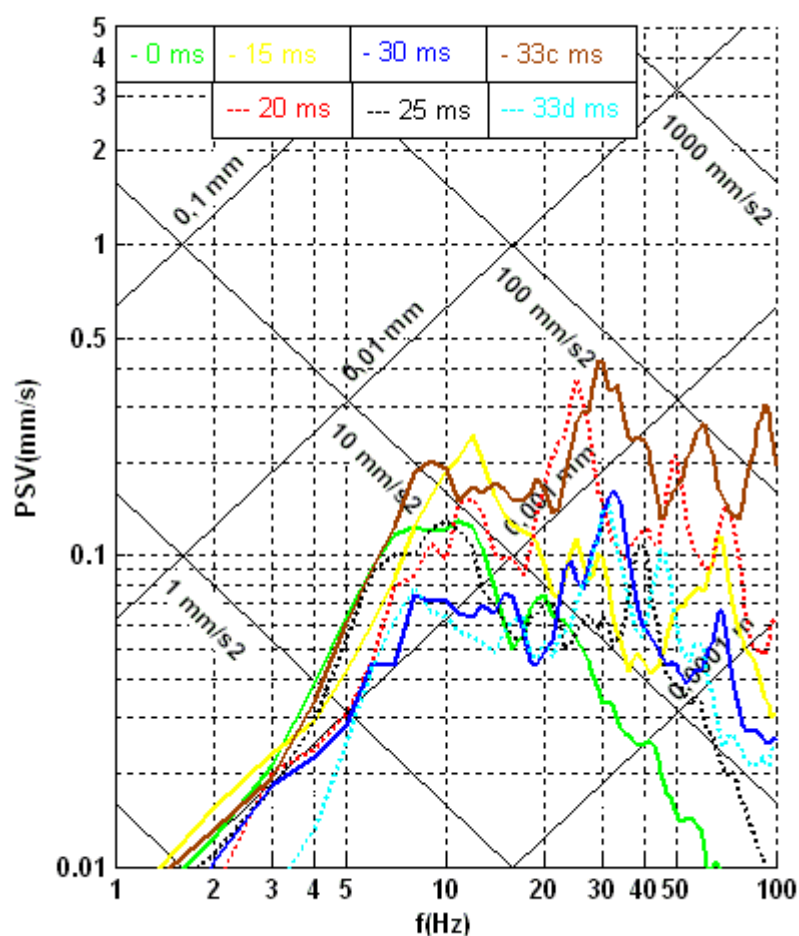
szczytowa, również wyższa od wartości maksymalnych uzyskanych dla pozostałych opóźnień, wynosi 1,80 mm/s dla częstotliwości 75 Hz,

- opóźnienie 25d ms – w porównaniu do wartości uzyskanych od pojedynczego ładunku, spowodowało obniżenie wartości *PSV* w zakresie niższych częstotliwości, a krzywa *PSV* ma najmniejszą wartość maksymalną, która wynosi 0,35 mm/s dla częstotliwości 22 Hz,
- opóźnienie 30c ms – również spowodowało obniżenie wartości *PSV* w zakresie niższych częstotliwości, a wartość maksymalna wystąpiła dla częstotliwości 66 Hz i wyniosła 1,50 mm/s,
- opóźnienie 33c ms – spowodowało powstanie dwóch wyraźnych maksimów o zbliżonych wartościach, jedno o częstotliwości 30 Hz (1,20 mm/s) – FWOP, a drugie dla 90 Hz (0,80 mm/s),
- opóźnienie 33d ms – krzywa *PSV* ma najmniejsze wartości w zakresie częstotliwości niższych, a swoje maksimum osiąga dla częstotliwości 45 Hz – 0,81 mm/s.

Dla wszystkich krzywych *PSV*, uzyskanych dla poszczególnych opóźnień, maksima osiągane są w FWOP, lub w krotności tej częstotliwości.

Rysunek 6.58 ilustruje tę samą składową, tylko na stanowisku zlokalizowanym na fundamencie obiektu (st. B2).

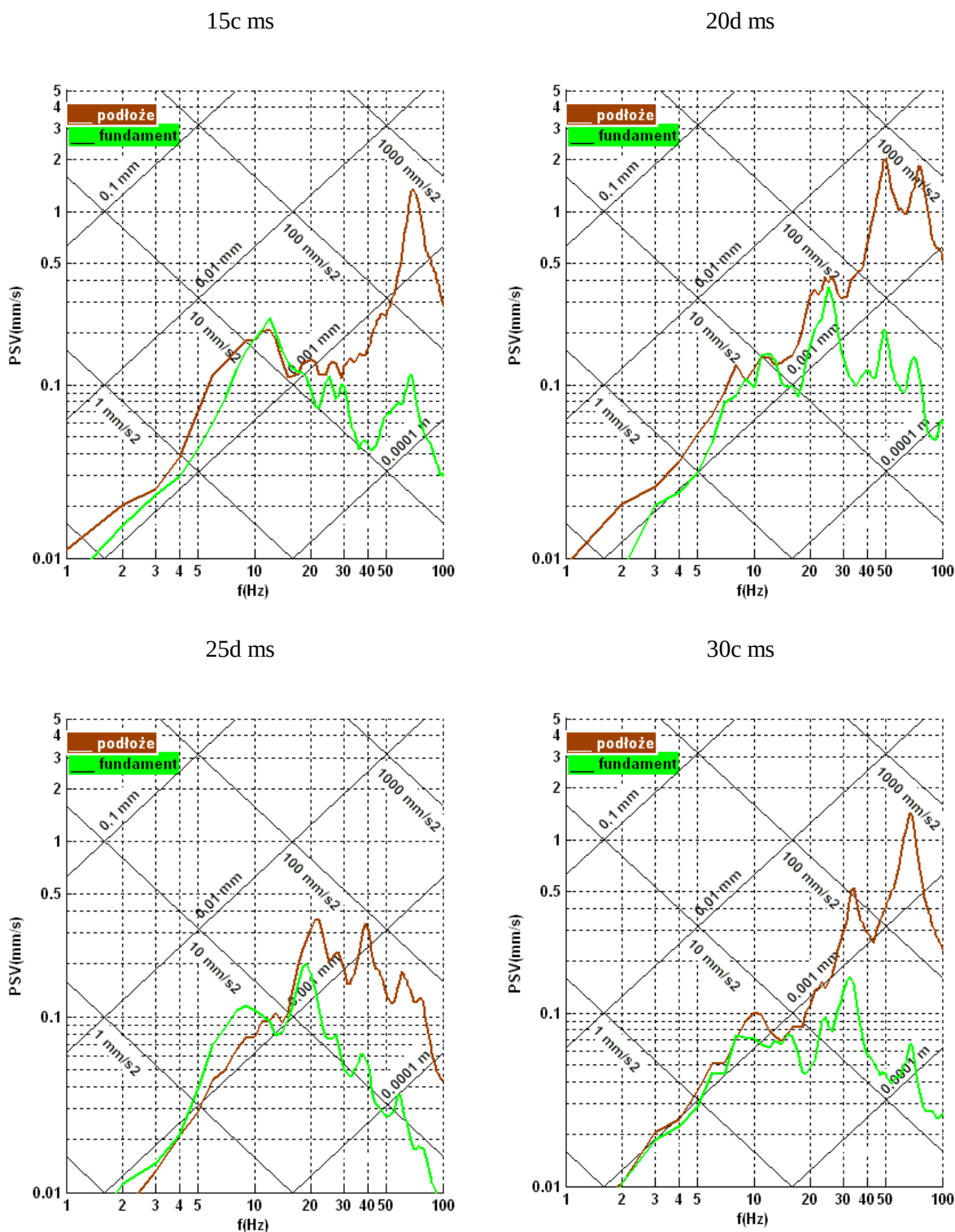




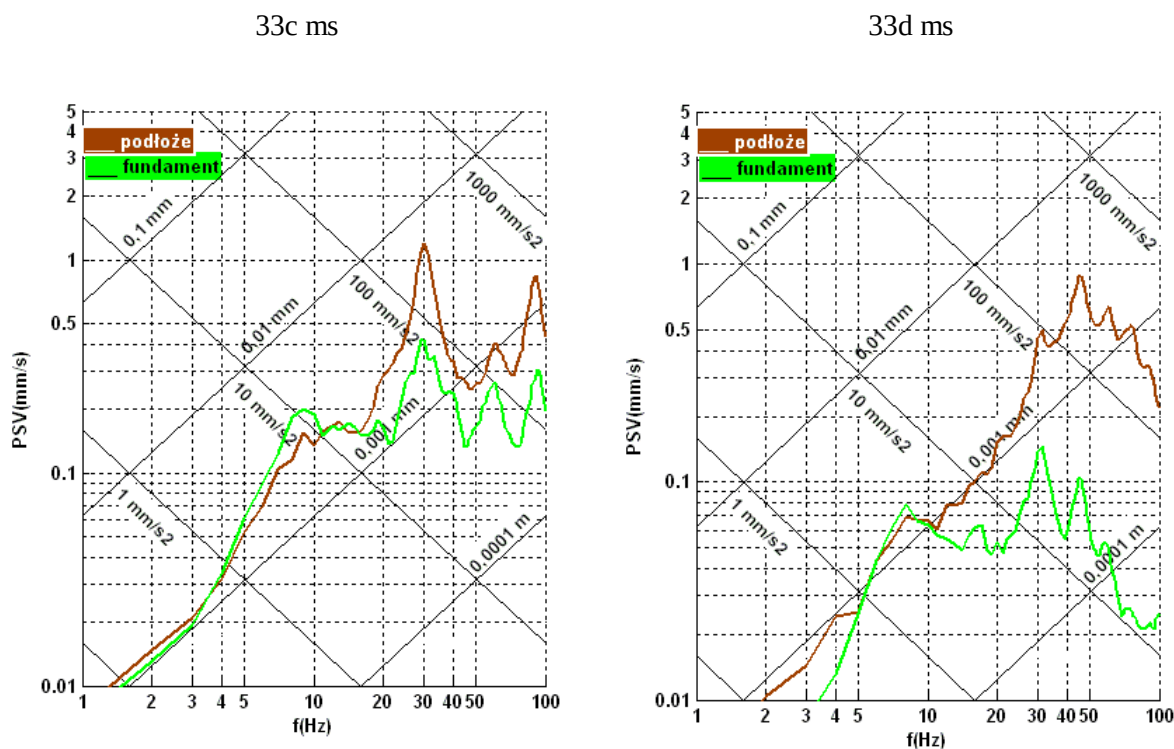
Rys. 6.58. Pseudoprędkościowe spektra odpowiedzi drgań fundamentu – składowa x

Na fundamencie obiektu w dalszym ciągu dominują zdecydowanie wyższe częstotliwości, ale już nie o tak wysokiej intensywności jak w podłożu. Wyraźnie również widać wpływ opóźnienia, maksima dla poszczególnych krzywych *PSV* również znajdują się w FWOP tak jak to było w przypadku krzywych wyznaczonych dla podłoża. Opóźnienie 33d ms spowodowało znaczne obniżenie wartości *PSV* w zakresie niższych częstotliwości, a wartość maksymalna, uzyskana dla częstotliwości 30 Hz, jest porównywalna z wartością maksymalną uzyskaną od pojedynczego ładunku. Największa wartość *PSV* wystąpiła dla opóźnienia 33c ms przy częstotliwości 30 Hz (0,41 mm/s). Bardzo niekorzystna, z punktu widzenia polskiej skali szkodliwości SWD I, krzywa *PSV* wystąpiła dla opóźnienia 20d ms, dla której maksymalna wartość (0,36 mm/s) wystąpiła dla częstotliwości 25 Hz. Bardzo korzystnie, jeśli ponownie wziąć jako punkt odniesienia skale SWD I, prezentuje się krzywa *PSV* dla opóźnienia 25d ms, które uzyskało najmniejszą wartość *PSV* dla częstotliwości 25 Hz, ze wszystkich krzywych wyznaczonych dla opóźnień. Wyniosła ona tyle co wartość uzyskana dla odpalenia pojedynczego ładunku.

W celu lepszego zobrazowania problematyki przejścia drgań z podłoża do fundamentu na rysunkach 6.59 i 6.60 przedstawiono dla poszczególnych opóźnień krzywe *PSV* wykonane dla podłoża i fundamentu.

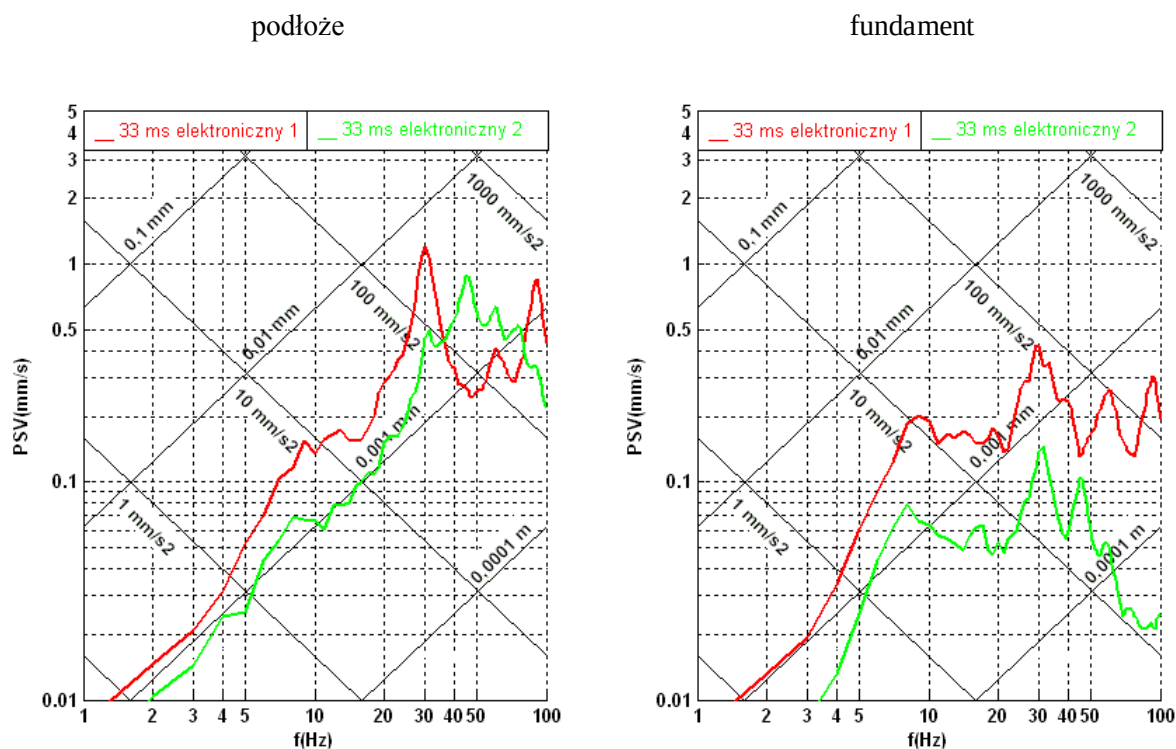


Rys. 6.59. Pseudoprędkościowe spektra odpowiedzi drgań wzbudzanych odpalaniem ładunków z różnym opóźnieniem milisekundowym – porównanie dla podłoża i fundamentu



**Rys. 6.60.** Pseudoprędkościowe spektra odpowiedzi drgań, zarejestrowanych w podłożu i na fundamencie obiektu, wzbudzanych odpalaniem ładunków MW ciągłego i dzielonego z opóźnieniem 33 ms

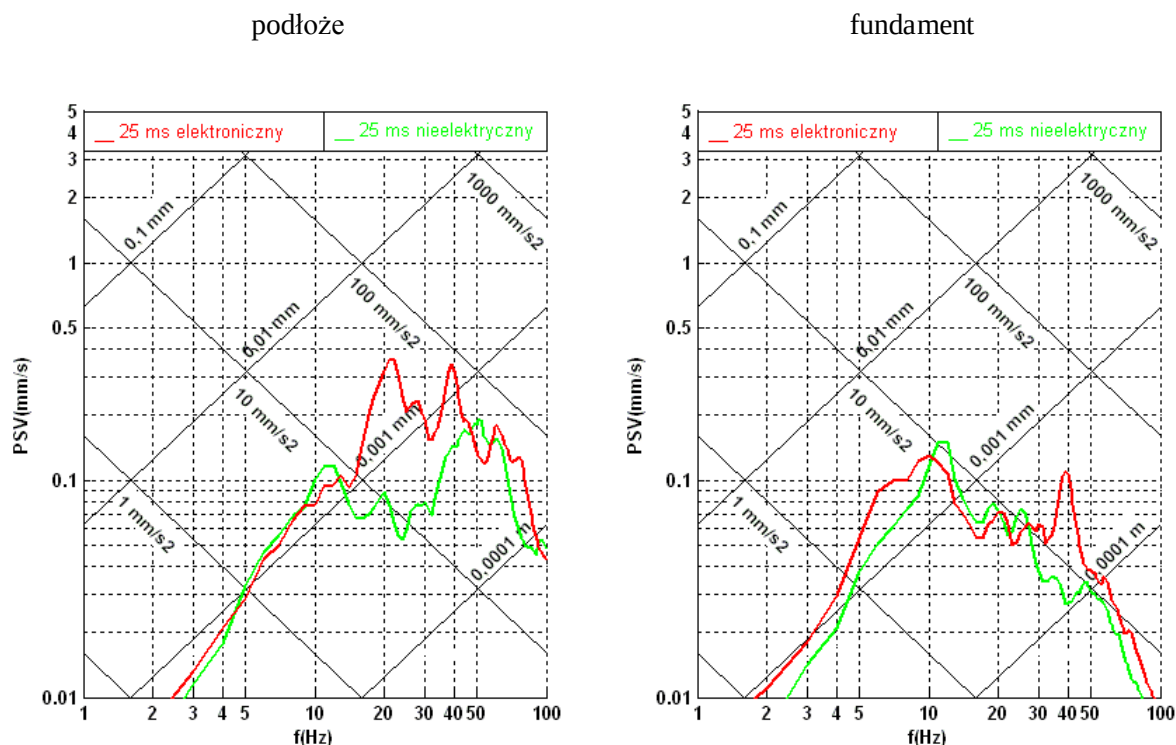
Z rysunków 6.59 i 6.60 wyraźnie widać, że wyższe częstotliwości są tłumione. Niższe częstotliwości, w większości przypadków, pozostają bez zmian, lub występuje niewielkie wzmocnienie tak jak dla opóźnień: 25d i 33c ms. Dla opóźnienia 30c ms wystąpiło tłumienie zarówno wyższych jak i niższych częstotliwości. Zastanawiający jest fakt zmiany krzywej *PSV* dla tego samego opóźnienia, tylko dla zmniejszenia ilości odpalanego ładunku na opóźnienie i zwiększenia ich liczby. W celu lepszego zilustrowania krzywe te zestawiono na rysunku 6.61, gdzie kolorem zielonym oznaczono krzywe *PSV* wykonane dla opóźnienia 33d ms, a czerwonym dla 33c ms.



**Rys. 6.61. Porównanie PSV drgań podłoża i fundamentu przy odpaleniu ładunku MW ciągłego i dzielonego z opóźnieniem 33 ms**

Zmniejszenie ładunku i zwiększenie ich liczby spowodowało nieznaczne obniżenie wartości maksymalnej *PSV* (krzywa koloru zielonego) i zmianę częstotliwości jego wystąpienia w przypadku podłoża (przesunięcie z 30 Hz do 45 Hz). Dla fundamentu nastąpiło znaczne obniżenie wartości maksymalnej, przy zachowaniu tej samej częstotliwości i bardzo zbliżony kształt krzywej w zakresie niższych częstotliwości.

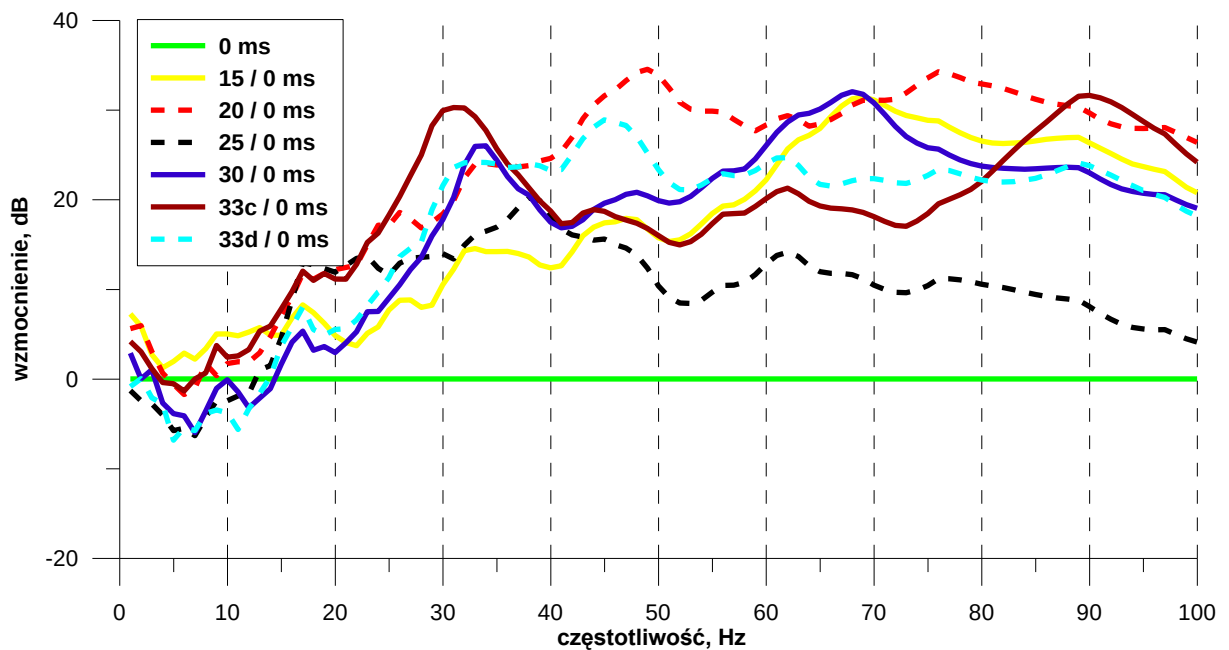
W celu porównania krzywych *PSV* uzyskanych dla tego samego opóźnienia 25 ms, zadanego systemem nieelektrycznym i elektronicznym zestawiono je na rysunku 6.62.



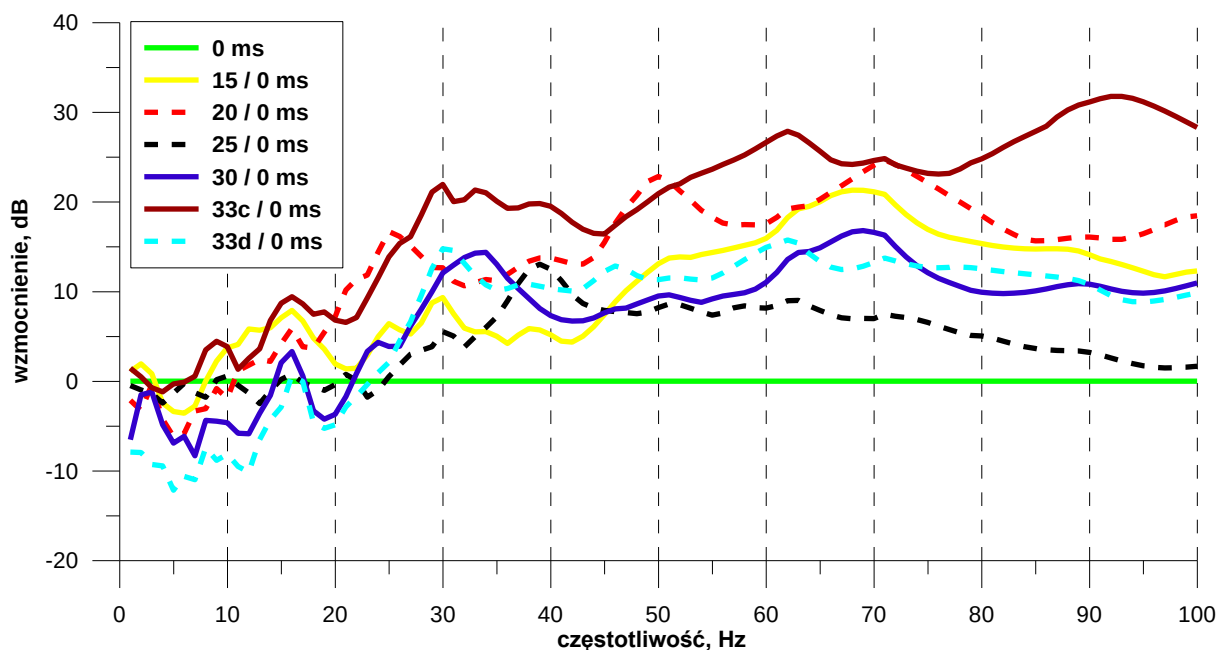
Rys. 6.62. Porównanie PSV drgań podłoża i fundamentu dla opóźnieniem 25 ms zadanego systemem nieelektrycznym i elektronicznym

Krzywa *PSV*, wyznaczona dla drgań podłoża wzbudzonych odpalaniem ładunków z opóźnieniem zadanym systemem elektronicznym, różni się od krzywej *PSV* uzyskanej z drgań zarejestrowanych podczas odpalania ładunków systemem nieelektrycznym. W przypadku tego pierwszego wartość maksymalna jest dla częstotliwości 21 i 40 Hz (praktycznie taka sama wartość – około 0,35 mm/s), a dla drugiego dla częstotliwości 50 Hz (0,20 mm/s). Na fundamencie krzywe już mają bardziej zbliżony kształt, widoczna jest różnica dla częstotliwości 40 Hz, a wartości maksymalne są w przedziale częstotliwości 10 ÷ 12 Hz.

W dalszej kolejności, podobnie jak w poprzednich przypadkach, w celu lepszego zobrazowania problemu stosowania opóźnienia i jego wpływu na krzywe *PSV* wykorzystano współczynnik względnej mocy sygnału (Rys. 6.63 i 6.64).



Rys. 6.63. Względna moc drgań dla sygnału zarejestrowanego w podłożu, poziom odniesienia: odpalenie pojedynczego ładunku MW



Rys. 6.64. Względna moc drgań dla sygnału zarejestrowanego na fundamencie, poziom odniesienia: odpalenie pojedynczego ładunku MW

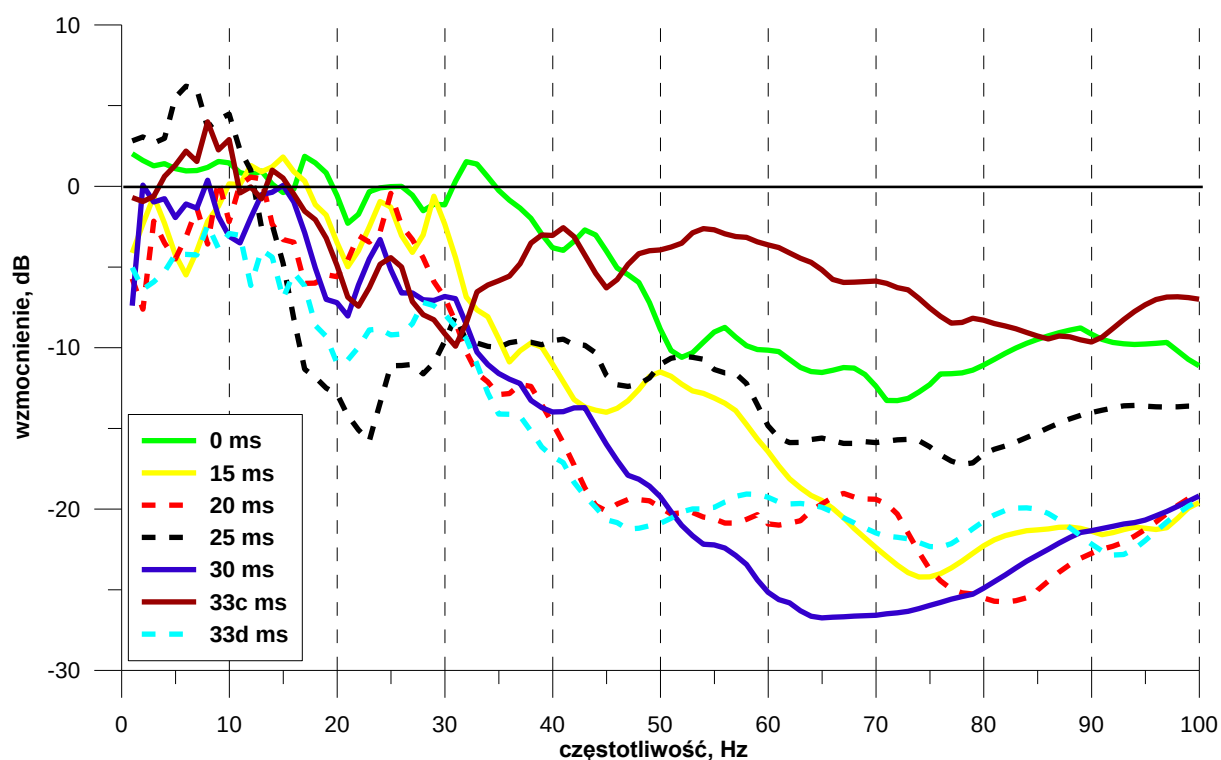
Analizując graficzne wyniki obliczeń można wnioskować, że:

- zastosowane opóźnienia milisekundowe, zadawane systemem elektronicznym, w istotny sposób zmieniają charakterystykę częstotliwościową PSV drgań zarówno w podłożu jaki i na fundamencie obiektu,
- istnieje wyraźny podział zakresów częstotliwości, na które oddziałują poszczególne opóźnienia milisekundowe: opóźnienia 25d ms, 30c ms i 33c ms powodują tłumienie

w zakresie niższych częstotliwości, a pozostałe opóźnienia wzmacnienie drgań w całym zakresie częstotliwości w podłożu, natomiast na fundamencie tylko opóźnienie 33c ms spowodowało wzmacnienie praktycznie w całym zakresie, a pozostałe tylko dla wyższych częstotliwości,

- trudno przyjąć jedną częstotliwość rozdzielającą te dwie strefy dla wszystkich opóźnień,

W kolejnej fazie obliczeń mających na celu określenie mechanizmu przenoszenia się drgań z podłoża do obiektu przeprowadzono, podobnie jak dla drgań rejestrowanych w podłożu, analizę względnej mocy drgań – za poziom odniesienia przyjęto drgania rejestrowane w podłożu (stanowisko B1). Wyniki obliczeń przedstawiono na rysunku 6.65.



Rys. 6.65. Wartości współczynnika tłumienia drgań przy przejściu drgań z podłoża do obiektu w zależności od częstotliwości i zastosowanego opóźnienia milisekundowego

Na rysunku 6.65 można wydzielić dwie grupy opóźnień: pierwsza to opóźnienia: 20d ms, 30c ms i 33d ms, które powodują tłumienie drgań przy przejściu z podłoża do fundamentu obiektu w całym zakresie częstotliwości (z czego największe tłumienie jest dla opóźnienia 33d ms), oraz drugą do której należą pozostałe opóźnienia łącznie z pojedynczym ładunkiem, które powodują wzmacnienie w zakresie niższych częstotliwości i tłumienie w zakresie wyższych. Opóźnienie 15c ms powoduje wzmacnienie tylko w przedziale  $10 \div 16$  Hz, a dla pozostałym jest tłumione.

### 6.3. Podsumowanie

Celem analiz przeprowadzonych w rozdziale 6 było określenie wpływu opóźnienia milisekundowego zastosowanego do odpalania ładunków MW, na spektrum odpowiedzi zbudowanych drgań.

W pierwszym etapie analiz (rozdział 6.1.1, 6.2.1, 6.2.3) dokonano oceny efektu sejsmicznego na podstawie porównania intensywności zarejestrowanych drgań. Przeprowadzone, jedną z najnowszych metod analizy sygnałów – MP, obliczenia pozwoliły na wskazanie opóźnienia, które powoduje wzbudzenie drgań o najmniejszej intensywności. Metoda ta jednocześnie łączy w sobie możliwość poznawania struktury rejestrowanych drgań, (częstotliwości) z ich intensywnością, wyrażoną przy pomocy energii zarejestrowanego sygnału oraz lokalizację tych częstotliwości w czasie. Umożliwia rozkład sygnału na elementy składowe, dając informacje o czasie wystąpienia częstotliwości, przypisanej jej amplitudzie i czasie trwania tego impulsu – wynik w postaci mapy przestrzennej. Metoda ta okazała się bardzo skuteczna w analizowaniu sygnałów parasejsmicznych pochodzących od robót strzałowych i wykazała, że:

1. Zastosowane, do odpalania serii ładunków MW w długich otworów, opóźnienie milisekundowe powoduje zmianę struktury częstotliwościowej drgań, mierzonych zarówno w podłożu jak i na fundamencie obiektu.
2. Zmiana struktury częstotliwościowej drgań wywoływana tym samym opóźnieniem w różnych warunkach geologiczno – górniczych jest zmienna.
3. W przypadku kopalni gipsu A, opóźnienia: 17 ms, 25 ms, 42 ms i 67 ms w różny sposób wpływają na zmianę charakterystyki drgań. Można zauważyć, że opóźnienie 17 ms przesuwa dominujące częstotliwości w kierunku niższych częstotliwości, a opóźnienie 67 ms w kierunku wyższych. Opóźnienia 25 ms i 42 ms posiadają swoje lokalne wzmocnienia, ale nie powodują zdecydowanych przesunięć dominujących częstotliwości.
4. W przypadku kopalni wapienia B, opóźnienia zadawane systemem nieelektrycznym, podobnie jak w przypadku kopalni gipsu A, w różny sposób wpływają na strukturę częstotliwościową drgań. Zapis drgań, od opóźnienia 25 ms, jest bardzo zbliżony pod względem częstotliwościowym do pojedynczego ładunku, ale powoduje ono, podobnie jak opóźnienie 42 ms, występowanie w sygnale wyższych częstotliwości.



5. Opóźnienia zadawane systemem nieelektrycznym, zarówno w kopalni gipsu A jak i kopalni wapienia B, wprowadzają do struktury częstotliwościowej drgań FWOP. Jest to bardziej widoczne w podłożu, w mniejszym stopniu na fundamencie obiektu.
6. Opóźnienie zadawane systemem elektronicznym, w wyraźniejszy sposób, niż systemem nieelektrycznym, wpływa na modyfikację struktury częstotliwościowej sygnału uzyskanego z odpalania pojedynczego ładunku MW. Wpływ ten jest widoczny zarówno w podłożu jak i na fundamencie obiektu.
7. Częstotliwości dominujące w sygnale są ściśle związane z zastosowanym opóźnieniem – FWOP.

W drugim etapie analizy (rozdział 6.1.2, 6.2.2, 6.2.4) dokonano oceny wpływu odpalania serii ładunków MW z różnymi opóźnieniami milisekundowymi na spektrum odpowiedzi drgań.

Przeprowadzone analizy wykazały, że:

1. Punktem odniesienia do badań zmienności spektrum odpowiedzi drgań, wzbudzanych odpalaniem serii ładunków MW w długich otworach, jest spektrum odpowiedzi drgań wzbudzanych odpaleniem pojedynczego ładunku MW (efekt pojedynczego otworu). Porównanie spektrum odpowiedzi serii ładunków MW odpalanych z opóźnieniem milisekundowym, ze spektrum odpowiedzi pojedynczego ładunku MW, pozwala uzyskać informację o zmianach w których zakresach częstotliwości można spodziewać się wzmocnienia lub tłumienia drgań.
2. Opóźnienia milisekundowe mają istotny wpływ na kształtowanie pseudoprędkościowego spektrum odpowiedzi drgań, zarówno podłoża jak i fundamentu obiektu, który jest na tym podłożu posadowiony. Zastosowane opóźnienie milisekundowe może spowodować wystąpienie drgań o częstotliwościach zbliżonych do częstotliwości własnych (rezonansowych) obiektu i wtedy nie można już mówić o tłumieniu, ale o wzmocnieniu drgań. Bardzo dobrymi przykładami są odpalenie pojedynczego ładunku w kopalni wapienia B, gdzie częstotliwość własna drgań podłoża jest zbliżona do częstotliwości własnej drgań obiektu, oraz opóźnienie 17 ms w kopalni gipsu A, które spowodowało przesunięcie dominujących częstotliwości w zakres niższych wartości, a w konsekwencji wzrost drgań fundamentu obiektu w porównaniu do drgań podłoża.
3. Spektrum odpowiedzi drgań wykonywane na tym samym profilu badawczym, ale na różnych stanowiskach w kopalni gipsu A, zmienia swój poziom (maleje wraz z odległością). Jednocześnie w dalszym ciągu widoczny jest wpływ opóźnienia na kształt krzywej spektrum odpowiedzi, najsilniej dla opóźnienia 67 ms.

4. W przypadku kopalni wapienia B, spektrum odpowiedzi wyznaczone na podstawie zarejestrowanych drgań fundamentu obiektu, dla różnych opóźnień zadanych systemem nieelektrycznym, w niewielkim stopniu wpłynęło na kształt krzywej spektrum odpowiedzi drgań.
5. Niezależnie od charakterystyki drgań, opóźnienia wpływają również na stopień tłumienia drgań między podłożem a obiektem, co również potwierdzono wykonując spektra odpowiedzi dla fundamentu.

Jako podsumowanie przeprowadzonych w rozdziale 6 analiz czasowo – częstotliwościowych i spektrum odpowiedzi drgań wzbudzanych odpalaniem serii długich otworów, należy stwierdzić, że opóźnienia milisekundowe mają wpływ na:

- a. spektrum odpowiedzi drgań rejestrowanych w podłożu w otoczeniu wykonywanych robót strzałowych,
- b. spektrum odpowiedzi drgań mierzonych na fundamentach obiektów chronionych,
- c. stopień tłumienia drgań przenoszonych z podłoża do fundamentów obiektów.

**Konkluzja powyższa w pełni potwierdza tezę postawioną na początku niniejszej pracy**

## 7. Modelowanie numeryczne oddziaływań dynamicznych w górotworze

Analizę oddziaływań dynamicznych wywołanych robotami strzałowymi na masyw skalny i obiekt budowlany w otoczeniu kopalń można przeprowadzać dwoma sposobami: z wykorzystaniem podejścia pseudostatycznego (PS) i w pełni dynamicznego (Cała 2007, Cała *at al.* 2007, Rosengren *at al.* 2003).

### 7.1. Podejście pseudostatyczne

Pionierska praca na temat czynnego i biernego bocznego parcia gruntu wywołanego trzęsieniem ziemi zostały opublikowane przez Okabe oraz Mononobe i Matsuo. To pseudostatyczne podejście, oparte na klasycznej analizie Coulomba dla warunków statycznych, jest znane jako metoda Mononobe-Okabe.

Podejście pseudostatyczne jest wciąż najczęściej stosowaną procedurą w analizie stateczności skarp poddanych wpływom dynamicznym (Augustyńska i Dulińska 2010, Gui i Chiu 2009, Hoek 2007). Podejście to jest uogólnioną wersją analizy metodami równowagi granicznej (*ang. Limit Equilibrium Methods*), w którym wpływy sejsmiczne są uwzględniane poprzez ekwiwalentną siłę statyczną, której wielkość jest iloczynem współczynnika sejsmicznego  $k$  oraz potencjalnego ciężaru mas zsuwających  $W$ . Podejście pseudostatyczne, w analizie stateczności skarp, zostało wprowadzone po raz pierwszy przez Terzaghiego. Metoda ta ignoruje cykliczną naturę wstrząsu i traktuje je jako dodatkową siłę statyczną działającą na skarpe. W szczególności, podejście pseudostatyczne, polega na przyłożeniu siły poziomej działającej na środek masy bryły osuwiskowej, w kierunku od skarpy. Pseudostatyczna siła pozioma obliczana jest ze wzoru:

$$F_h = ma = \frac{Wa}{g} = \frac{Wa_{max}}{g} = k_h W \quad (7.1)$$

gdzie:

$F_h$  – pozioma siła pseudostatyczna działająca przez środek geometryczny bryły osuwiskowej w kierunku od skarpy, kN,

$m$  – całkowita masa bryły osuwiskowej, kg,

$a$  – przyspieszenie, m/s<sup>2</sup>,

- $a_{max}$  – maksymalne przyspieszenie poziome wywołane trzęsieniem ziemi,  $m/s^2$ ,  
 $k_h$  – współczynnik sejsmiczny (współczynnik pseudostatyczny).

## 7.2. Podejście dynamiczne

Modelowanie zjawisk dynamicznych z wykorzystaniem podejścia pseudostatycznego, a także analiza wyników takich obliczeń jest stosunkowo prosta. Jednak nie umożliwia ono symulowania nieustalonego dynamicznego wpływu robót strzałowych, ponieważ zakłada działanie stałego pseudostatycznego przyspieszenia działającego w określonym kierunku. By przeprowadzić rzeczywistą analizę dynamiczną masywu skalnego, wprowadzono obciążenie dynamiczne w postaci impulsu ciśnienia o przebiegu symulującym oddziaływanie odpalania ładunków MW w wielu otworach z określonymi opóźnieniami. Taka dynamiczna analiza masywu skalnego i obiektu przeprowadzona została z wykorzystaniem programu metody różnic skończonych FLAC (Manual Flac3D 2009).

Obliczenia bazują na algorytmie przyrostów czasowych *explicite* rozwiązującym pełne równania ruchu, w których wykorzystana jest masa skupiona w węzłach siatki określona na podstawie rzeczywistej gęstości otaczających elementów (inaczej niż w obliczeniach statycznych, gdzie wykorzystywana jest fikcyjna masa skupiona).

Przeprowadzenie pełnej analizy dynamicznej w programie FLAC wymaga rozważenia trzech ważnych aspektów:

1. obciążenie dynamiczne i warunki brzegowe,
2. tłumienie mechaniczne,
3. propagacja fal przez model.

Obszar poddany wewnętrznym i/lub zewnętrznym obciążeniom dynamicznym modelowany jest przez zadanie dynamicznego sygnału wejściowego na granice modelu lub wewnętrzne węzły siatki. Odbicie fali na granicach modelu zostaje zminimalizowane przez określenie warunków brzegowych jako: *quiet boundary* (lepkościowe), *free-field* (swobodne) lub *3D radiation-damping* (przestrzennego tłumienia radiacyjnego). Obciążenie dynamiczne może być zadane w postaci historii przyspieszenia, historii prędkości, historii naprężenia (ciśnienia) oraz historii obciążenia siłą.

Program FLAC wykorzystuje algorytm dynamiczny do rozwiązywania problemów mechanicznych dwóch głównych klas: quasi-statycznych i dynamicznych. W obu przypadkach stosowane jest tłumienie. W programach analizy w dziedzinie czasu, rozproszenie Rayleigha jest powszechnie wykorzystywane jako zapewniające tłumienie w przybliżeniu niez-

leżne od częstotliwości powyżej określonego zakresu częstotliwości. Ewentualnie, w analizie dynamicznej, może zostać zastosowane tłumienie lokalne (wykorzystywane w programie do rozwiązywania problemów statycznych), ale ze współczynnikiem tłumienia właściwym dla propagujących fal.

Bliższa charakterystyka wymienionych wyżej aspektów analizy dynamicznej w programie FLAC, a wykorzystanych w obliczeniach dla analizowanego problemu, opisana została w punktach 7.2.1 ÷ 7.2.3

Obliczenia dynamicznego obciążenia górotworu prowadzi się dwuetapowo. W pierwszym etapie rozwiązywane jest zagadnienie statyczne dla przyjętych warunków początkowych i brzegowych (wynikających np. działania sił grawitacyjnych). Obliczony w efekcie stan naprężeń i odkształceń staje się stanem wyjściowym do symulacji dynamicznej.

### **7.2.1. Obciążenia dynamiczne i warunki brzegowe**

W analizach dynamicznych, w tym modelujących wpływ robót strzałowych na otoczenie, często stosowaną formułą zadawania obciążenia jest przyłożenie na jedną z granic modelu przyspieszenia o określonym przebiegu. Przebieg ten uzyskiwany jest z przekształcenia i filtracji pomierzonych przebiegów na powierzchni terenu. Jednak rejestrowane na powierzchni przebiegi nie są drganiami zwięzłego podłoża, w którym propagują się fale materialne, dlatego nie mogą być bezpośrednio w takim modelu wykorzystane. W celu uzyskania danych o właściwym wymuszeniu kinematycznym propagującym w podłożu konieczna jest np. analiza rozplotowa (*ang. deconvolution analysis*). Z kolei filtracja, polega na wyznaczeniu widma częstotliwości FFT i funkcji widmowej gęstości mocy PSD, których analiza pozwala na wyznaczenie częstotliwości odcięcia, co z kolei daje możliwość usunięcia szumów i rejestrów o wysokich częstotliwościach.

W przypadku dużych modeli, w których źródło wymuszenia kinematycznego jest stosunkowo niewielkie, a zasięg jego wpływu ograniczony, podejściem bardziej zbliżonym do sytuacji rzeczywistej jest zdefiniowanie lokalnego źródła obciążenia dynamicznego w postaci naprężenia, przyspieszenia lub obciążenia siłą skupioną.

W niniejszej pracy, wpływ odpalania ładunków MW na masyw skalny i obiekt symulowany był przez przyłożenie na ścianki zamodelowanego otworu strzałowego równomiernie rozłożonego ciśnienia, którego wartość momentalnie wrasta do maksymalnej, impuls trwa 5 ms, a potem maleje do zera. Cykl ten powtarzany jest w chwilach czasowych odpowiadają-

cych odpalaniu kolejnych otworów strzałowych w danej serii, tzn. z uwzględnieniem opóźnienia podanego na schematach odpalania.

Jak wspomniano, ze względu na dynamiczny charakter obciążeń, typowe dla obliczeń numerycznych w zagadnieniach geomechanicznych przemieszczeniowe warunki brzegowe – w postaci utwierdzenia w jednym lub kilku kierunkach – nie mogą być zastosowane, ponieważ nie zapewniają odpowiedniego rozproszenia energii. Oczywiście, powiększenie modelu jest pewnym rozwiązaniem, gdyż tłumienie w materiale zaabsorbuje większość energii, jednak takie rozwiązanie może prowadzić do nieracjonalnego wzrostu czasu obliczeń.

Alternatywą jest zastosowanie *quiet boundaries*, których założenia sformułowane zostały przez Lysmera i Kuhlmeyera (Cała 2007). Ich podstawą jest wykorzystanie tłumików w kierunku normalnym i stycznym na granicach modelu. Wprowadzają one warunki lepkościowe, które są obliczane i przykładane na węzłach granicznych siatki modelu w każdym kroku obliczeniowym. Zastosowanie tej formuły daje najlepsze rezultaty, gdy źródło obciążenia dynamicznego przyłożone jest we wnętrzu modelu, a nie na jego zewnętrznych granicach. Zatem w obliczeniach dynamicznych, wykonanych dla potrzeb pracy, warunki brzegowe zostały określone właśnie jako *quiet boundaries*.

*Quiet boundary* na dolnej granicy modelu symuluje sytuację rzeczywistą, w której grunt jest półpowierzchnią. Dzięki tej własności, granica modelu może absorbować przyrosty naprężeń powodowane obciążeniem dynamicznym, które inaczej mogłyby odbijać się od granic modelu i interferując z pierwotnymi falami – zakłócić wyniki obliczeń.

Właściwa absorpcja fal na bocznych granicach modelu zapewniona jest z kolei przez wprowadzenie „swobodnego ruchu”. Technika ta została opisana przez Cundalla (Cała 2007). Siatka bocznej granicy obwiedni modelu jest sprzężona z siatką swobodną przez tłumiki lepkościowe – symulując *quiet boundaries*, a niezrównoważone siły z siatki swobodnej są przykładane do siatki głównej modelu. W taki sposób fale, poruszające się wertykalnie wzdłuż granic, nie zostają zaburzone na granicach modelu. Dzięki siatce swobodnej, warunki panujące w modelu o ograniczonych wymiarach, są identyczne jak w modelu o wymiarach nieskończonych.

Model granicy swobodnej składa się z kolumny jednostkowej szerokości, pozorującej ośrodek rozszerzony. Jej wysokość równa jest długości granicy bocznej modelu i jest ona dyskretyzowana w taki sposób, by odpowiadać dyskretyzacji granicy właściwej modelu. W elementach tej kolumny założono stan jednorodnego odkształcenia i naprężenia.

### 7.2.2. Tłumienie mechaniczne

Tłumienie Rayleigha wykorzystywane było pierwotnie w analizach konstrukcji i ciągłych ośrodków sprężystych. Równania wyrażone są w postaci macierzowej, której komponentami są macierz sztywności i macierz masy. W programie FLAC rozproszenie Rayleigha opisywane jest dwoma parametrami:

1.  $\xi_{min}$  – współczynnik tłumienia

Analizy dynamiczne próbują między innymi wytworzyć niezależne od częstotliwości rozproszenia drgań na właściwym poziomie. Dla materiałów geologicznych współczynnik tłumienia wynosi w większości 2÷5% (Cała *at al.* 2011). Ponadto, w analizach wykorzystujących plastyczne modele konstytutywne, znacząca dyssypacja energii występuje podczas plastycznego płynięcia. Zatem, w wielu analizach dynamicznych, zwłaszcza gdy występują znaczne odkształcenia, wystarczy minimalny współczynnik tłumienia (nawet 0.5%), by otrzymać realistyczne wyniki.

2.  $f_{min}$  – częstotliwość centralna, Hz

Rozproszenie Rayleigha w ogólnym przypadku jest zależne od częstotliwości, ale istnieje zakres, w którym brak tej zależności. Pokrywa on około 1/3 spektrum częstotliwości, tzn. jeżeli najwyższa częstotliwość dominująca jest trzykrotnie większa niż najmniejsza częstotliwość dominująca, to ten zakres pokryje większość energii dynamicznej w spektrum. Należy tak dostosować częstotliwość centralną  $f_{min}$  tłumienia

Rayleigha, by wraz z jej trzykrotnością, była zbieżna z zakresem dominujących częstotliwości analizowanego problemu. Dla wielu zagadnień częstotliwość ta będzie odpowiadała częstotliwości drgań własnych ośrodka.

Powszechnie w zagadnieniach geomechanicznych stosowane jest tłumienie proporcjonalne zarówno do sztywności jak i masy.

### 7.2.3. Propagacja fal przez model

Zapewnienie właściwej propagacji fali naprężeń dynamicznych przez model nakłada granicę maksymalnej dyskretyzacji (tj. maksymalnego rozmiaru elementu), która może być użyta podczas budowy modelu. Nie jest to aspekt ważny wyłącznie dla programu FLAC – jest to ograniczenie powszechne w analizach numerycznych wykorzystujących dyskretyzację ośrodków. Zatem, pomimo że efekt dynamiczny rozważany jest dopiero w drugim etapie obliczeń, musi być rozważony już w czasie wstępnego konstruowania modelu, kiedy określana

jest przestrzenna dyskretyzacja modelu. Kuhlmeier i Lysmer (1973) wykazali, że dla uzyskania właściwej propagacji fal w modelu, wymiar elementu  $\Delta l$  musi być mniejszy niż  $1/8 - 1/10$  długości fali wejściowej. Oznacza to, że dla uniknięcia numerycznej dyspersji fali, maksymalny wymiar elementu  $\Delta l$  powinien spełniać warunek:

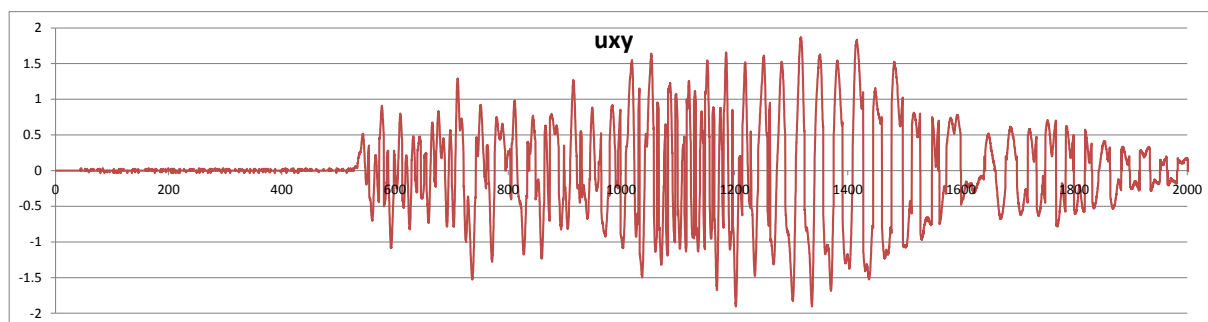
$$\Delta l \leq \frac{C}{10 f^{max}} \quad (7.2)$$

gdzie:

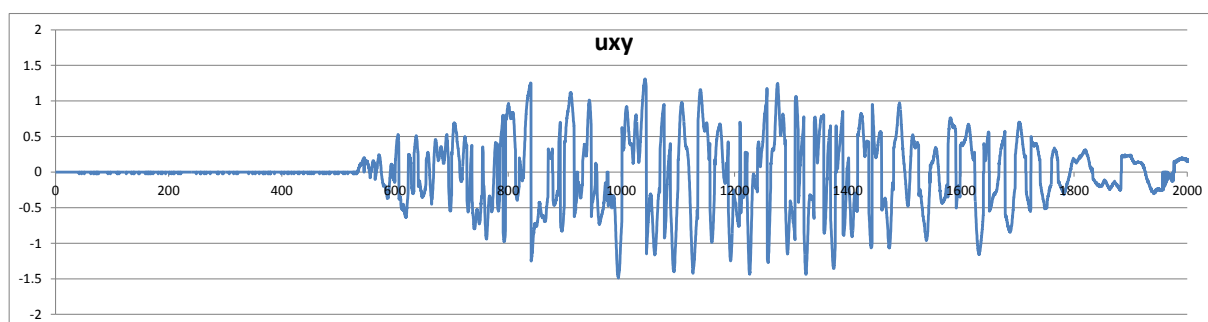
- $C$  – prędkość propagacji fali w danym ośrodku (fale sejsmiczne typu S i P),
- $f^{max}$  – najwyższa częstotliwość fali.

### 7.3. Analiza wyników obliczeń dynamicznych

Obliczeniom poddano jeden przekrój skarpy, poprowadzony wzdłuż linii pomiarowej w kierunku obiektu na którym prowadzone były pomiary. Analizie dynamicznej poddano jedną serię strzelania, w której zastosowano opóźnienie 33c ms. Maksymalna prędkość składowej poziomej drgań w podłożu wyniosła 1,904 mm/s, natomiast na fundamencie 1,488 mm/s. Przebiegi niniejszych prędkości przedstawiono na rysunkach 7.1 i 7.2



Rys. 7.1. Przebieg składowej poziomej prędkości drgań w podłożu

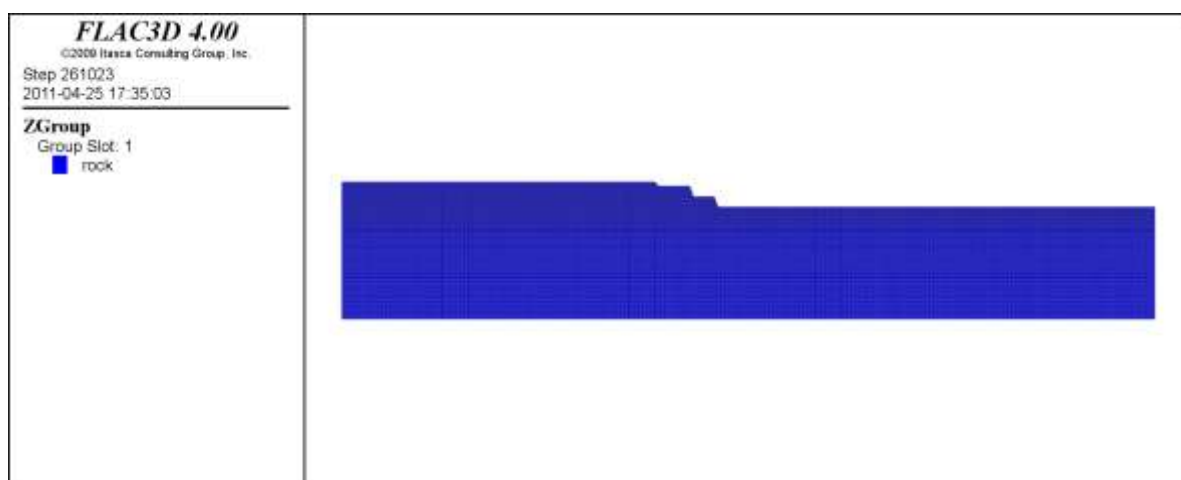


Rys. 7.2. Przebieg składowej poziomej prędkości drgań na fundamencie



Obliczenia miały na celu kalibrację modelu numerycznego wpływu rzeczywistego oddziaływania dynamicznego na masyw skalny, w rejonie prowadzenia robót strzałowych, tak by monitorowane przebiegi drgań w modelu były zbliżone do uzyskanych w trakcie pomiarów w terenie. Uzyskane wyniki pozwoliły śledzić przebieg zmian zachodzących w masywie skalnym pod wpływem oddziaływania sejsmicznego od detonacji materiałów wybuchowych. Geometrię modelu numerycznego zbudowano na bazie map sytuacyjno – wysokościowych i wizji lokalnej, ponieważ w miejscu wykonywania pomiarów nie można było określić budowy geologicznej.

W celu wykonania analizy zbudowano model numeryczny w programie FLAC3D v.4.00 o wymiarach 1560 m x 263 m (Rys. 7.3), będącym przybliżonym jednostkowym wycinkiem masywu skalnego w przekroju na linii od otworów strzałowych do budynku. Liczba stref wynosiła 43269. Model ten utwierdzono w kierunkach prostopadłych do płaszczyzn bocznych i dolnej. Parametry masywu skalnego przedstawiono w tabeli 7.1. Następnie model ten rozwiązano, uzyskując pierwotny stan naprężenia (Rys. 7.4), oraz wyzerowano wartości przemieszczeń.

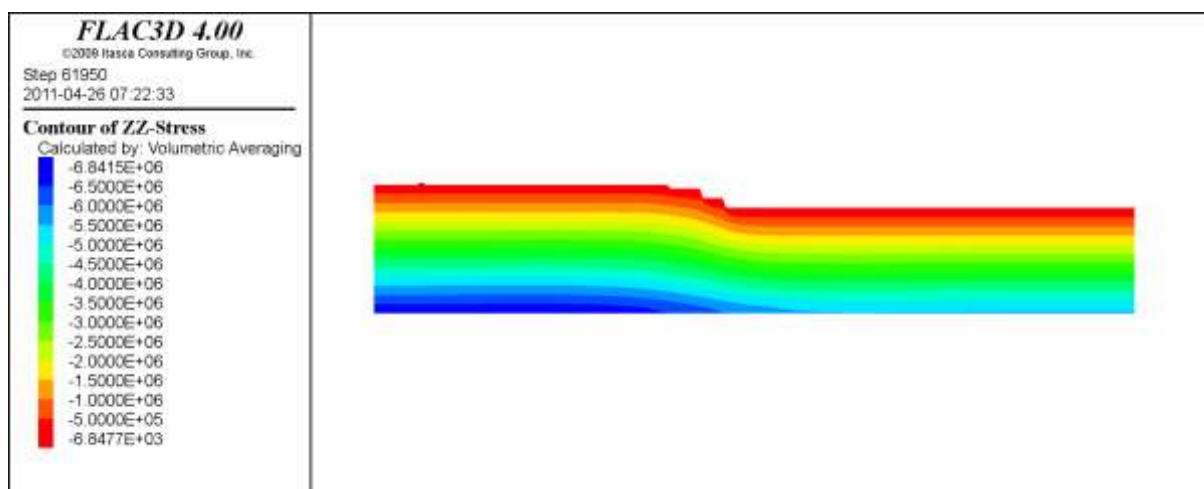


Rys. 7.3. Dyskretyzacja modelu numerycznego

Tabela 7.1. Parametry mechaniczne masywu skalnego

| Parametr                                 | Wartość |
|------------------------------------------|---------|
| Gęstość objętościowa [ $\text{kg/m}^3$ ] | 2700    |
| Moduł Younga [MPa]                       | 5600    |
| Współczynnik Poissona [-]                | 0.25    |
| Kohezja [kPa]                            | 1000    |

|                                   |     |
|-----------------------------------|-----|
| Kąt tarcia wewnętrznego [°]       | 40  |
| Wytrzymałość na rozciąganie [kPa] | 500 |



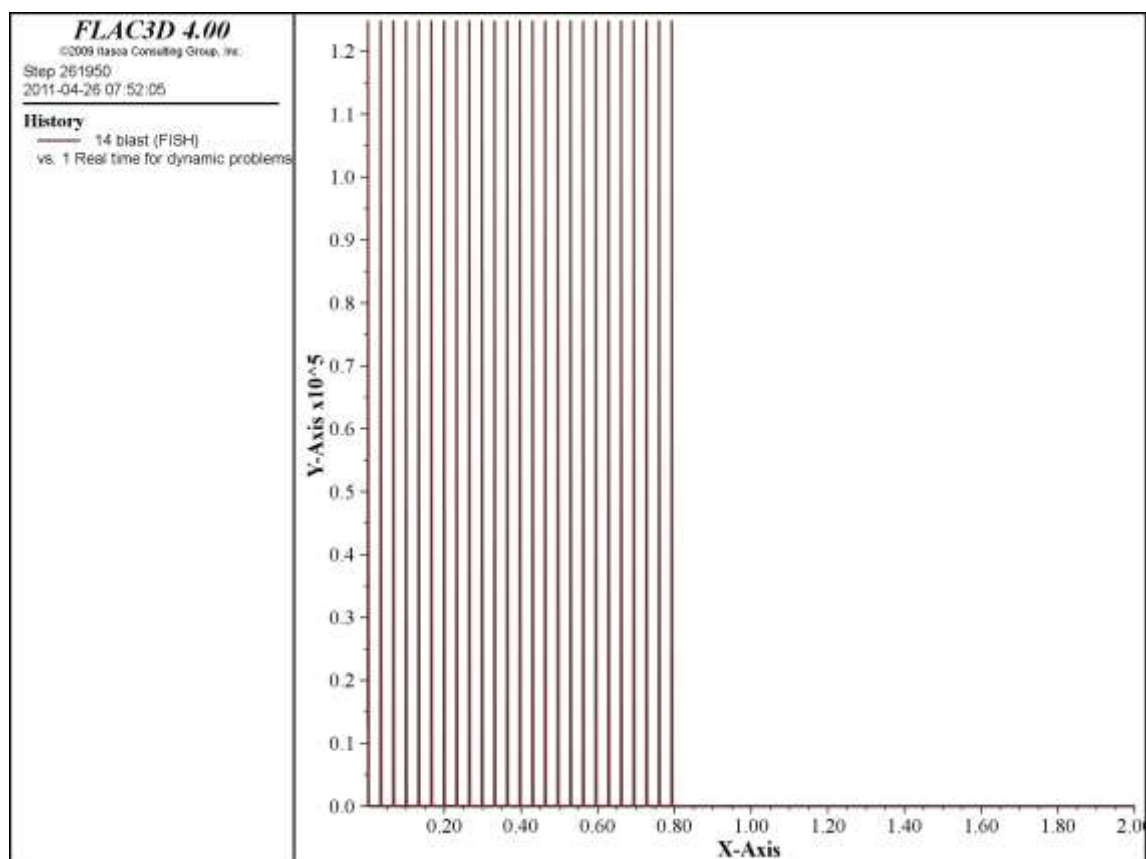
Rys. 7.4. Mapa pionowych naprężeń pierwotnych w górotworze

W kolejnym kroku zmieniono utwierdzenia z blokady przemieszczeń na *quiet boundary*, których założenia sformułowane zostały przez Lysmera i Kuhlmeiera (1969). Ich podstawą jest wykorzystanie tłumików w kierunku normalnym i stycznym na granicach modelu. Wprowadzają one warunki lepkościowe, które są obliczane i przykładane na węzłach granicznych siatki modelu w każdym kroku obliczeniowym. Zastosowanie tej formuły daje najlepsze rezultaty, gdy źródło obciążenia dynamicznego przyłożone jest we wnętrzu modelu, a nie na jego zewnętrznych granicach. *Quiet boundary* na granicy modelu symuluje sytuację rzeczywistą, w której grunt jest półpowierzchnią. Dzięki tej własności, granica modelu może absorbować przyrosty naprężeń powodowane obciążeniem dynamicznym, które inaczej mogłyby odbijać się od granic modelu i interferując z pierwotnymi falami – zakłócić wyniki obliczeń.

W analizowanym zagadnieniu zastosowano tłumienie Rayleigha o współczynnikach:

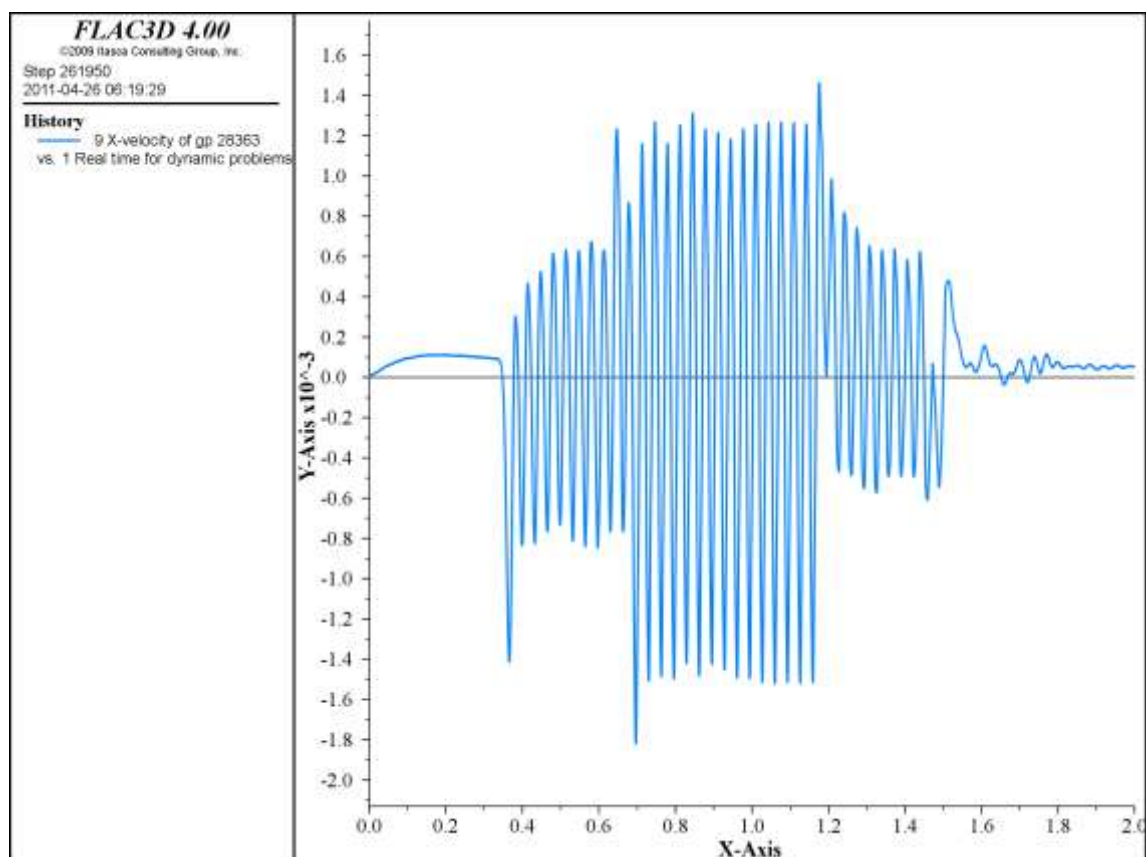
- Częstotliwość centralna – 30 Hz,
- Współczynnik tłumienia – 2%.

Na rys. 7.5 przedstawiono schemat odpalania ładunków. Obciążenie w analizie było przykładane w postaci ciśnienia, do środkowej skarpy w modelu, odpowiednio dla podłoża i fundamentu.

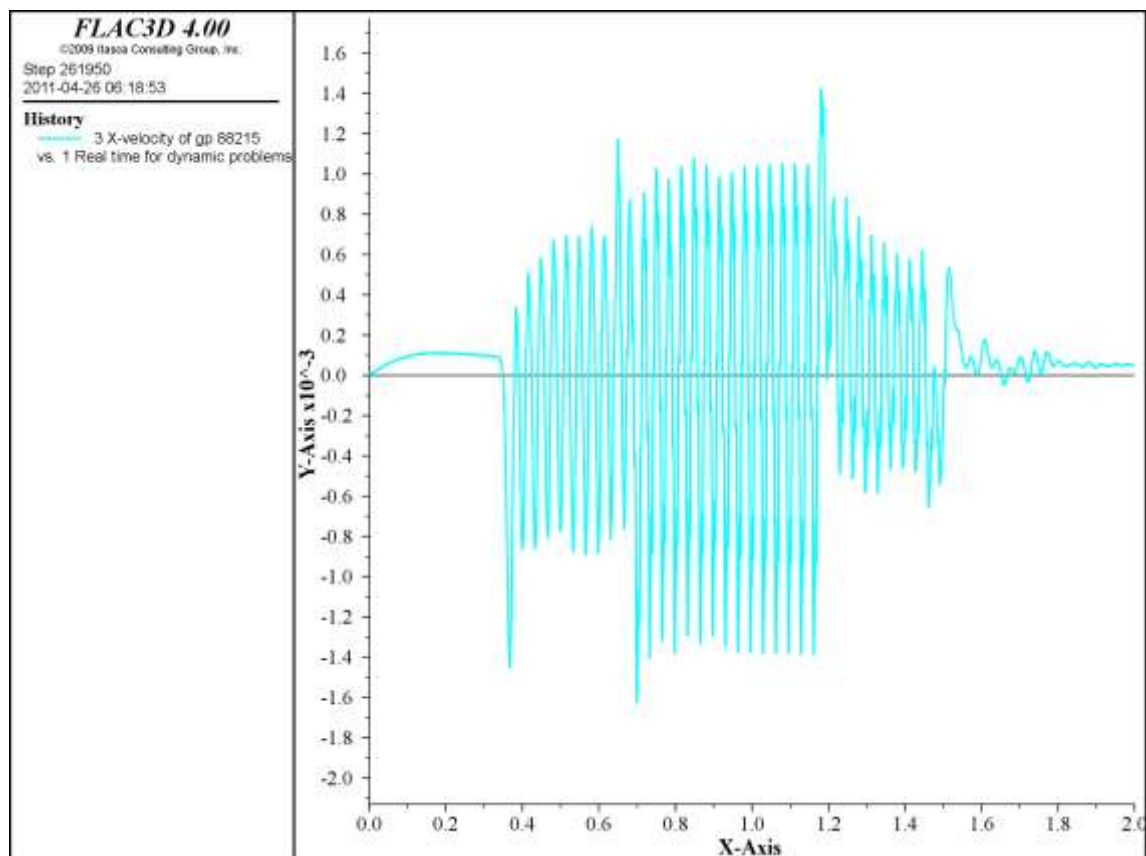


**Rys. 7.5. Schemat odpalania ładunków w postaci przyłożonego obciążenia do krawędzi skarpy**

Uzyskane wyniki prędkości drgań w odległości 700 m od przyłożonego obciążenia przedstawiono na rys. 7.6 i 7.7.



Rys. 7.6. Przebieg składowej poziomej prędkości drgań w podłożu uzyskany w analizie numerycznej



Rys. 7.7. Przebieg składowej poziomej prędkości drgań na fundamencie uzyskany w analizie numerycznej

Maksymalna prędkość składowej poziomej drgań w podłożu wyniosła 1,823 mm/s, co stanowi 95.7% wartości zarejestrowanej, natomiast na fundamencie 1,627 mm/s, co stanowi 109.3% wartości zarejestrowanej. Udało się zatem zbliżyć do wartości maksymalnych prędkości drgań rejestrowanych w podłożu i na fundamencie obiektu, natomiast kształt przebiegu znacznie odbiega od zarejestrowanego warunkach rzeczywistych.

## **7.4. Podsumowanie**

Analizę oddziaływań dynamicznych, wywołanych robotami strzałowymi, na masyw skalny i obiekt budowlany w otoczeniu kopalni wapienia B przeprowadzono z wykorzystaniem analizy w pełni dynamicznej. Umożliwiła ona kalibrację modelu i uzyskanie zbliżonych wartości maksymalnych wartości prędkości drgań parasejsmicznych. Niestety nie udało się uzyskać zbliżonych kształtów przebiegów czasowych rejestrowanych drgań. Wynikać to może z braku szczegółowych informacji o budowie podłoża w miejscu wykonywania pomiarów i na drodze przejścia sygnału od miejsca wykonywanych robót strzałowych do punktu pomiarowego, co przełożyło się na konieczność zastosowania szeregu uproszczeń na etapie tworzenia modelu. Dynamiczne modelowanie numeryczne oddziaływania robót strzałowych, zarówno na grunt jak i na obiekty budowlane, jest zagadnieniem bardzo trudnym. Znacznym uproszczeniem jest tutaj przyjęcie modelowania w płaskim stanie odkształcenia oraz założenie jednorodności masywu skalnego. Zastosowanie przestrzennych modeli numerycznych, uwzględniających rzeczywistą budowę geologiczną masywu skalnego, zapewne pozwoliłoby na uzyskanie wyników bardziej zbliżonych do rzeczywistych przebiegów składowych prędkości.

## 8. Wnioski końcowe

Na podstawie przeprowadzonych badań i analiz, można sformułować następujące wnioski:

1. Częstotliwość stanowi jeden z dwóch podstawowych parametrów oceny oddziaływania drgań na obiekty, gdyż w większości norm i skal do oceny ich szkodliwego wpływu częstotliwość jest parametrem dominującym. W związku z tym, badanie sygnału parasejsmicznego wzbudzanego robotami strzałowymi w górnictwie odkrywkowym, powinno być oparte na analizie struktury częstotliwościowej zarejestrowanych drgań.
2. Stosowane do odpalania, serii ładunków MW w długich otworach, opóźnienia milisekundowe powodują zmianę struktury częstotliwościowej drgań rejestrowanych zarówno w podłożu jak i na fundamencie obiektu.
3. Określenie optymalnych opóźnień milisekundowych dla danych warunków geologiczno – górniczych ma charakter lokalny i nie musi być dobrym rozwiązaniem dla innych kopalń nawet wydobywających ten sam surowiec.
4. Elektroniczny system inicjacji ładunków MW, ze względu na swoją precyzję, bardzo skutecznie wpływa na strukturę częstotliwościową wzbudzanych drgań.
5. Analiza czasowo - częstotliwościowa z zastosowaniem algorytmu *Matching Pursuit* jest efektywnym narzędziem analitycznym badania struktury drgań. Jej wyniki, w bardzo wyraźny sposób, dają obraz zmieniającego się udziału poszczególnych częstotliwości w budowaniu drgań i dają nowe możliwości zastosowania między innymi do oceny oddziaływania drgań na obiekty.
6. Drgania wzbudzane detonacją ładunków MW odpalanych z opóźnieniem milisekundowym, w kopalniach odkrywkowych, istotnie się różnią od trzęsień ziemi oraz drgań na powierzchni wzbudzanych wstrząsami górniczymi.
7. Przeprowadzone strzelania doświadczalne ładunkami MW umieszczonymi w długich otworach oraz analiza ich efektu w postaci drgań wskazuje jednoznacznie, że zastosowane wielkości opóźnień milisekundowych istotnie wpływają na kształt krzywej pseudoprędkościowego spektrum odpowiedzi.
8. Zapalniki elektroniczne charakteryzują się zdecydowanie wyższą precyzją niż zapalniki systemu nieelektrycznego, co skutkuje ich silnym wpływem na strukturę częstotliwościową rejestrowanych drgań, a w konsekwencji również na spektrum odpowiedzi.

9. W pracy dokonano próby ujęcia ilościowego zmian strukturalnych spektrum odpowiedzi drgań przez określenie, w całym zakresie częstotliwościowym, względnej mocy drgań podłoża, jak i przenoszonych z podłoża do obiektu. Jako poziom odniesienia przyjęto parametry spektrum dla drgań wzbudzonych pojedynczym ładunkiem MW.
10. Metoda spektrum odpowiedzi była opracowana na potrzeby sejsmiki związanej z trzęsieniami ziemi, a później zaadaptowana do wstrząsów górniczych, które to charakteryzują się częstotliwościami poniżej 15 Hz. W tym zakresie tłumienie drgań przy przejściu z podłoża do fundamentu jest nieznaczne. W przypadku oddziaływania robót strzałowych na otoczenie wzbudzone drgania mają bardzo często znacznie wyższe częstotliwości dochodzące w podłożu nawet do 80 Hz, a na obiekcie do 30 Hz.
11. Wyznaczenie, wzorem obszarów dotkniętych trzęsieniami ziemi lub wstrząsami górniczymi, uśrednionych spektrów odpowiedzi, dla terenów w otoczeniu kopalń odkrywkowych, jest niemożliwe ze względu na zmienność charakterystyki źródła drgań, jakim jest detonacja ładunków MW odpalanych z różnym opóźnieniem czasowym. Spektrum odpowiedzi może być więc parametrem analizy oddziaływania drgań w trakcie poszukiwania optymalnych warunków wykonywania robót strzałowych.
12. Zastosowane opóźnienie milisekundowe wpływa również na stopień tłumienia drgań przenoszonych z podłoża do obiektu, a jego mechanizm wymaga dokładniejszych badań. Przeprowadzone analizy wykazały, że stosowany współczynnik tłumienia jest bardzo silnie związany z częstotliwością i dlatego jego wyrażenie ilościowe musi uwzględniać ten parametr drgań. Jest to ważne szczególnie w trakcie wyznaczania dopuszczalnych ładunków MW odpalanych z opóźnieniem czasowym.
13. Spektrum odpowiedzi drgań fundamentu należy porównywać ze spektrum odpowiedzi drgań podłoża, dzięki czemu uzyskuje się weryfikację spodziewanej odpowiedzi obiektu.
14. Przeprowadzone badania, obliczenia i analizy wyników pomiarów mają charakter uniwersalny tylko w zakresie przedstawionej metodyki poszukiwania opóźnień milisekundowych, które mogą wpłynąć na minimalizację oddziaływania robót strzałowych w otoczeniu kopalń odkrywkowych. Niestety ilość czynników mających wpływ na analizowane zjawiska nie pozwala na uogólnienia.
15. Jednym z celów niniejszej pracy było wykazanie, możliwości wprowadzenia elektronicznych systemów odpalania ładunków MW i związanych z tym opóźnień milisekundowych, które powinno odbywać się bardzo rozważnie. Źle dobrane opóźnienie, połączone z wysoką precyzją zapalników elektronicznych, może spowodować po-

wstanie niekorzystnych drgań z punktu widzenia obiektu, co może doprowadzić do rezonansu i w konsekwencji nawet do uszkodzenia obiektu.

16. Dokładne rozpoznanie mechanizmu występowania w sygnale częstotliwości będących krotnością częstotliwości źródła (odwrotności opóźnienia), będzie sukcesem dla techniki wykonywania robót strzałowych zarówno pod kątem efektywności górniczej i ekonomicznej jak i zmniejszenia oddziaływania na obiekty w otoczeniu kopalń odkrywkowych.
17. Próba zamodelowania sygnałów z wykorzystaniem metody różnic skończonych potwierdziła wysoki stopień skomplikowania zjawiska rozchodzenia się drgań parasejsmicznych, powstałych na skutek detonacji ładunków MW, z różnym opóźnieniem milisekundowym. Zastosowanie przestrzennych modeli numerycznych, uwzględniających rzeczywistą budowę geologiczną masywu skalnego, zapewne pozwoliłoby na uzyskanie wyników bardziej zbliżonych do rzeczywistych przebiegów składowych prędkości.
18. Przeprowadzony w pracy wywód, zweryfikowany wynikami pomiarów w czasie odpalania doświadczalnych serii ładunków MW w konkretnych warunkach kopalnianych, przy spełnieniu przyjętych założeń, potwierdził tezę przyjętą w dysertacji.



## Bibliografia

- Adamczyk J., Targosz J. (2002): *Ochrona przed drganiami wywołanymi przez ruch samochodowy*. Wydawnictwo Naukowe DWN, Kraków
- AS 2187.2-1993, (1993) *Explosives – Storage, transport and use. Part 2: Use of explosives.*, Standards Australia, Homebush, NSW, Australia
- Augustyńska J., Dulińska J. (2010): *Wpływ wstrząsów górniczych na obwałowanie ziemne składowisk odpadów*, Czasopismo techniczne, 3-B/2010, zeszyt 11, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków, s. 3-13
- Bartley D. A., McClure R., Troussell R. (2003): *Electronic detonator technology in open pit mining*. Second EFEE World Conference on Explosives and Blasting, Prague, p. 165 – 171
- Batko P. (1993): *O wpływie niektórych czynników na efekt sejsmiczny strzelania*. Materiały konferencyjne nt. Materiały wybuchowe i technika strzelnicza. Aktualny stan i perspektywy rozwoju. Gliwice–Kraków
- Batko P. (1994): *Badanie wpływu własności strzelniczych materiałów wybuchowych na efekt sejsmiczny strzelania*. Praca w ramach badań własnych nr 10.100.47. Sprawozdanie z badań wykonanych w 1993 roku. Kraków
- Batko P. (2002): *Wpływ własności strzelniczych materiału wybuchowego na efekt sejsmiczny strzelania*. Seria: Studia, Rozprawy, Monografie nr 105, IGSMiE PAN, Kraków
- Batko P. (2004): *Wpływ wybranych elementów techniki strzelniczej na intensywność drgań gruntów*. Górnictwo i Geoinżynieria. Zeszyt 3/1. Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne AGH, Kraków
- Bierzoni I. S. et al. (БЕРЗОН И. С. и др) (1962): *Динамические характеристики сейсмических волн в реальных средах*. Москва
- Biessikirski R. (1991): *Wybrane informacje na temat konstrukcji i testowania zapalarki milisekundowej*. – Konferencja: Problemy techniki strzelniczej w górnictwie – perspektywy rozwoju. Kraków
- Biessikirski R. (1996): *Zapalarka milisekundowa Expo 201*. – Konferencja: Technika strzelnicza w górnictwie. Jaszowiec
- Biessikirski R., Sieradzki J., Winzer J. (2001): *Uwagi praktyczne do nieelektrycznego odpalania długich otworów na przykładzie systemu Nonel Unidet*. Konferencja: Technika strzelnicza w górnictwie. Wyd. Art.-tekst, Jaszowiec, s. 241 - 252
- Biessikirski R., Winzer J. (2002): *Działalność profilaktyczna w kopalniach odkrywkowych. Oddziaływanie robót strzałowych na otoczenie*. WUG 10/2002 Bezpieczeństwo Pracy i Ochrony Środowiska w Górnictwie, Katowice
- Biessikirski R., Sepiał J., Winzer J. (2006): *Badania wpływu drgań na obiekt koksowni Radin podczas drążeniu upadowej odstawczo – transportowej z powierzchni do poziomu 400 m na KWK Marcel przy stosowaniu robót strzałowych*. Kraków (praca nie publikowana)
- Biessikirski R., Winzer J., Sieradzki J. (2007): *Strefa drgań parasejsmicznych wzbudzanych robotami strzałowymi w odkrywkowych zakładach górniczych*, Bezpieczeństwo Pracy i Ochrona Środowiska w Górnictwie, WUG nr 3, Katowice
- Biessikirski R., Winzer J. (2008): *Określenie warunków bezpiecznego wykonywania robót strzałowych w górnictwie odkrywkowym surowców skalnych*, Bezpieczeństwo Pracy i Ochrona Środowiska w Górnictwie WUG 5(165)/2008

- Biessikirski R., Pyra J., Winzer J. (2008): *Wybrane problemy przy projektowaniu robót strzałowych w górnictwie odkrywkowym*. Materiały konferencyjne GiG Bezpieczeństwo Robót Strzałowych w Górnictwie, Katowice
- Bollinger G. A. (1980): *Blast Vibration Analysis*. Southern Illinois University Press, USA
- Bozorgina Y., Bertero V. V. (2004): *Earthquake Engineering: from Engineering Seismology to Performance – Based Engineering*. CRC PRESS
- Cała M. (2007): *Numeryczne metody analizy stateczności zboczy*, AGH Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne, Kraków
- Cała M., Dobrocinski S., Łydzba D. (2007): *Analiza numeryczna propagacji fal oraz stateczności zboczy*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław
- Cała M., Flisiak J., Kowalski M., Maca N. (2011): *Numeryczna analiza oddziaływań dynamicznych wywołanych robotami strzałowymi na masyw skalny w korpusach zboczy stałych wyrobiska górniczego Pola Belchatów*. Kraków 2011, (praca nie publikowana)
- Carvalho E. (2008): *General; requirements; ground condition and seismic action*. Workshop Eurocodes: Background and application, European Commission, 18÷20 February, Brussels
- Chang S. J. (1997): *Impact induced response spectrum for the safety evaluation of the high flux isotope reactor*. American Society of Mechanical Engineers, Pressure Vessel Symposium Volume
- Chanukajew A.N. (1974): *Fizyčeskie procesy pri otkojke gornych porod wzrywow*. Nedra Moskwa
- Chavez R., Chantry R. (2003): *Actual benefits from new technologies related to constant timing with electronic detonators and uniform energy control*. Second EFEE World Conference on Explosives and Blasting, Prague, p. 303 – 311
- Chmielewski T., Zembaty Z. (1998): *Podstawy dynamiki budowli*. Wydawnictwo „Arkady”, Warszawa
- Chopra A. K. (2007): *Elastic response spectrum: A historical note*. Earthquake Engineering and Structural Dynamics. No 36, p. 3-12
- Cichoń M., Janusz M., Ostiadel W., Pietkiewicz K., Szumny M. (2007): *System zapalników elektrycznych „i-kon” firmy Orica*. Bezpieczeństwo Pracy i Ochrona Środowiska w Górnictwie 09/2007
- Ciesielski R., Maciąg E., Pieronek M. (1980): *Spektra odpowiedzi drgań wywołanych ruchem drogowym*. Materiały XXVI Konferencji Naukowej KILiW PAN i KN PZITB, T.1, Teoria Konstrukcji, Wrocław – Krynica, s. 53-60
- Ciesielski R., Maciąg E. (1986): *Spektra odpowiedzi drgań wywołanych ruchem drogowym*. Mechanika No 12, Wyd. Krak. Oddział PAN, Kraków, s. 27-46
- Ciesielski R., Maciąg E. (1990): *Drgania drogowe i ich wpływ na budynki*. Inżynieria Komunikacyjna, Warszawa
- Ciesielski R., Kawecki J., Maciąg E. (1993): *Ocena wpływu wibracji na budowle i ludzi w budynkach (Diagnostyka dynamiczna)*. ITB Warszawa
- Ciesielski R., Stypuła K. (1996): *Symulacja nierówności nawierzchni drogowych przy badaniu efektów dynamicznych przejazdów*. Materiały Seminarium Nauk.-Techn.: Problemy Transportu Inżynierii Lądowej w Działalności Naukowej i Technicznej Krakowskiego Środowiska SITK; Zeszyt Nauk.-Techn. SITK nr 2 (Zeszyt 43), Kraków, s. 91 – 106
- Ciesielski R. (2002): *Podstawy i nowości naukowe w inżynierii parasejsmicznej*. XI Międzynarodowe Sympozjum Dynamiki Konstrukcji, Rzeszów – Adamów, Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej nr 197
- Ciesielski R. (2004): *Problemy diagnostyki skutków wstrząsów górniczych na budowle naziemne*. Górnictwo Odkrywkowe 5-6. Wrocław
- Corser P. (1979): *Wall Cracking in Residential Structures From Surface Mining and Hard Rock Construction Blasts*. M.S. Thesis. Dept. of Civil Engineering, Northwestern Univ., Evanston, pp. 199

- Crum S., Siskind D. (1993): *Response of Structures to Low — Frequency Ground Vibrations — Preliminary Study*. Symp. of Explosives and Blasting, San Diego
- Czerwionka L., Tatara T. (2009): *Wzorcowe spektra odpowiedzi z wybranych obszarów GZW*. Materiały XII Sympozjum „Wpływy Sejsmiczne i Parasejsmiczne na Budowle”, Politechnika Krakowska, Kraków
- Dick R. A., Fletcher L. R., D’Andrea D. V. (1983): *Explosives and Blasting Procedures Manual*. U.S. Bureau of Mines IC 8925
- DIN 4150-3 Erschutterungen im Bauwesen, Teil 3: Einwirkungen auf bauliche Anlagen.
- Dojcar O. (1996): *Design methods for controlled blasting*. Trans. Inst. Mining Metall. Sec. A, t. 105, nr 9–12,
- Dowding C. H. (1985): *Blast Vibration Monitoring and Control*. Prentice – Hall, INC Englewood Cliffs NJ 07632, USA
- Dowding C. H. (1996): *Construction Vibrations*. Prentice – Hall, USA
- Drzęzła B. *at al.* (1995): *Poradnik geofizyka górniczego*. Szkoła eksploatacji podziemnej, Kraków
- Dubiński J., Konopko W. (2000): *Tapania – ocena, prognoza, zwalczanie*. Główny Instytut Górnictwa, Katowice
- Dubiński J., Mutke G. (2001): *Reakcja budynków na wstrząsy górnicze z wysokoczęstotliwościową modą drgań gruntu*. Warsztaty Górnicze – PAN – IGSMiE. Kraków
- Dubiński J., Mutke G. (2008): *Analiza czynników wpływających na intensywność drgań parasejsmicznych*. Bezpieczeństwo Pracy i Ochrona Środowiska w Górnictwie 4(164)/2008
- Dubiński J. *at al.* (2008): *Górnicza Skala Intensywności GSI-GZW do oceny skutków oddziaływania wstrząsów indukowanych eksploatacją złóż węgla kamiennego w Zakładach Górniczych Kompanii Węglowej S.A. na obiekty budowlane i na ludzi*. Seminarium o stosowaniu skala GSI-2004, Kraków
- Dubiński J., Mutke G., Jaśkiewicz K., Lurka A. (2009): *Górnicza Skala Intensywności GSI-2004 do oceny skutków drgań wywołanych wstrząsami górniczymi w obszarze LGOM – geneza , skala weryfikacja*. Materiały XII Sympozjum „Wpływy Sejsmiczne i Parasejsmiczne na Budowle”, Politechnika Krakowska, Kraków
- Dulińska J., Zięba A. (2009): *Metody oceny wpływu wstrząsów górniczych na wybrane budowle wielkogabarytowe*. Materiały XII Sympozjum „Wpływy Sejsmiczne i Parasejsmiczne na Budowle”, Politechnika Krakowska, Kraków
- Durka P.J. (2004): *Między czasem a częstością: elementy współczesnej analizy sygnałów*. 2004
- Duvall W.I., Johnson C. F., Mayer A. V. C., Devine J. E. (1963): *Vibrations From Instantaneous and Millisecond – Delayed Quarry Blast*. U. S. Bureau of Mines RI 6151
- Egorov M.G., Glozman L.M. (1997): *Issledovanie sejsmičeskogo dejstvija npromyšlennych vzryvov na zdaniya i sooruzheniya*. Probl. mech. gorn. porod: Tr. 11 Ros. konf. po mech. gorn. porod RusRock-97, Sankt Petersburg
- EN 1998-1: *Design of structures for earthquake resistance, Part 1: General rules, seismic action and rules for buildings* - Eurocode 8
- Fajkiewicz Z. (1972): *Zarys geofizyki stosowanej*. Warszawa, Wyd. Geologiczne
- Fardis M. N. (2008): *Earthquake – resistant design of concrete buildings to EN1998-1 (EUROCODE 8)*, Workshop Eurocodes: Background and application, European Commission, 18÷20 February, Brussels
- FLAC3D v.4.0. *Users manual*. 2009. Itasca Consulting Group. Minneapolis. USA
- Floyd J. L. (2003): *Improving slope stability with electronic delays*. Second EFEE World Conference on Explosives and Blasting, Prague, p. 567 – 571
- Freeman S. A. (2007): *Response Spectra as a Useful Design and Analysis Tool for Practicing Structural Engineers*. ISET Journal of Earthquake Technology, Paper No. 475, Vol. 44, No. 1, p. 25–37
- Gliński J. (1969a): *Strzelanie milisekundowe*. Górnictwo Odkrywkowe nr 1, Wrocław

- Gliński J. (1969b): *Optymalny czas opóźnienia w odpalaniu milisekundowym*. Górnictwo Odkrywkowe nr 4, Wrocław
- Gozdowski A. (1972): *Wpływ zwłoki międzysrzalowej na wielkość drgań przy strzelaniu w glinach zwałowych*. Górnictwo Odkrywkowe nr 3-4, Wrocław, s. 89-93
- Grothe D., Reinders P. (2007): *Advanced vibration management in quarries using a predictive blast vibration model*. Fourth EFEE World Conference on Explosives and Blasting, Vienna, p. 93 – 97
- Gui M. W., Chiu H.T. (2009): *Seismic Response of Renyi-Tan Dam during the 921 Ji-ji Earthquake*, Journal of GeoEngineering
- Hoek, E. (2007): *Practical Rock Engineering*. www.rockscience.com
- Kahrman A., Karadogan A., Ozer U., Kaya E., Karakus Y., Bicer S., Mangir N. (2009): *The analysis of ground vibrations induced by blasting at Cebeci Quarries in Istanbul, Turkey*. Fifth EFEE World Conference on Explosives and Blasting, Budapest Conference Proceedings, p. 191 – 200
- Kelly M., White T (1993).: *Environmental effect of blasting*, Leeds University Mining Association Journal
- Kogut J. (1999): *Analiza spektrum odpowiedzi drgań drogowych*. (Rozprawa doktorska) Politechnika Krakowska, Instytut Mechaniki Budowli, Kraków
- Korzeniowski J.I Onderka Zb. (2006): *Roboty strzelnicze w górnictwie odkrywkowym*. Wydawnictwa i Szkolenia Górnicze Burnat & Korzeniowski, Wrocław
- Kowalczyk J. M. (1970): *Sejsmiczne metody poszukiwawcze*. Wydawnictwo AGH, Skrypt uczelniany nr 189, Kraków
- Kuhlmeyer R. L., Lysmer J., (1973): *Finite element method accuracy for wave propagation problems*. J.Soil Mech. & Foundation Div. ASCE. Vol. 99 p. 421 – 427
- Kuzu C., Hudaverdi T. (2005): *Evaluation of blast-induced vibrations – a case study of the Istanbul Cendere region*. Third EFEE Word Conference on Explosives and Blasting, Brighton, p. 119 – 123
- Lam N., Wilson J. (2001): *Earthquake response spectrum models for Australia*. Proceedings of a conference AEES: Earthquake Codes in the Real Word, November 20-22, Canberra, p. 8.1 – 8.5
- Langefors W., Kihlstrom B. (1968): *The Modern Technique of Rock Blasting*.
- Lewicki J. (2004): *Zasady i metody bezpiecznego wykonywania robót strzałowych w budownictwie*. Górnictwo i Geoinżynieria Rok 28 Zeszyt 3/1
- Lewicki J., Batko P., Morawa R., i in. (2003): *Opracowanie warunków bezpiecznego wyburzania różnych obiektów – dokumentacje i opracowania archiwalne z lat 1985 – 2003*
- Lovitt M.B., Degas B. Jr. (2003): *Single shot drawbell with Orica's i-kon detonators At Freeport*. Explosives and Blasting Technique, Holmberg (ed.), Swets & Zeitlinger, Lisse
- Lu Y., Hao H., Ma G., Zhou Y. (2001): *Simulation of structural response under high-frequency ground excitation*. Earthquake Engineering and Structural Dynamics. No 30, p. 307 – 325
- Lyons R.G. (2000): *Wprowadzenie do cyfrowego przetworzenia sygnałów*. WKiŁ Warszawa
- Lysmer J., Kuhlmeyer R. L. (1969): *Finite dynamic model for infinite media*. J. Engng. Mech. ASCE, Vol. 95, pp. 859 – 877
- Ma G., Hao H., Lu Y. (2003): *Modeling damage potential of high-frequency ground motions*. Earthquake Engineering and Structural Dynamics. No 32, p. 1483 – 1503
- Mallat S., Zhang Z. (1993): *Matching Pursuit with time – frequency dictionaries*. IEEE Transactions on Signal Processing
- Maciąg E. (1979): *Interakcja układu budynek – podłoże podlegającego działaniom sejsmicznym i parasejsmicznym*. Mechanika teoretyczna i stosowana 4(17), Kraków, s. 497 – 536
- Maciąg E. (1994): *Wstrząsy górnicze i ich wpływy na budynki*. Materiały VII Sympozjum „Wpływy sejsmiczne i parasejsmiczne na budowle”, Kraków, s. 34-48

- Maciąg E., Tatar T. (1998): *Diagnostyka dynamiczna budynków podlegających drganiom wywołanym w kamieniołomach*. Konferencja: Technika strzelnicza w górnictwie – problemy urabiania skał. Jaszowiec
- Maciąg E., Tatar T. (1999): *Porównanie oceny szkodliwości drgań od wstrząsów górniczych dla niskiego budynku murowanego na podstawie skal SWD i analizy teoretycznej*. IX Sympozjum – Warsztaty 99, Kraków
- Maciąg E., Tatar T. (2000): *Interakcja układu budynek – podłoże, podlegającego drganiom spowodowanym odstrzałami w kamieniołomach*. Inż. i Budown. Nr 4-5/2000
- Maciąg E. (2006): *Interakcja układu budynek – podłoże gruntowe w świetle doświadczalnego badania drgań parasejsmicznych*. Inżynieria Morska i Geotechnika. Rok 27, nr 4/2006 s. 240 - 250
- Maciąg E., Winzer J., Biessikowski R. (2007): *Metodyka postępowania w ochronie otoczenia w przypadku robót strzałowych*. WUG 9/2007 Bezpieczeństwo Pracy i Ochrony Środowiska w Górnictwie, Katowice
- Maciąg E., Lewicki J., Winzer J. (2009): *Wyburzanie żelbetowych kominów elektrowni „Konin” i oddziaływanie upadku ich masy na sąsiednie obiekty*. XII Sympozjum „Wpływy Sejsmiczne i Parasejsmiczne na Budowlę” Kraków
- Malhotra P. K. (2001): *Response spectrum of incompatible acceleration, velocity and displacement histories*. Earthquake Engineering and Structural Dynamics. No 30, p. 279 - 286
- Materiały reklamowe firmy Dyno Nobel Poland i Orica – Polski Kongres Górnictwa. Kraków 2007
- McKenzie C. (1993): *Methods of Improving of Blasting Operations*, Comprehensive Rock Mechanics, London
- Migairou P. L. (2009): *Case studies demonstrating electronic initiation versatility*. Fifth EFEE World Conference on Explosives and Blasting, Budapest Conference Proceedings, p. 255 – 262
- Modrzejewski Sz., Ślęzak J. (1998): *Problemy oddziaływania robót strzałowych na przyległe obiekty w aspekcie drgań parasejsmicznych*. Górnictwo Odkrywkowe nr 2-3, Wrocław, s. 189 – 200
- Modrzejewski Sz. (2004a): *Prognozowanie wpływów robót strzałowych prowadzonych w górnictwie odkrywkowym na środowisko*. Górnictwo Odkrywkowe. Wrocław
- Modrzejewski Sz. (2004b): *Prędkość drgań jako wskaźnik propagacji parasejsmicznej*. Górnictwo i Geoinżynieria. Zeszyt 3/1. Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne AGH, Kraków
- Modrzejewski Sz. (2006): *Zasady doboru opóźnień milisekundowych w górnictwie skalnym*. Górnictwo Odkrywkowe nr 3-4, Wrocław, s. 153 – 157
- Mutke G. (2008): *Skale intensywności zjawisk sejsmicznych*. Seminarium o stosowaniu skala GSI-2004, Kraków
- Müller B., Böhnke R. (2003): *Verbesserung des sprengergebnisses und verringerung von erschütterungen durch anwendung der impulsstheorie bei gewinnungssprengungen*. Górnictwo Odkrywkowe 7-8/2003
- Müller B., Böhnke R. (2005): *Defined blast designs in rock mass*. Third EFEE World Conference on Explosives and Blasting, Brighton Conference Proceedings, p. 307 – 314
- Müller B., Hausmann J., Niedziwiedz H. (2007): *Comparison of different methods of measuring and calculating blast vibrations in rock masses*. Fourth EFEE World Conference on Explosives and Blasting, Vienna, p. 127 – 138
- Müncner E. *et al.* (2000): *Priručka pre strelmajstrov a technických veducích odstrelav*. SSTVP Banská Bystrica
- Nicholson H. R., Johnson C. F., Duvall W. I. (1971): *Blasting Vibration and Their Effects on Structures*. U. S. Bureau of Mines Bulletin 656
- Nonel – poradnik użytkownika. Dyno Nobel Swede AB, 2000
- Nonel – poradnik użytkownika. Dyno Nobel Swede AB, 2003

- Oloffson S. O. (1990): *Applied Explosives Technology for Construction and Mining*. Nora Boktryckeri AB
- Onderka Zb. (1990): *Określenie wpływu konstrukcji ładunku i wielkości opóźnień międzystrzałowych na intensywność drgań sejsmicznych i rozdrobnienie urobku – wytyczne i zalecenia*. IGO AGH, Kraków (nie publikowane)
- Onderka Zb. (1992): *Technika strzelnicza w górnictwie odkrywkowym*. Skrypty Uczelniane AGH Nr 1241, Kraków
- Onderka Zb. (1998): Problemy urabiania skał za pomocą materiałów wybuchowych. Wyd. Instytutu GSMiE PAN, Materiały konferencyjne: Technika strzelnicza w górnictwie – problemy urabiania skał, Jaszowiec, s. 169 - 187
- Onderka Zb. (2001): Efekt sejsmiczny strzelania – uwagi i zalecenia. Materiały konferencyjne: Technika strzelnicza w górnictwie, Wyd. Ard-Tekst, Jaszowiec, s.435 – 453
- Onderka Zb., Winzer J. (2001): *NONEL UNIDET – możliwości doboru opóźnień milisekundowych dla strzelań długimi otworami*. Technika strzelnicza w górnictwie, Wyd. Ard-Tekst, Jaszowiec
- Onderka Zb., Sieradzki J. Winzer J. (2003): *Technika strzelnicza 2 – Wpływ robót strzelniczych na otoczenie kopalń odkrywkowych*. UWN-D AGH, Kraków
- Onderka Zb. (2003): *Milisekundowe odpalanie ładunków a efekt sejsmiczny strzelania w kopalniach odkrywkowych*. WUG, Bezpieczeństwo Pracy i Ochrona Środowiska w Górnictwie 7, Katowice, s. 15 – 17
- Onderka Zb., Sieradzki J. (2004): *Efekt sejsmiczny strzelania w kopalniach odkrywkowych - aktualny stan i zalecane kierunki badań*. Górnictwo i Geoinżynieria. Zeszyt 3/1. Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne AGH, Kraków
- Onderka Zb., Biessikowski R., Sieradzki J. (2007): *Rola spektrum odpowiedzi w procesie oceny drgań w budynkach przy robotach strzałowych*. Bezpieczeństwo Pracy i Ochrona Środowiska w Górnictwie, WUG nr 9(157)/I/2007
- ONORM S 9020 Bauwerksschütterungen, Österreichisches Normungsinstitut, A-1021 Wien.
- Ozimek E. (1985): *Podstawy teoretyczne analizy widmowej sygnałów*. Warszawa – Poznań
- Pietkiewicz K., Dusza R., Janusz E. (2007): *Orica Mining Service – Polska, Europa, świat – komunikat*. Bezpieczeństwo Pracy i Ochrona Środowiska w Górnictwie 09/2007
- PN-85/B-02171 – *Ocena szkodliwości drgań przekazywanych przez podłoże na budynki*
- PN-C-86017:1994 *Górnictwo zapalniki elektryczne – pomiar czasu zadziałania*
- PN-EN 61260:2000 – *Elektroakustyka – Filtry pasmowe o szerokości oktawy i części oktawy*.
- Prawo geologiczne i górnicze z dnia 4 lutego 1994 r.* Dz. U. Nr 27, poz. 96
- Prawo ochrony środowiska z dnia 27 kwietnia 2001 r.* Dz. U. Nr 62, poz. 627
- Pyra J. (2008): *Ocena oddziaływania górniczych robót strzałowych na obiekty budowlane*. WUG Bezpieczeństwo Pracy i Ochrony Środowiska w Górnictwie nr 3/2008 Katowice
- Pyra J. (2010): *Zastosowanie opóźnień milisekundowych do minimalizacji oddziaływania robót strzałowych na obiekty*. Górnictwo i Geoinżynieria Rok 34, Zeszyt 2, Uczelniane Wydawnictwa Naukowo – Dydaktyczne, Kraków, s. 527-536
- Reinders, P. Hammelmann, F. (2004): *Electronic Blasting & Blast Management - Past, Present & Future*. PROCEEDINGS OF THE ANNUAL CONFERENCE ON EXPLOSIVES AND BLASTING TECHNIQUE, 30TH; VOL 1, p. 229-238
- Riddell R. (2008): Inelastic response spectrum: Early history. Earthquake Engineering and Structural Dynamics. No 37, p. 1175 - 1183
- Rorke A. J. (2007): *An evaluation of precise short delay periods on fragmentation in blasting*. Fourth EFEE World Conference on Explosives and Blasting, Vienna, p. 257 – 263

- Rosengren L., Brandshaug T., Andersson P., Lundman P. (2003), *Modeling Effects of Accidental Explosions in Rock Tunnels*. Technology roadmap for rock mechanics, South African Institute of Mining and Metallurgy, p.985-990
- Rozporządzenie Ministra Spraw Wewnętrznych i Administracji z dnia 14 czerwca 2002 r. *W sprawie zagrożeń naturalnych w zakładach górniczych*. Dz. U. Nr 94 poz. 841
- Samokar Z. (2008): *Zastosowanie Górniczej Skali Intensywności GSI-2004 przy ocenie skutków wstrząsów górniczych w zabudowie powierzchniowej na terenie górniczym kopalni ZG Rudna*. Seminarium o stosowaniu skala GSI-2004, Kraków
- Sieradzki J. (1997): *Kopalniany system monitoringu drgań* – Materiały konferencyjne, Krajowy Kongres Górnictwa Skalnego Kielce
- Sinadinovski C., McCue K. F. and Somerville M. (2000): *Characteristics of strong ground motion for typical Australian intra-plate earthquakes and their relationship with the recommended response spectra*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Volume 20, Issues 1-4, p. 101-110
- Siskind D. E. (1976): *Noise and Vibrations in Residential Structures from Quarry Production Blasting*: Measurements at six sites in Illinois. University of Michigan Library
- Siskind D. E. (2005): *Vibrations from blasting*. ISEE, Cleveland
- Siskind D. E., Stachura V. J., Nutting M. J. (1987): *Low-Frequency Vibrations Produced by Surface Blasting Over Abandoned Underground Mines*. U. S. Bureau of Mines RI 9078
- Siskind D. E., Crum R. E., Otterness R. E., Kopp J. W. (1989): *Comparative Study of Blasting Vibrations From Indiana Surface Coal Mines*. U. S. Bureau of Mines RI 9226
- Siskind D. E., Stachura V. J. (1998): *Vibration From Blasting over Abandoned Underground Mines*. U. S. Bureau of Mines IC 9135, p. 60 – 72
- Siskind D. E., Stagg M. S., Kopp J. W., Dowding C. H. (1989): *Structure Response and Damage Produced by Ground Vibration from Surface Mining Blasting*. U. S. Bureau of Mines RI 8507
- Słowik J. (1969): *Zmniejszenie efektu sejsmicznego przy strzelaniu milisekundowym*. Górnictwo Odkrywkowe nr 3, Wrocław, s. 236 – 238
- SN 640 312 a Erschutterungen, Einwirkungen auf Bauwerke, Yereinigung Schweizerischer Stra-Benfachleute, Zurich
- Sobala J. (2007): *Nowoczesny system inicjowania materiałów wybuchowych – zapalniki elektroniczne ERGONIC The modern initiation system of explosives – electronic detonators ERGONIC*. Bezpieczeństwo Pracy i Ochrona Środowiska w Górnictwie 09/2007
- Sołtys A., Pyra J. (2010): *Zastosowanie metod czasowo-częstotliwościowych do analizy drgań wzbudzanych robotami strzałowymi w górnictwie odkrywkowym*. Bezpieczeństwo Pracy i Ochrona Środowiska w Górnictwie, WUG nr 5(189)/2010
- Sulima Samujłło J. (1968): *Roboty strzelnicze w górnictwie odkrywkowym*. Wydawnictwo „Śląsk”, Katowice
- Ślęzak J., Modrzejewski Sz. (2002): *Wdrażanie nowych technik i sposobów wykonywania robót strzałowych w świetle obowiązujących przepisów*. Konferencja: Technika strzelnicza w górnictwie. Wyd. Art.-tekst, Jaszowiec, s. 349 – 367
- Tatara T. (2002): *Działanie drgań powierzchniowych wywołanych wstrząsami górniczymi na niską tradycyjną zabudowę mieszkalną*. Zeszyty naukowe Politechniki Krakowskiej, seria Inżynieria Łądowa nr 74, Kraków
- Tatara T. (2008): *Badania naukowe i diagnozy dotyczące ocen działania na obiekty budowlane drgań wzbudzanych robotami strzałowymi w górnictwie odkrywkowym*. Bezpieczeństwo Pracy i Ochrona Środowiska w Górnictwie, WUG nr 4 (164)/2008
- Tarlov A. (2009): *Systemy przetwarzania sygnałów. Analiza falkowa*. Materiały dydaktyczne 2009. Politechnika Szczecińska
- UNE 22-381-93 *Control de vibraciones producidas por voladuras*, AENORA, España 1993

- Vallejo C. L. (2006): *Correlation of Highwall Damage, Muckpile Fragmentation, and Ground Vibrations North Antelope Rochelle Coal Mine*, Report from grant. Socorro
- Wawrzyniak K. (2007): *Analiza akustycznych obrazów falowych w aspekcie zwiększenia informacji o parametrach sprężystych i zbiornikowych skał*. Praca doktorska AGH, Kraków
- Wicher A., Sek A., Konieczny J. (2005): *Akustyczno – fonetyczne cechy mowy polskiej*. Materiały dydaktyczne. Instytut Akustyki UAM, Poznań
- Winek T. (2009): *Przetwarzanie wielkości elektrycznych*. Materiały dydaktyczne. Politechnika Warszawska, Wydział Elektryczny. Instytut Elektrotechniki Teoretycznej i Systemów Informacyjno – Pomiarowych
- Winzer J., Biessikowski R. (1996): *Uwagi o metodyce doboru opóźnienia milisekundowego ze względu na ograniczenie wielkości drgań parasejsmicznych*. Konferencja Technika Strzelnicza w Górnictwie – Perspektywy Rozwoju, Wyd. PPGSMiE PAN, Jaszowiec, s. 297 – 306
- Winzer J., Biessikowski R., Kamiński Z. (2001): *Działalność profilaktyczna kopalń odkrywkowych w zakresie oddziaływania robót strzelniczych na otoczenie*. Konferencja – Technika strzelnicza w górnictwie. Jaszowiec
- Winzer J., Biessikowski R. (2002): *Działalność profilaktyczna w kopalniach odkrywkowych – Oddziaływanie robót strzałowych na otoczenie*. Bezpieczeństwo pracy i Ochrona Środowiska w Górnictwie 10/2002
- Winzer J., Sieradzki J. (2002): *Kopalniana Stacja Monitoringu Drgań (KSMD)*. Bezpieczeństwo pracy i Ochrona Środowiska w Górnictwie 7/2002
- Winzer J. (2004): *Wpływ opóźnień milisekundowych przy prowadzeniu strzelań eksploatacyjnych na częstotliwościowe charakterystyki drgań gruntu i budynków*. Górnictwo i Geoinżynieria. R. 28, z. 3/1, Kraków, s. 456 - 476
- Winzer J., Mężyk J. (2004): *Ocena wpływu robót strzałowych prowadzonych w kopalniach odkrywkowych na obiekty w ich otoczeniu – aktualne problemy*. Górnictwo Odkrywkowe Nr 5-6, Wrocław
- Winzer J. (2006): *Dokumentowanie oddziaływania robót strzałowych na otoczenie kopalń odkrywkowych*. Górnictwo Odkrywkowe 5-6, Wrocław
- Winzer J., Biessikowski R., Sieradzki J. (2006): *Roboty strzałowe a ochrona środowiska – uwagi krytyczne nie tylko o oddziaływaniu na obiekty*. Prace naukowe GiG, Katowice
- Winzer J., Pyra A. (2007): *Tłumienie drgań parasejsmicznych przy przejściu z podłoża do obiektów chronionych*. ZG SITG, Katowice, Przegląd Górniczy, nr 6
- Winzer J., Sieradzki J. (2007): *Monitorowanie oddziaływania robót strzałowych na obiekty w otoczeniu*. Bezpieczeństwo pracy i Ochrona Środowiska w Górnictwie 9/2007
- Winzer J., Sieradzki J., Sołtys A. (2008): *Dokumentowanie oddziaływania robót strzałowych na otoczenie kopalń odkrywkowych*. Bezpieczeństwo pracy i Ochrona Środowiska w Górnictwie 4/2008
- Winzer J. (2008): *Przyczynek do dyskusji nad oddziaływaniem drgań na obiekty otoczenia kopalń odkrywkowych*. ZG SITG, Katowice, Przegląd Górniczy, nr 2, s. 10 – 19
- Zembaty Z., Kowalski M., Hornung P. (2001): *Sejsmiczna kwalifikacja odłączników wysokiego napięcia*. Przegląd elektrotechniczny Rok LXXVII, 5/2001 s. 113 - 118
- Zembaty Z. (2004): *Rockburst induced ground motion—a comparative study*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering 24, p. 11–23
- Zembaty Z. (2009): *Zastosowanie normy sejsmicznej “Eurokod 8” w projektowaniu budowli narażonych na działanie wstrząsów sejsmicznych*. Materiały XII Sympozjum „Wpływy Sejsmiczne i Parasejsmiczne na Budowle”, Politechnika Krakowska, Kraków
- Zieliński T.P. (2007): *Cyfrowe przetwarzanie sygnału – od teorii do zastosowań*. WKŁ Warszawa



## Spis rysunków

|                                                                                                                                                                       |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Rys. 2.1. Schemat wykonywania wyrobiska korytarzowego (Poradnik Nonel 2003) .....                                                                                     | 10 |
| Rys. 2.2. Przykład rozmieszczenia stopni opóźnień przy wykonywaniu wyrobiska korytarzowego<br>(Poradnik Nonel 2003).....                                              | 11 |
| Rys. 2.3. Przykładowy sejsmogram drgań wzbudzonych robotami strzałowymi w kopalni<br>podziemnej .....                                                                 | 12 |
| Rys. 2.4. Schemat otworu strzałowego i rozmieszczenia otworów .....                                                                                                   | 14 |
| Rys. 2.5. Przykładowy sejsmogram drgań wzbudzanych robotami strzałowymi w kopalni<br>odkrywkowej .....                                                                | 15 |
| Rys. 2.6. Przykładowy sejsmogram drgań – wyburzenie komina żelbetowego .....                                                                                          | 17 |
| Rys. 2.7. Przykładowy sejsmogram drgań zarejestrowanych podczas prac makroniwelacyjnych –<br>odpalanie półsekundowe .....                                             | 18 |
| Rys. 2.8. Przykładowy sejsmogram drgań zarejestrowanych podczas prac makroniwelacyjnych –<br>odpalanie milisekundowe 75 ms .....                                      | 19 |
| Rys. 2.9. Rozwój zapalników (Reinders i Hammelmann 2004).....                                                                                                         | 20 |
| Rys. 2.10. Budowa zapalnika elektrycznego .....                                                                                                                       | 22 |
| Rys. 2.11. Zapalarka milisekundowa EXPLO-201 (Biessikirski 1996).....                                                                                                 | 23 |
| Rys. 2.12. Elementy systemu inicjacji NONEL UNIDET (Poradnik Nonel 2003) .....                                                                                        | 24 |
| Rys. 2.13. Łączniki powierzchniowe Eclip (Poradnik Nonel 2003).....                                                                                                   | 25 |
| Rys. 2.14. Urządzenie logujące - <i>i-kon Logger</i> (Mat. Rek. Orica 2007).....                                                                                      | 27 |
| Rys. 2.15. <i>Zapalarka Blaster 400</i> (Mat. Rek. Orica 2007) .....                                                                                                  | 27 |
| Rys. 2.16. przekrój przez zapalnik <i>i-kon</i> (Mat. Rek. Orica 2007) .....                                                                                          | 28 |
| Rys. 2.17. Wynik rejestracji intensywności drgań przy odpaleniu 7 otworów z opóźnieniami 0, 9,<br>17 i 34 ms (Duvall <i>et al.</i> 1963).....                         | 30 |
| Rys. 2.18. Wynik rejestracji intensywności drgań przy odpaleniu 15 otworów z opóźnieniami 0, 9,<br>17 i 34 ms (Duvall <i>et al.</i> 1963).....                        | 30 |
| Rys. 2.19. Porównanie intensywności drgań od pojedynczego otworu (o) z seriami odpalanymi<br>milisekundowo ( $\square$ , $\Delta$ ) (Siskind <i>et al.</i> 1989)..... | 31 |
| Rys. 2.20. Porównanie równań propagacji dla różnych opóźnień (Vallejo 2006).....                                                                                      | 32 |
| Rys. 2.21. Uproszczony model teorii pędu (impulsu) (Müller i Böhnke 2003) .....                                                                                       | 33 |
| Rys. 2.22. Przykład schematu inicjowania w serii z czterema szeregami (Müller i Böhnke 2003) .....                                                                    | 33 |
| Rys. 2.23. Zależność opóźnienia od zwięzłości skały dla różnych zabiorów (Gliński 1969a) .....                                                                        | 35 |
| Rys. 2.24. Zależność opóźnienia od zabioru dla różnego rodzaju zwięzłości skał (Gliński 1969a).....                                                                   | 35 |
| Rys. 2.25. Częściowe wydzielenie impulsu przy zastosowaniu opóźnienia 70 ms .....                                                                                     | 36 |

|                                                                                                                                                                |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Rys. 2.26. Całkowite wydzielenie impulsu przy zastosowaniu opóźnienia 150 ms .....                                                                             | 36 |
| Rys. 2.27. Porównanie poziomu rejestrowanych drgań od odpalenia pojedynczego ładunku i serii z różnym opóźnieniem (Biessikirski i Winzer 1996) .....           | 37 |
| Rys. 2.28. Porównanie poziomu rejestrowanych drgań od odpalenia serii ładunków z opóźnieniem 500 ms i 25 ms (Biessikirski i Winzer 2008).....                  | 38 |
| Rys. 2.29. Sejsmogramy drgań zarejestrowanych w czasie odpalania 14 ładunków MW (Biessikirski <i>at al.</i> 2008) .....                                        | 39 |
| Rys. 2.30. Wyniki analizy widmowej (FFT) dla drgań przedstawionych na rysunku 2.29 (Biessikirski <i>at al.</i> 2008) .....                                     | 39 |
| Rys. 2.31. Rzeczywiste opóźnienia milisekundowe dla serii dwuszeregowej (Biessikirski <i>at al.</i> 2008) .....                                                | 40 |
| Rys. 2.32. Porównanie poziomu rejestrowanych drgań przy odpaleniu ładunków MW z opóźnieniem 25 ms dla różnych złóż dolomitu (Biessikirski i Winzer 2008) ..... | 41 |
| Rys. 3.1. Podstawowe rodzaje fal sejsmicznych (Onderka <i>at al.</i> 2003) .....                                                                               | 50 |
| Rys. 3.2. Przemieszczeniowe skale SWD I i SWD II (Ciesielski 2002, PN-B-02170:1985).....                                                                       | 54 |
| Rys. 3.3. Prędkościowe skale SWD I i SWD II (Ciesielski 2002, PN-B-02170:1985) .....                                                                           | 54 |
| Rys. 3.4. Przyspieszeniowe skale SWD I i SWD II (Ciesielski 2002, PN-B-02170:1985) .....                                                                       | 55 |
| Rys. 3.5. Działalność profilaktyczna kopalń – schemat blokowy (Winzer <i>at al.</i> 2006) .....                                                                | 59 |
| Rys. 3.6. Klasyfikacja sygnałów zdeterminowanych.....                                                                                                          | 60 |
| Rys. 3.7. Klasyfikacja sygnałów losowych .....                                                                                                                 | 60 |
| Rys. 3.8. Graficzne przedstawienie dyskretyzacji i kwantowania sygnału .....                                                                                   | 62 |
| Rys. 3.9. Przykładowy zapis prędkości drgań oraz jego przetworzenie (zrózniczkowanie i scałkowanie) .....                                                      | 63 |
| Rys. 4.1. Oryginalny zarejestrowany sygnał .....                                                                                                               | 64 |
| Rys. 4.2. Widmo amplitudowe przebiegu czasowego przedstawionego na rys. 4.1.....                                                                               | 66 |
| Rys. 4.3. Schemat ideowy analizy sygnałów (Winek 2009) .....                                                                                                   | 67 |
| Rys. 4.4. Filtr pasmowoprzepustowy (Winzer 2004) .....                                                                                                         | 68 |
| Rys. 4.5. Przykład efektu filtrowania tercjowego przebiegu czasowego przedstawionego na rysunku 4.1 .....                                                      | 68 |
| Rys. 4.6. Schemat ideowy <i>Short – Time Fourier Transform</i> .....                                                                                           | 69 |
| Rys. 4.7. Schemat ideowy <i>Wavelet Transform</i> .....                                                                                                        | 70 |
| Rys. 4.8. Schemat funkcji bazowej - falki.....                                                                                                                 | 70 |
| Rys. 4.9. Przykład zmiany współczynnika skali falki.....                                                                                                       | 71 |
| Rys. 4.10. Przykład zmiany współczynnika przesunięcia (translacji) falki .....                                                                                 | 71 |
| Rys. 4.11. Proces aproksymacji falki do zarejestrowanego sygnału (Tariov 2009) .....                                                                           | 72 |
| Rys. 4.12. Mapa współczynników falkowych <i>C</i> dla sygnału czasowego przedstawionego na rysunku 4.1 .....                                                   | 73 |

|                                                                                                                                                                        |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Rys. 4.13. Schemat atomu Gabora.....                                                                                                                                   | 74 |
| Rys. 4.14. Atomy Gabora dopasowywane do przebiegu przedstawionego na rysunku 4.1 .....                                                                                 | 76 |
| Rys. 4.15. Mapa Wignera dla przebiegu czasowego z rysunku 4.1 .....                                                                                                    | 77 |
| Rys. 4.16. Porównanie rzeczywistego przebiegu czasowego z rysunku 4.1 i jego rekonstrukcji za pomocą atomów Gabora.....                                                | 78 |
| Rys. 4.17. Układ o jednym stopniu swobody poddany wymuszeniu kinematycznemu (Chmielewski i Zembaty 1998).....                                                          | 79 |
| Rys. 4.18. Schemat tworzenia przemieszczeniowego spektrum odpowiedzi (Chmielewski i Zembaty 1998).....                                                                 | 81 |
| Rys. 4.19. Porównanie spektra odpowiedzi dla trzęsienia ziemi (Chmielewski i Zembaty 1998).....                                                                        | 83 |
| Rys. 4.20. Spektrum odpowiedzi drgań dla strzelania momentalnego (Onderka <i>at al.</i> 2007) .....                                                                    | 84 |
| Rys. 4.21. Epicentra trzęsień ziemi w rejonie Australii w latach 1850-1997 (Sinadinovski <i>at al.</i> 2000) .....                                                     | 85 |
| Rys. 4.22. Rekomendowane dla Australii spektrum odpowiedzi i średnie spektrum odpowiedzi (Lam i Wilson 2001, Sinadinovski <i>at al.</i> 2000).....                     | 86 |
| Rys. 4.23. Spektrum odpowiedzi dla regionu 1 - Eurokod 8 (Carvalho 2008, EN 1998-1).....                                                                               | 87 |
| Rys. 4.24. Spektrum odpowiedzi dla regionu 2 - Eurokod 8 (Carvalho 2008, EN 1998-1).....                                                                               | 87 |
| Rys. 4.25. Spektrum odpowiedzi dla LGOM i GZW (Maciąg 1797) .....                                                                                                      | 89 |
| Rys. 4.26. Porównanie wzorcowych spektrów odpowiedzi z różnych obszarów z wzorcowym spektrum odpowiedzi dla GZW (Czerwionka i Tatara 2009).....                        | 89 |
| Rys. 4.27. Wzorcowe spektrum odpowiedzi dla LGOM .....                                                                                                                 | 90 |
| Rys. 4.28. Wzorcowe spektrum odpowiedzi z drgań zarejestrowanych w gruncie dla warstw nadkładu czwartorzędowego poniżej 30m (Dubieński <i>at al.</i> 2009).....        | 91 |
| Rys. 4.29. Wzorcowe spektrum odpowiedzi z drgań zarejestrowanych w gruncie dla warstw nadkładu czwartorzędowego z zakresu 30 ÷ 50m (Dubieński <i>at al.</i> 2009)..... | 91 |
| Rys. 4.30. Wzorcowe spektrum odpowiedzi z drgań zarejestrowanych w gruncie dla warstw nadkładu czwartorzędowego powyżej 50m (Dubieński <i>at al.</i> 2009).....        | 92 |
| Rys. 4.31. Skala GSI-2004 SA (Samokar 2008).....                                                                                                                       | 92 |
| Rys. 4.32. Spektrum odpowiedzi drgań wzbudzonych ruchem drogowym dla składowych poziomych (Kogut 1999).....                                                            | 95 |
| Rys. 4.33. Spektrum odpowiedzi drgań dla obiektu dwunastokondygnacyjnego (Maciąg 2006, Tatara 2008).....                                                               | 96 |
| Rys. 4.34. Prędkościowe spektrum odpowiedzi zaprezentowane w pracy (Corser 1797) .....                                                                                 | 97 |
| Rys. 4.35. Spektrum odpowiedzi dla drgań wywołanych trzęsieniem ziemi i robotami strzałowymi (Lu <i>at al.</i> 2001, Ma <i>at al.</i> 2003).....                       | 98 |
| Rys. 4.36. Sejsmogramy zasymulowanych drgań (Ma <i>at al.</i> 2003) .....                                                                                              | 98 |
| Rys. 4.37. Spektra odpowiedzi przy odpalaniu momentalnym i milisekundowym.....                                                                                         | 99 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Rys. 4.38. Zmiana spektrum odpowiedzi wraz z odległością (Dowding 1985, Onderka i Sieradzki 204) .....                                                                                                                                                                                                  | 100 |
| Rys. 4.39. Pseudoprędkościowe spektra odpowiedzi drgań podłoża zarejestrowanych na dwóch stanowiskach podczas odpalania różnych ładunków MW w tym samym surowcu .....                                                                                                                                   | 101 |
| Rys. 4.40. Pseudoprędkościowe spektra odpowiedzi obliczone dla drgań podłoża na stanowisku I przy odpalaniu różnych ładunków MW w trzech surowcach – składowa x .....                                                                                                                                   | 102 |
| Rys. 4.41. Pseudoprędkościowe spektra odpowiedzi obliczone dla drgań zarejestrowane w tym samym punkcie pomiarowym w otoczeniu kopalni dolomitu I, wzbudzanych odpaleniem serii ładunków MW w dwóch strefach przedzielonych uskokiem – składowa x (linia ciągła strefa I, a przerywana strefa II) ..... | 103 |
| Rys. 4.42. Pseudoprędkościowe spektra odpowiedzi obliczone dla drgań podłoża zarejestrowane podczas odpalania dużej ilości ładunków MW w złożu dolomitu II .....                                                                                                                                        | 103 |
| Rys. 4.43. Pseudoprędkościowe spektra odpowiedzi drgań podłoża zarejestrowane podczas odpalania serii ładunków MW w złożu granitu .....                                                                                                                                                                 | 104 |
| Rys. 4.44. Pseudoprędkościowe spektrum odpowiedzi drgań zarejestrowanych na fundamentach dwóch obiektów oddalonych od siebie o 50 m i na jednym stanowisku w podłożu .....                                                                                                                              | 104 |
| Rys. 4.45. Pseudoprędkościowe spektra odpowiedzi drgań wzbudzanych odpaleniem serii ładunków MW w różnych złożach .....                                                                                                                                                                                 | 106 |
| Rys. 5.1. Aparatura UVS 1608 DIN .....                                                                                                                                                                                                                                                                  | 110 |
| Rys. 5.2. Mierniki UVS DIN – dwu i trójskładowy (widok), sposób montażu na fundamencie .....                                                                                                                                                                                                            | 111 |
| Rys. 6.1. Sejsmogramy drgań podłoża i fundamentu - stanowiska nr A1 i nr A1' (Winzer 2004) .....                                                                                                                                                                                                        | 119 |
| Rys. 6.2. Legenda do oznaczeń używanych w histogramach .....                                                                                                                                                                                                                                            | 120 |
| Rys. 6.3. Wynik analizy drgań metodą MP w postaci map Wignera Ville'a – drgania zarejestrowane w podłożu, a wzbudzane w czasie odpalania ładunków MW z różnym opóźnieniem milisekundowym .....                                                                                                          | 121 |
| Rys. 6.4. Wynik analizy drgań metodą MP w postaci map Wignera Ville'a – drgania zarejestrowane w podłożu, a wzbudzane w czasie odpalania ładunków MW z różnym opóźnieniem milisekundowym .....                                                                                                          | 122 |
| Rys. 6.5. Wynik analizy drgań metodą MP w postaci map przestrzennych – drgania zarejestrowane w podłożu, a wzbudzane w czasie odpalania ładunków MW z różnym opóźnieniem milisekundowym .....                                                                                                           | 123 |
| Rys. 6.6. Histogramy atomów Gabora dla drgań podłoża wzbudzanych poszczególnymi opóźnieniami .....                                                                                                                                                                                                      | 124 |
| Rys. 6.7. Histogramy atomów Gabora dla drgań podłoża wzbudzanych poszczególnymi opóźnieniami .....                                                                                                                                                                                                      | 125 |

|                                                                                                                                                                                                    |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Rys. 6.8. Wynik analizy drgań metodą MP w postaci map Wignera Ville'a – drgania zarejestrowane na fundamencie, a wzbudzone w czasie odpalania ładunków MW z różnym opóźnieniem milisekundowym..... | 128 |
| Rys. 6.9. Wynik analizy drgań metodą MP w postaci map Wignera Ville'a – drgania zarejestrowane na fundamencie, a wzbudzone w czasie odpalania ładunków MW z różnym opóźnieniem milisekundowym..... | 128 |
| Rys. 6.10. Wynik analizy drgań metodą MP w postaci map przestrzennych – drgania zarejestrowane na fundamencie, a wzbudzone w czasie odpalania ładunków MW z różnym opóźnieniem milisekundowym..... | 129 |
| Rys. 6.11. Histogramy atomów Gabora dla drgań fundamentu wzbudzanych poszczególnymi opóźnieniami .....                                                                                             | 130 |
| Rys. 6.12. Histogramy atomów Gabora dla drgań fundamentu wzbudzanych poszczególnymi opóźnieniami .....                                                                                             | 131 |
| Rys. 6.13. Porównanie struktury drgań przy przejściu z podłoża do fundamentu dla wybranych opóźnień .....                                                                                          | 133 |
| Rys. 6.14. Pseudoprędkościowe spektra odpowiedzi drgań zarejestrowanych na stanowisku A1 – składowa x .....                                                                                        | 135 |
| Rys. 6.15. Pseudoprędkościowe spektra odpowiedzi drgań zarejestrowanych na stanowisku A2 – składowa x .....                                                                                        | 136 |
| Rys. 6.16. Porównanie PSV dla stanowiska A1 i A2 dla różnych opóźnień – składowa x.....                                                                                                            | 137 |
| Rys. 6.17. Pseudoprędkościowe spektra odpowiedzi drgań zarejestrowanych na stanowisku A1' – składowa x .....                                                                                       | 138 |
| Rys. 6.18. Porównanie PSV dla stanowiska A1 i A1' dla różnych opóźnień – składowa x .....                                                                                                          | 139 |
| Rys. 6.19. Względna moc drgań na stanowisku A1 – poziom odniesienia: odpalenie pojedynczego ładunku MW .....                                                                                       | 141 |
| Rys. 6.20. Względna moc drgań na stanowisku A2 – poziom odniesienia: odpalenie pojedynczego ładunku MW .....                                                                                       | 141 |
| Rys. 6.21. Względna moc drgań na stanowisku A1' – poziom odniesienia: odpalenie pojedynczego ładunku MW .....                                                                                      | 142 |
| Rys. 6.22. Wartości współczynnika tłumienia drgań przy przejściu drgań z podłoża do obiektu w zależności od częstotliwości i zastosowanego opóźnienia milisekundowego .....                        | 143 |
| Rys. 6.23. Sejsmogramy drgań podłoża i fundamentu obiektu .....                                                                                                                                    | 145 |
| Rys. 6.24. Wynik analizy drgań metodą MP w postaci map Wignera Ville'a – drgania zarejestrowane w podłożu, a wzbudzone w czasie odpalania ładunków MW z różnym opóźnieniem milisekundowym .....    | 146 |

|                                                                                                                                                                                                                           |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Rys. 6.25. Wynik analizy drgań metodą MP w postaci map Wignera Ville'a – drgania zarejestrowane w podłożu, a wzbudzone w czasie odpalania ładunków MW z różnym opóźnieniem milisekundowym.....                            | 147 |
| Rys. 6.26. Wynik analizy drgań metodą MP w postaci map przestrzennych – drgania zarejestrowane w podłożu, a wzbudzone w czasie odpalania ładunków MW z różnym opóźnieniem milisekundowym.....                             | 148 |
| Rys. 6.27. Histogramy atomów Gabora dla drgań podłoża wzbudzanych poszczególnymi opóźnieniami .....                                                                                                                       | 149 |
| Rys. 6.28. Wynik analizy drgań metodą MP w postaci map Wignera Ville'a – drgania zarejestrowane na fundamencie, a wzbudzone w czasie odpalania ładunków MW z różnym opóźnieniem milisekundowym.....                       | 151 |
| Rys. 6.29. Wynik analizy drgań metodą MP w postaci map Wignera Ville'a – drgania zarejestrowane na fundamencie, a wzbudzone w czasie odpalania ładunków MW z różnym opóźnieniem milisekundowym.....                       | 152 |
| Rys. 6.30. Wynik analizy drgań metodą MP w postaci map przestrzennych – drgania zarejestrowane na fundamencie, a wzbudzone w czasie odpalania ładunków MW z różnym opóźnieniem milisekundowym.....                        | 152 |
| Rys. 6.31. Histogramy atomów Gabora dla drgań fundamentu wzbudzanych poszczególnymi opóźnieniami .....                                                                                                                    | 153 |
| Rys. 6.32. Wynik analizy drgań metodą MP w postaci map Wignera Ville'a – drgania zarejestrowane na ścianie nośnej na piętrze obiektu, a wzbudzone w czasie odpalania ładunków MW z różnym opóźnieniem milisekundowym..... | 155 |
| Rys. 6.33. Wynik analizy drgań metodą MP w postaci map Wignera Ville'a – drgania zarejestrowane na ścianie nośnej na piętrze obiektu, a wzbudzone w czasie odpalania ładunków MW z różnym opóźnieniem milisekundowym..... | 156 |
| Rys. 6.34. Wynik analizy drgań metodą MP w postaci map przestrzennych – drgania zarejestrowane na ścianie nośnej na piętrze obiektu, a wzbudzone w czasie odpalania ładunków MW z różnym opóźnieniem milisekundowym.....  | 156 |
| Rys. 6.35. Histogramy atomów Gabora dla drgań ściany nośnej na piętrze obiektu wzbudzanych poszczególnymi opóźnieniami.....                                                                                               | 157 |
| Rys. 6.36. Porównanie struktury drgań przy przejściu z podłoża do fundamentu i na piętro obiektu dla opóźnienia 25 ms.....                                                                                                | 159 |
| Rys. 6.37. Pseudoprędkościowe spektrum odpowiedzi drgań zarejestrowanych na stanowisku B1 – składowa x.....                                                                                                               | 160 |
| Rys. 6.38. Pseudoprędkościowe spektrum odpowiedzi drgań zarejestrowanych na stanowisku B1' – składowa x.....                                                                                                              | 162 |
| Rys. 6.39. Porównanie PSV dla stanowiska 1 i 1' dla różnych opóźnień – składowa x.....                                                                                                                                    | 163 |

|                                                                                                                                                                                                      |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Rys. 6.40. Względna moc drgań na stanowisku B1 – poziom odniesienia: odpalenie pojedynczego ładunku MW .....                                                                                         | 164 |
| Rys. 6.41. Względna moc drgań na stanowisku B1' – poziom odniesienia: odpalenie pojedynczego ładunku MW .....                                                                                        | 164 |
| Rys. 6.42. Wartości współczynnika tłumienia drgań przy przejściu drgań z podłoża do obiektu w zależności od częstotliwości i zastosowanego opóźnienia milisekundowego .....                          | 166 |
| Rys. 6.43. Sejsmogramy drgań podłoża i fundamentu dla różnych opóźnień milisekundowych – ładunek całkowity .....                                                                                     | 168 |
| Rys. 6.44. Sejsmogramy drgań podłoża i fundamentu dla różnych opóźnień milisekundowych – ładunek dzielony .....                                                                                      | 168 |
| Rys. 6.45. Wynik analizy drgań metodą MP w postaci map Wignera Ville'a – drgania zarejestrowane w podłożu, a wzbudzone w czasie odpalania ładunków MW z różnym opóźnieniem milisekundowym .....      | 170 |
| Rys. 6.46. Wynik analizy drgań metodą MP w postaci map Wignera Ville'a – drgania zarejestrowane w podłożu, a wzbudzone w czasie odpalania ładunków MW z różnym opóźnieniem milisekundowym .....      | 171 |
| Rys. 6.47. Wynik analizy drgań metodą MP w postaci map przestrzennych – drgania zarejestrowane w podłożu, a wzbudzone w czasie odpalania ładunków MW z różnym opóźnieniem milisekundowym .....       | 172 |
| Rys. 6.48. Histogramy atomów Gabora dla drgań podłoża wzbudzanych poszczególnymi opóźnieniami dla ładunku ciągłego .....                                                                             | 173 |
| Rys. 6.49. Histogramy atomów Gabora dla drgań podłoża wzbudzanych poszczególnymi opóźnieniami dla ładunku dzielonego .....                                                                           | 174 |
| Rys. 6.50. Wynik analizy drgań metodą MP w postaci map Wignera Ville'a – drgania zarejestrowane na fundamencie, a wzbudzone w czasie odpalania ładunków MW z różnym opóźnieniem milisekundowym ..... | 176 |
| Rys. 6.51. Wynik analizy drgań metodą MP w postaci map Wignera Ville'a – drgania zarejestrowane na fundamencie, a wzbudzone w czasie odpalania ładunków MW z różnym opóźnieniem milisekundowym ..... | 177 |
| Rys. 6.52. Wynik analizy drgań metodą MP w postaci map przestrzennych – drgania zarejestrowane na fundamencie, a wzbudzone w czasie odpalania ładunków MW z różnym opóźnieniem milisekundowym .....  | 178 |
| Rys. 6.53. Histogramy atomów Gabora dla drgań fundamentu wzbudzanych poszczególnymi opóźnieniami dla ładunku ciągłego .....                                                                          | 179 |
| Rys. 6.54. Histogramy atomów Gabora dla drgań fundamentu wzbudzanych poszczególnymi opóźnieniami dla ładunku dzielonego .....                                                                        | 180 |
| Rys. 6.55. Porównanie struktury drgań przy przejściu z podłoża do fundamentu .....                                                                                                                   | 182 |

|                                                                                                                                                                                                |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Rys. 6.56. Zestawienie rozkładu energii w sygnałach drgań wzbudzonych odpalaniem ładunków z opóźnieniem 25 ms systemem nieelektrycznym i elektronicznym .....                                  | 183 |
| Rys. 6.57. Pseudoprędkościowe spektra odpowiedzi drgań podłoża – składowa x.....                                                                                                               | 185 |
| Rys. 6.58. Pseudoprędkościowe spektra odpowiedzi drgań fundamentu – składowa x.....                                                                                                            | 187 |
| Rys. 6.59. Pseudoprędkościowe spektra odpowiedzi drgań wzbudzanych odpalaniem ładunków z różnym opóźnieniem milisekundowym – porównanie dla podłoża i fundamentu .....                         | 188 |
| Rys. 6.60. Pseudoprędkościowe spektra odpowiedzi drgań, zarejestrowanych w podłożu i na fundamencie obiektu, wzbudzanych odpalaniem ładunków MW ciągłego i dzielonego z opóźnieniem 33 ms..... | 189 |
| Rys. 6.61. Porównanie PSV drgań podłoża i fundamentu przy odpaleniu ładunku MW ciągłego i dzielonego z opóźnieniem 33 ms .....                                                                 | 190 |
| Rys. 6.62. Porównanie PSV drgań podłoża i fundamentu dla opóźnieniem 25 ms zadanego systemem nieelektrycznym i elektronicznym.....                                                             | 191 |
| Rys. 6.63. Względna moc drgań dla sygnału zarejestrowanego w podłożu, poziom odniesienia: odpalenie pojedynczego ładunku MW .....                                                              | 192 |
| Rys. 6.64. Względna moc drgań dla sygnału zarejestrowanego na fundamencie, poziom odniesienia: odpalenie pojedynczego ładunku MW.....                                                          | 192 |
| Rys. 6.65. Wartości współczynnika tłumienia drgań przy przejściu drgań z podłoża do obiektu w zależności od częstotliwości i zastosowanego opóźnienia milisekundowego .....                    | 193 |
| Rys. 7.1. Przebieg składowej poziomej prędkości drgań w podłożu .....                                                                                                                          | 202 |
| Rys. 7.2. Przebieg składowej poziomej prędkości drgań na fundamencie.....                                                                                                                      | 202 |
| Rys. 7.3. Dyskretyzacja modelu numerycznego.....                                                                                                                                               | 203 |
| Rys. 7.4. Mapa pionowych naprężeń pierwotnych w górotworze .....                                                                                                                               | 204 |
| Rys. 7.5. Schemat odpalania ładunków w postaci przyłożonego obciążenia do krawędzi skarpy .....                                                                                                | 205 |
| Rys. 7.6. Przebieg składowej poziomej prędkości drgań w podłożu uzyskany w analizie numerycznej .....                                                                                          | 206 |
| Rys. 7.7. Przebieg składowej poziomej prędkości drgań na fundamencie uzyskany w analizie numerycznej .....                                                                                     | 206 |



## Spis tabel

|                                                                                                                 |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabela 2.1. Uwagi na temat wyboru czasu opóźnienia pomiędzy ładunkami lub szeregami (Müller i Böhnke 2005)..... | 34  |
| Tabela 2.2. Rekomendowane opóźnienie dla danego rodzaju skały (Modrzejewski 2006).....                          | 40  |
| Tabela 5.1. Charakterystyka aparatury pomiarowej UVS 1608 DIN .....                                             | 112 |
| Tabela 5.2. Parametry ładunków MW zastosowane w seriach.....                                                    | 113 |
| Tabela 5.3. Wielkości użytych ładunków MW zastosowane w seriach.....                                            | 116 |
| Tabela 6.1. Wyniki pomiarów intensywności drgań dla kopalni gipsu A.....                                        | 118 |
| Tabela 6.2. Wyniki pomiarów intensywności drgań.....                                                            | 144 |
| Tabela 6.3. Wyniki pomiarów intensywności drgań.....                                                            | 167 |
| Tabela 7.1. Parametry mechaniczne masywu skalnego .....                                                         | 203 |

## **Załączniki**

- Załącznik I – wyniki analizy drgań zarejestrowanych w otoczeniu kopalni gipsu A dla opóźnienie 0 ms – płyta CD
- Załącznik II – wyniki analizy drgań zarejestrowanych w otoczeniu kopalni gipsu A dla opóźnienie 17 ms – płyta CD
- Załącznik III – wyniki analizy drgań zarejestrowanych w otoczeniu kopalni gipsu A dla opóźnienie 25 ms – płyta CD
- Załącznik IV – wyniki analizy drgań zarejestrowanych w otoczeniu kopalni gipsu A dla opóźnienie 42 ms – płyta CD
- Załącznik V – wyniki analizy drgań zarejestrowanych w otoczeniu kopalni gipsu A dla opóźnienie 67 ms – płyta CD
- Załącznik VI – wyniki analizy drgań zarejestrowanych w otoczeniu kopalni wapienia B dla opóźnienie 0 ms – płyta CD
- Załącznik VII – wyniki analizy drgań zarejestrowanych w otoczeniu kopalni wapienia B dla opóźnienie 15 ms – płyta CD
- Załącznik VIII – wyniki analizy drgań zarejestrowanych w otoczeniu kopalni wapienia B dla opóźnienie 20 ms – płyta CD
- Załącznik IX – wyniki analizy drgań zarejestrowanych w otoczeniu kopalni wapienia B dla opóźnienie 25 ms – płyta CD
- Załącznik X – wyniki analizy drgań zarejestrowanych w otoczeniu kopalni wapienia B dla opóźnienie 25 ms – płyta CD
- Załącznik XI – wyniki analizy drgań zarejestrowanych w otoczeniu kopalni wapienia B dla opóźnienie 30 ms – płyta CD
- Załącznik XII – wyniki analizy drgań zarejestrowanych w otoczeniu kopalni wapienia B dla opóźnienie 33 ms – płyta CD
- Załącznik XIII – wyniki analizy drgań zarejestrowanych w otoczeniu kopalni wapienia B dla opóźnienie 33 ms – płyta CD
- Załącznik XIV – wyniki analizy drgań zarejestrowanych w otoczeniu kopalni wapienia B dla opóźnienie 42 ms – płyta CD
- Załącznik XV – wyniki analizy drgań zarejestrowanych w otoczeniu kopalni wapienia B dla opóźnienie 67 ms – płyta CD