

*Jan Winzer**

WPŁYW OPÓŹNIEŃ MILISEKUNDOWYCH PRZY PROWADZENIU STRZELAŃ EKSPLOATACYJNYCH NA CZĘSTOTLIWOŚCIOWE CHARAKTERYSTYKI DRGAŃ GRUNTU I BUDYNKÓW

1. Wprowadzenie

Dający się zauważyć w ostatnim okresie dynamiczny rozwój techniki strzelniczej opartej na mechanicznym załadunku MW do otworów oraz na inicjowaniu ładunków systemami nieelektrycznymi stwarza nowe możliwości dla masowego urabiania skał w kopalniach odkrywkowych za pomocą strzelania milisekundowego metodą długich otworów.

Przy powszechnie stosowanym dotychczas elektrycznym systemie odpalania ładunków MW dobór opóźnień milisekundowych do lokalnych warunków geologiczno-górnictwowych ograniczał się do czasu 25 ms lub jego krotności.

Zastosowanie systemu nieelektrycznego stwarza bardzo szerokie możliwości powiększenia wielkości odpalanych serii przez zwiększenie liczby możliwych do odpalenia otworów. Uzyskuje się to przede wszystkim dzięki zastosowaniu do opóźnień powierzchniowych konektorów o 7 różnych interwałach czasowych: 0, 17, 25, 42, 67, 109 i 176 ms, co w porównaniu do 25 ms przy odpalaniu elektrycznym stanowi zauważalny postęp. Z drugiej strony w systemach nieelektrycznych, szczególnie w odstrzałach wieloszeregowych, może dochodzić do nakładania się opóźnień, a zastosowane rodzaje konektorów nie mają wiele wspólnego z rzeczywistym czasem opóźnień między poszczególnymi ładunkami MW. Prawidłowo zaprojektowane strzelanie pozwala eliminować tego typu zagrożenia, ale może ono zakładać opóźnienie praktycznie dowolne. Dlatego też potrzebą chwili stało się poszukiwanie optymalnych opóźnień milisekundowych, które pozwolą w konkretnych warunkach na odpalanie dużych liczb otworów, minimalizując jednocześnie efekt sejsmiczny strzelania [12].

Optymalizacja opóźnienia międzystrzałowego pod kątem ograniczenia szkodliwego oddziaływania na obiekty zlokalizowane w otoczeniu kopalń odkrywkowych jest nierozdzielnie związana z charakterystyką drgań. Szkodliwość drgań jest oceniana za pomocą różnego rodzaju skal oddziaływania dynamicznego, których różnorodność jest podyktowana

* Wydział Górnictwa i Geoinżynierii, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków

między innymi specyfiką budownictwa w poszczególnych krajach. Skale te łączy zgodność co do parametrów opisujących drgania. Generalnie stosuje się dwa zasadnicze parametry: pierwszym jest intensywność wyrażana wartościami maksymalnymi przemieszczenia, prędkości lub przyspieszenia, drugim częstotliwość drgań. Przykładowo norma PN-85/B-02170 dopuszcza stosowanie do przybliżonej oceny szkodliwości drgań skal SWD I i SWD II, które oparte są właśnie na wymienionych wcześniej dwóch parametrach drgań [1, 4, 6].

Częstotliwość drgań niejednokrotnie determinuje ocenę szkodliwości, gdyż przesunięcie drgań na skali w rejon niekorzystnych częstotliwości może niwelować osiągnięte obniżenie intensywności, a nawet pogorszyć efekt [7, 10].

Równie ważnym elementem badań jest określenie przenoszenia drgań z gruntu (podłoża) do budynku. Zmiana charakteru drgań wpływa w istotny sposób na to zjawisko, dlatego też należy zwrócić szczególną uwagę na wpływ stosowanych opóźnień milisekundowych na charakterystyki częstotliwościowe drgań.

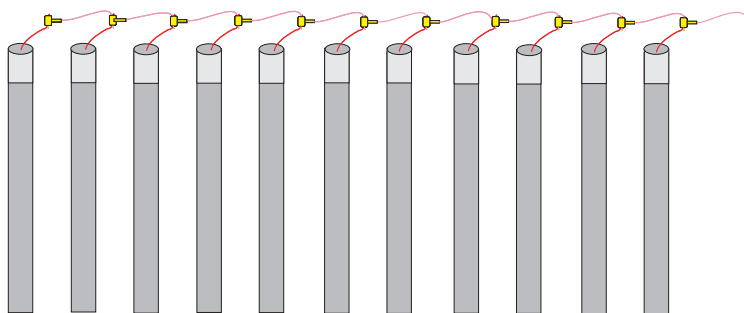
Spostrzeżenia te były podstawą podjęcia badań mających na celu określenie wpływu opóźnień milisekundowych, zastosowanych przy strzelaniu długimi otworami, na częstotliwościowe charakterystyki drgań gruntu i ochranianych obiektów. Badania zostały przeprowadzone w warunkach strzelań przemysłowych (złóże gipsów) w roku 2000 przez Katedrę Górnictwa Odkrywkowego [12].

2. Założenia do metodyki i przeprowadzenie badań kopalnianych

Celem badań było określenie zmienności charakterystyk częstotliwościowych drgań wzbudzanych w otaczającym środowisku skalnym ładunkami MW umieszczonymi w długich otworach, odpalanych z różnym opóźnieniem milisekundowym [12].

Założeniem podstawowym dla uzyskania wyników przydatnych w praktyce górniczej było przeprowadzenie badań w warunkach strzelań eksploatacyjnych (produkcyjnych). W poszczególnych seriach stałe opóźnienie między ładunkami MW w otworach zadawane było na powierzchni łącznikami opóźniającymi o interwałach czasowych: 17, 25, 42 i 67 ms.

Długość otworów wynosiła 11÷13 m, a ich liczba w serii — 11 sztuk. Schemat odpalania serii otworów strzałowych przedstawiono na rysunku 1.

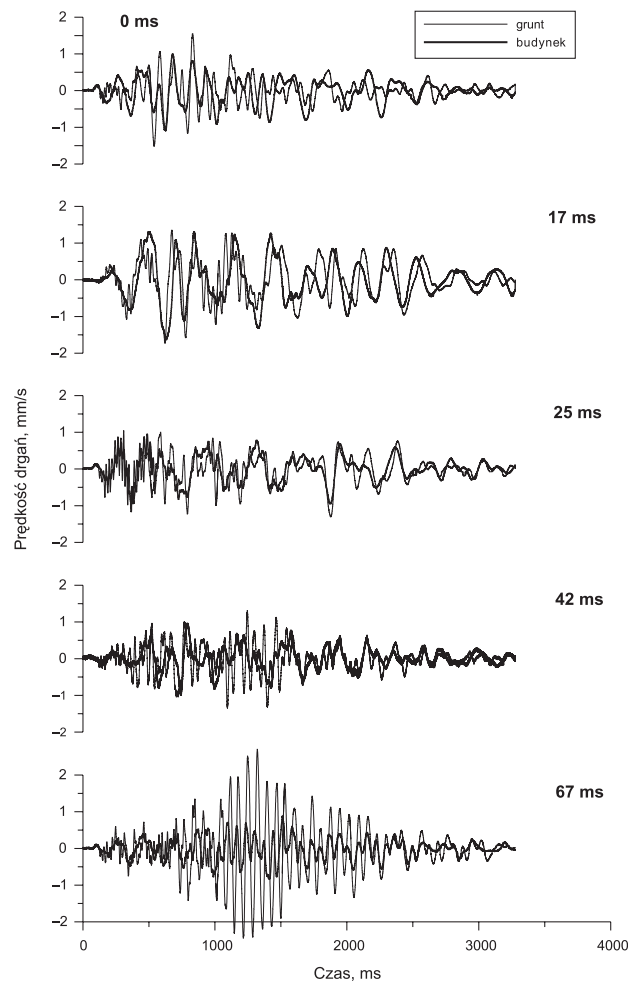


Rys. 1. Odpalanie serii otworów strzałowych z opóźnieniem powierzchniowym 42 ms

Ładunki MW w poszczególnych seriach doświadczalnych wynosiły:

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

Do badań zastosowano rejestrator przebiegu drgań UVS 1608 DIN (ABEM AB Szwecja) wyposażony w sejsmometry typu DIN z elektronicznym układem kompensacji częstotliwości (płaska charakterystyka w zakresie $1 \div 1000$ Hz). Pomiary wykonywano jednocześnie na gruncie (stanowisko 1) i fundamencie budynku (stanowisko 1'). Przykładowe sejsmogramy zarejestrowanych drgań, dla różnych opóźnień milisekundowych, przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Sejsmogramy drgań gruntu i fundamentu budynku — składowa pozioma [11]

Badania charakterystyk częstotliwościowych rejestrowanych drgań obejmowały zarówno drgania gruntu, jak i budynku. Prowadzone były w trzech kierunkach:

- 1) wpływu stosowanych opóźnień milisekundowych na zmianę widma rejestrowanych drgań przy przyjęciu za poziom odniesienia widma drgań wzbudzanych pojedynczym ładunkiem MW;
- 2) porównania widma rejestrowanych drgań przy stosowaniu do strzelania różnych opóźnień milisekundowych;
- 3) wpływu stosowanych opóźnień milisekundowych na przenoszenie się drgań z gruntu do budynku.

Jako punkt odniesienia do analiz porównawczych przyjęto efekt sejsmiczny uzyskany z odpalenia pojedynczego ładunku MW. Charakterystyka drgań zarejestrowanych w czasie takiego strzelania daje sygnał niezakłócony w przeciwieństwie do odpalania milisekundowego, w którym następuje dodawanie kolejnych impulsów. Sygnał taki można przyjąć jako charakterystyczny i dla środowiska skalnego na drodze fal wzbudzanych strzelaniem i dla podłoża pod budynkiem [11].

3. Analiza przebiegów czasowych

Najczęściej stosowanym rodzajem analizy sygnałów jest analiza częstotliwościowa, zwana też analizą widmową. Przyjmując pewne uproszczenia, można założyć, że każdy sygnał poliharmoniczny (tj. składający się z wielu sygnałów o różnych częstotliwościach) można rozłożyć na sygnały monoharmoniczne (tj. sygnały zawierające tylko jedną częstotliwość). Analiza widmowa służy zatem do badania struktury harmonicznej szeregu czasowego, a jej celem jest dekompozycja oryginalnego szeregu na podstawowe funkcje: sinus i cosinus o różnych częstotliwościach, oraz określenie, które z nich są szczególnie istotne w budowaniu obrazu drgań. Zmienność amplitudy w zależności od częstotliwości nazywamy widmem amplitudowym lub spektrum częstotliwości [5].

Jedną z najbardziej popularnych i wydajnych procedur spotykanych w dziedzinie cyfrowego przetwarzania sygnałów jest dyskretne przekształcenie Fouriera DFT (ang. *Discrete Fourier Transform*). DFT jest procedurą matematyczną używaną do wyznaczania zawartości częstotliwościowej sygnału dyskretnego.

Tym, czym jest analiza widmowa przebiegu czasowego w dziedzinie częstotliwości, w dziedzinie czasu jest filtracja. Polega ona na wybraniu z sygnału, za pomocą filtra analogowego lub cyfrowego, tylko składowych mieszczących się w określonym paśmie, tj. w określonym przedziale częstotliwości. Dalszej analizie dokonuje się na przebiegu czasowym powstałym w wyniku filtracji [5].

Analiza filtracyjna sygnału pomiarowego dokonuje jego podzielenia na elementy składowe zawarte w określonych pasmach częstotliwości. Filtr pasmowoprzepustowy przenosi tylko pewne określone częstotliwości, tłumiąc pozostałe, dlatego też wyniki pomiarów drgań wzbudzonych w czasie strzelań doświadczalnych zostały poddane analizie z zastosowaniem [12]:

- analizy widmowej drgań z zastosowaniem algorytmu FFT,
- filtrowania tercjowego.

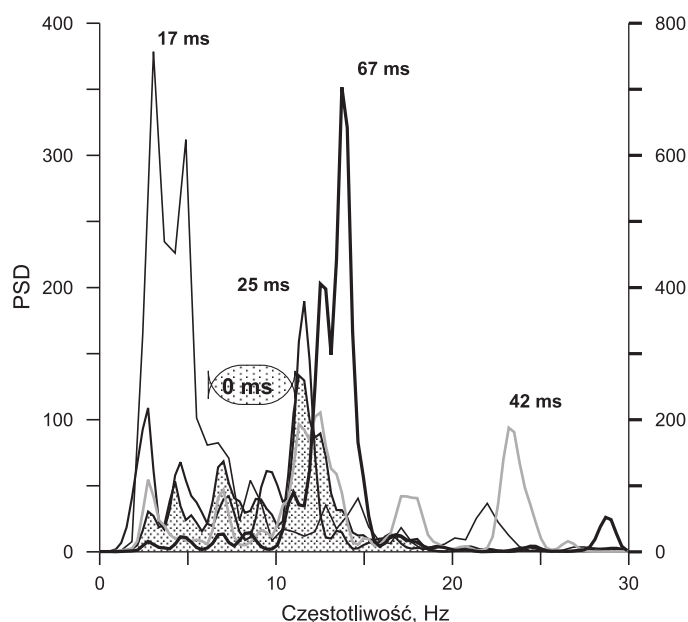
3.1. Analiza widmowa FFT

Zarejestrowane w czasie strzelań doświadczalnych drgania zostały poddane analizie widmowej, która miała na celu zbadanie, jakie częstotliwości dominują w budowaniu złożonego obrazu rejestrowanego zjawiska. Obliczenia przeprowadzono, korzystając z algorytmu FFT.

Wpływ opóźnienia milisekundowego na częstotliwości drgań najlepiej przedstawiają krzywe wynikowe analizy FFT dla serii odpalanych z opóźnieniem 17, 25, 42 i 67 ms:

- rysunek 3 — stanowisko 1, składowa pozioma x ,
- rysunek 4 — stanowisko 1' (budynek), składowa pozioma x .

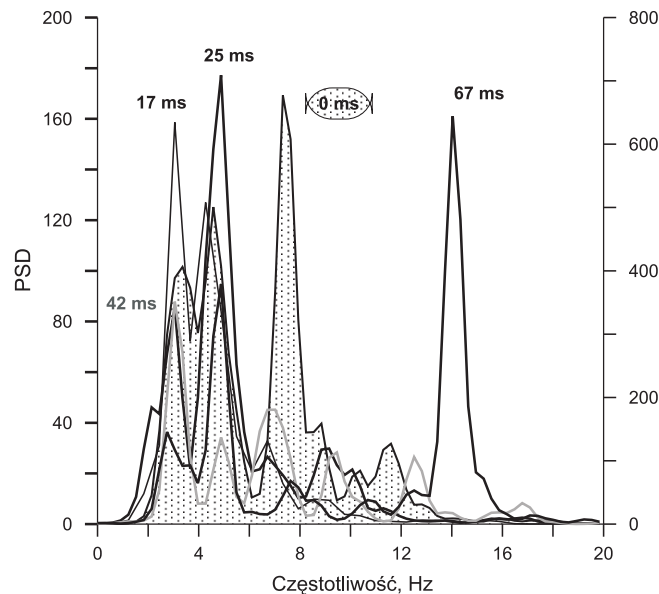
Na rysunkach, w celu zwiększenia czytelności, zastosowano narastającą grubość linii ze wzrostem opóźnienia milisekundowego oraz dodatkowo wprowadzono drugą oś rzędnych (z prawej strony wykresu) dla pokazania zmienności krzywych przy dominującej zdecydowanie jednej z nich (w tym przypadku opóźnienie 67 ms dominuje nad innymi — dwukrotnie przewyższając oś).



Rys. 3. Analiza FFT drgań gruntu — stanowisko 1, składowa pozioma x [12]

Na stanowisku 1 (rys. 3) dominujące częstotliwości zmieniały się w zakresie:

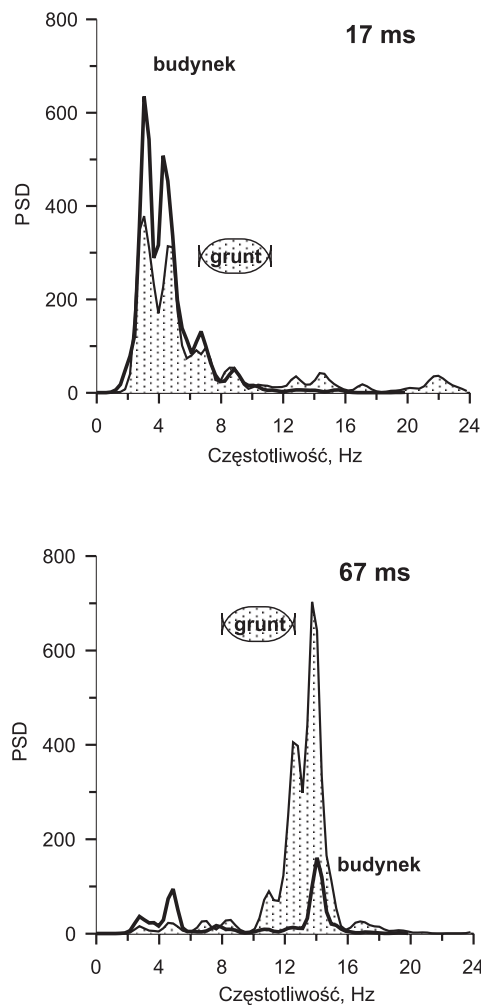
- od 3,1 i 4,6 Hz dla 17 ms,
- przez 11,9 Hz dla 0 ms i 25 ms i 13,7 Hz dla 67 ms,
- aż po 23,2 Hz dla 42 ms.



Rys. 4. Analiza FFT drgań budynku — stanowisko 1', składowa pozioma x [12]

Na stanowisku 1' (rys. 4) zlokalizowanym na fundamencie budynku występuje również istotna zmienność dominujących częstotliwości (tym razem zdecydowanie dominuje krzywa opóźnienia 17 ms — dlatego dodatkowa oś rzędnych z prawej strony wykresu dotyczy opóźnienia 17 ms, czterokrotnie przewyższającego oś). Na rysunku tym widać, że wszystkie opóźnienia, z wyjątkiem 67 ms, spowodowały przesunięcie dominujących częstotliwości drgań fundamentu w rejon niższych częstotliwości (4,9 Hz) w stosunku do charakterystycznej dla opóźnienia 0 ms (7,9 Hz). Należy dodać, że częstotliwość 4,9 Hz również występuje w widmie opóźnienia 0 ms. Krzywa opóźnienia 67 ms pozostaje w dominującej częstotliwości 14,3 Hz, chociaż część widma została przesunięta w kierunku wartości niższych, które dominują w widmie drgań budynku. Taka zmienność częstotliwości dominujących potwierdza wagę analizowanego zagadnienia.

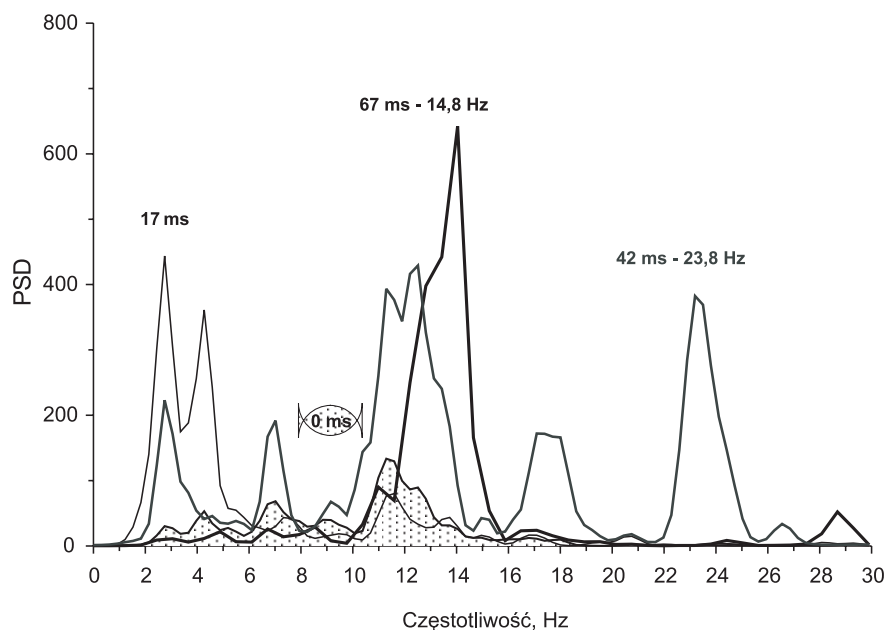
Fundament budynku niejednokrotnie stanowi swoisty filtr, który zmienia charakterystykę częstotliwościową drgań. Przykładem takiego oddziaływania jest rysunek 5, gdzie pokazano widmo drgań gruntu i budynku dla opóźnień 17 i 67 ms [11, 12]. Przy opóźnieniu 17 ms dominują niższe częstotliwości, a drgania gruntu i budynku mają praktycznie taką samą charakterystykę. Widmo częstotliwościowe wskazuje nawet na wzmocnienie częstotliwości dominujących po przejściu z gruntu do budynku, co może świadczyć o skumulowaniu energii drgań właśnie w tym zakresie częstotliwości, natomiast przy opóźnieniu 67 ms wyższe częstotliwości drgań gruntu rzędu 14 Hz ulegają silnemu tłumieniu, pozostając jednak jako dominujące wspólnie z drganiami o częstotliwości 5 Hz. Również w przypadku opóźnienia 67 ms w zakresie częstotliwości 5 Hz nastąpiło wzmocnienie drgań rejestrowanych na fundamencie w stosunku do drgań gruntu.



Rys. 5. Analiza FFT drgań gruntu i budynku [12]

Analiza widmowa strzelań tzw. jednootworowych (pojedynczy ładunek MW) umożliwia określenie widma drgań bez zakłóceń nanoszonych przez strzelanie milisekundowe. Znajomość takiego widma drgań pozwala uniknąć wzrostu intensywności drgań wywołanych rezonansem [2, 10]. Jak zauważono w czasie badań poligonowych z użyciem wibromłota [2], pewne częstotliwości drgań gruntu mogą ulec istotnemu wzmocnieniu przez mechanizm zadawania impulsów uderowych z określoną częstotliwością. Podobnie w przypadku strzelania milisekundowego występuje częstotliwość zadawania impulsów przez kolejne wzbudzenia od poszczególnych ładunków MW odpalanych w odstępach czasu. Częstotliwość ta nakłada się na widmo drgań gruntu. W takich przypadkach w widmie drgań pojawia się częstotliwość będąca „pochodną detonacji MW”. Na przykład, opóźnienie 42 ms wzbudza

częstotliwość rzędu 24 Hz, opóźnienie 67 Hz — częstotliwość 15 Hz. Zjawisko to zostało zilustrowane na rysunku 6. Na widmo drgań wzbudzonych pojedynczym ładunkiem MW naniesiono wyniki analizy dla poszczególnych opóźnień, dzięki czemu jest widoczne, jak odpalenie milisekundowe zmienia udział poszczególnych częstotliwości w widmie. Na rysunku 6 celowo pokazano widmo drgań zarejestrowanych przy opóźnieniu 17 ms, które nie potwierdza tego spostrzeżenia. Przy tym opóźnieniu zwraca uwagę duże wzmocnienie drgań o niższych częstotliwościach w stosunku do pojedynczego ładunku MW.



Rys. 6. Widmo drgań i częstotliwość strzelania milisekundowego [12]

W podsumowaniu przeprowadzonych analiz widmowych drgań rejestrowanych przy strzelaniu milisekundowym należy podkreślić, że:

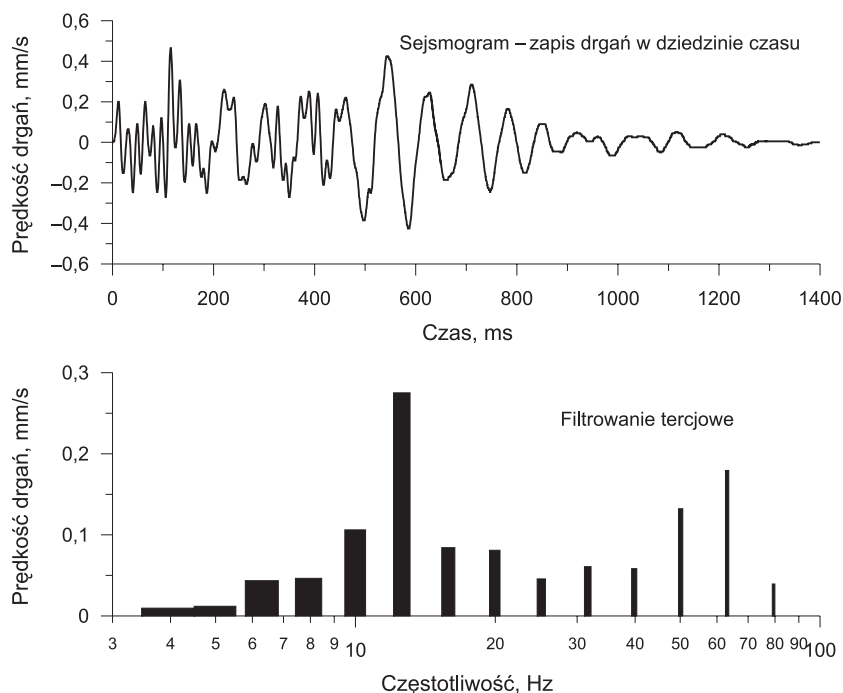
- przeprowadzone analizy potwierdziły przydatność prowadzenia analiz z zastosowaniem algorytmu FFT, które pozwalają poznać strukturę częstotliwościową drgań oraz ułatwiają w znacznym stopniu identyfikację i zrozumienie zjawisk odbiegających od przyjętych schematów;
- dokonane spostrzeżenia w wielu przypadkach potwierdzają i pogłębiają analizę wyników prowadzoną pod kątem intensywności drgań;
- o ile efekt w postaci poznania struktury częstotliwościowej drgań jest wyraźny, o tyle jego ilościowe ujęcie jest nadal trudne. Przeniesienie wyników analizy FFT, na przykład do oceny szkodliwości drgań dla obiektów, jest w sensie ilościowym dalece utrudnione.

W szczególności ten ostatni wniosek przyczynił się do dalszych poszukiwań metody pozwalającej na powiązanie struktury częstotliwościowej drgań z możliwością dokonywania oceny w aspekcie ich wpływu na otoczenie [12].

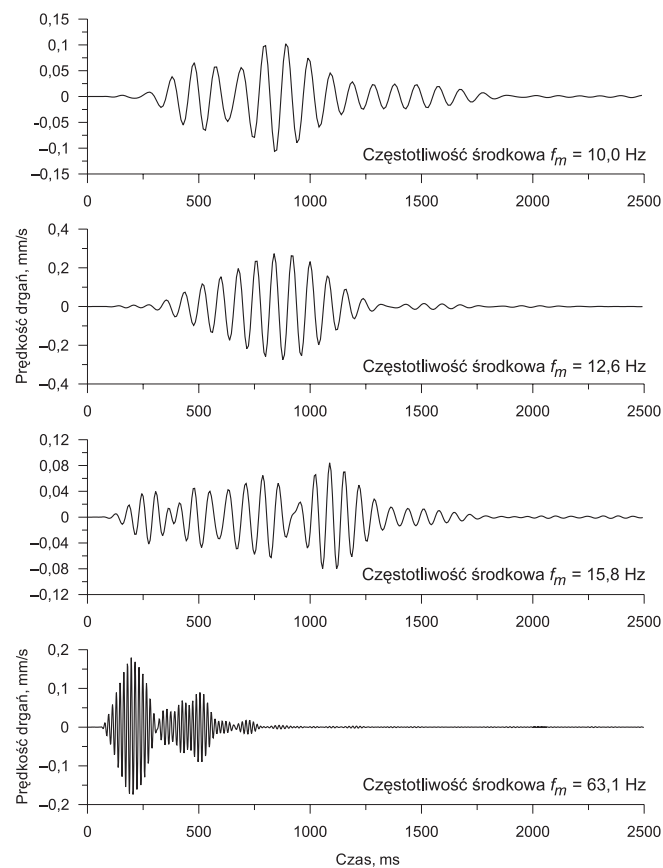
3.2. Analiza tercjowa przebiegów czasowych

W następnym etapie obliczeń przeprowadzono badanie struktury drgań z zastosowaniem filtracji tercjowej [12]. Wyniki obliczeń przedstawiono w formie graficznej w postaci histogramów wartości maksymalnych prędkości dla częstotliwości środkowych pasma tercjowego (rys. 7). Filtrowanie tercjowe pozwala nie tylko poznać strukturę rejestrowanych drgań, ale również przedstawić w dziedzinie czasu przebieg drgań o określonej częstotliwości (rys. 8). Cecha ta może być wykorzystana do badania zmienności intensywności drgań o określonej częstotliwości w dziedzinie czasu, jak również do porównań intensywności drgań (o wybranej częstotliwości) przykładowo dla gruntu i dla budynku.

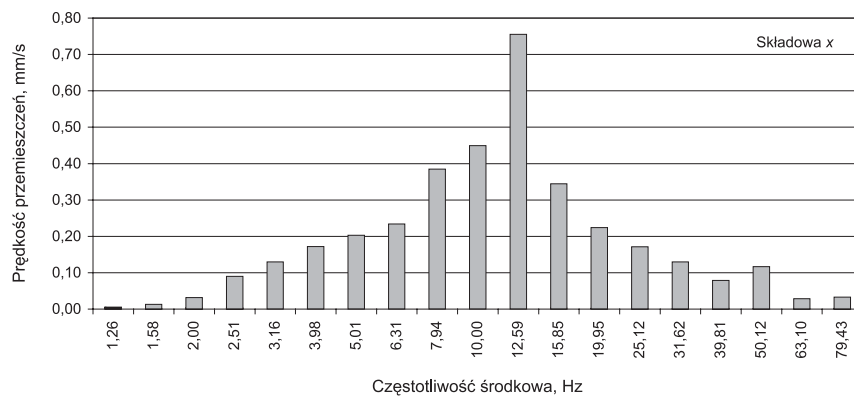
Zgodnie z przyjętą metodyką badawczą za poziom odniesienia do analiz porównawczych przyjęto efekt sejsmiczny wzbudzony odpaleniem pojedynczego ładunku MW. Wynik analizy tercjowej, czyli histogram wartości maksymalnych prędkości dla częstotliwości środkowych pasma tercjowego, przedstawiono na rysunku 9. Wynika z niego, że najwyższą intensywnością charakteryzuje się składowa drgań o częstotliwości 12,6 Hz.



Rys. 7. Analiza tercjowa drgań zarejestrowanych w czasie strzelania w kopalni wapienia

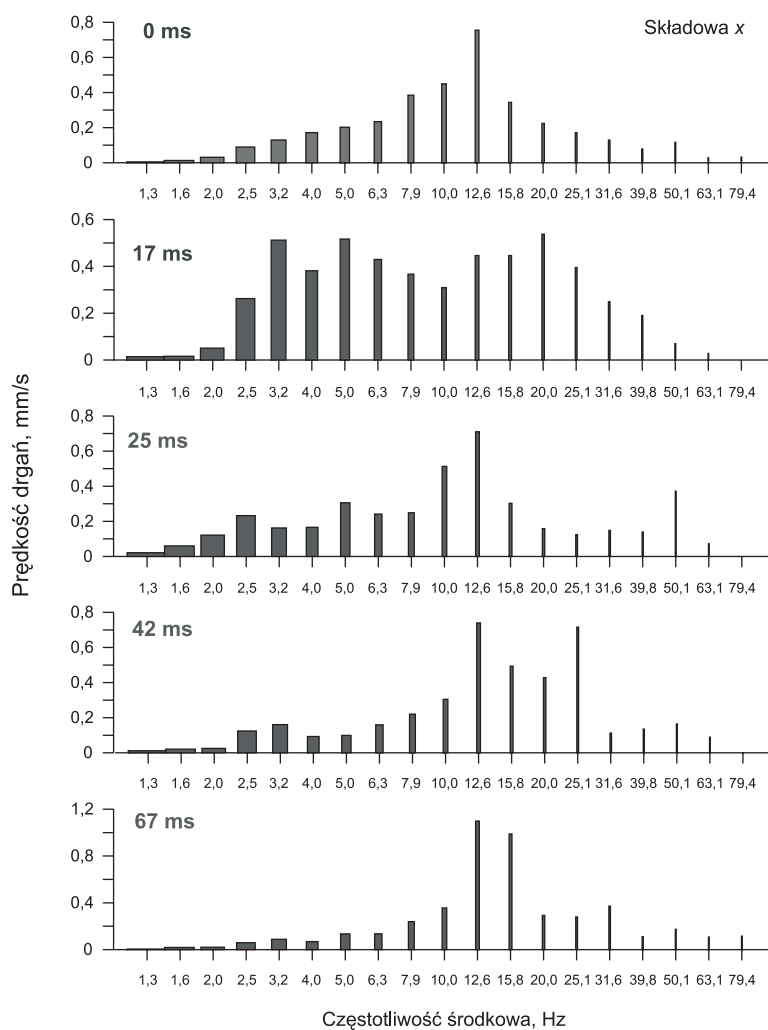


Rys. 8. Analiza tercjowa drgań zarejestrowanych w czasie strzelania w kopalni wapienia (rys. 7)



Rys. 9. Analiza tercjowa — przykładowy histogram maksymalnych prędkości dla częstotliwości środkowych pasma tercjowego (stanowisko 1 — pojedynczy ładunek MW)

Wyniki analizy terejowej w postaci histogramów posłużyły do badania zmienności charakterystyk częstotliwościowych drgań wzbudzonych odpalaniem ładunków MW z różnym opóźnieniem milisekundowym. Na rysunku 10 zestawiono histogramy analizy terejowej drgań zarejestrowanych na stanowisku 1 (składowa x).



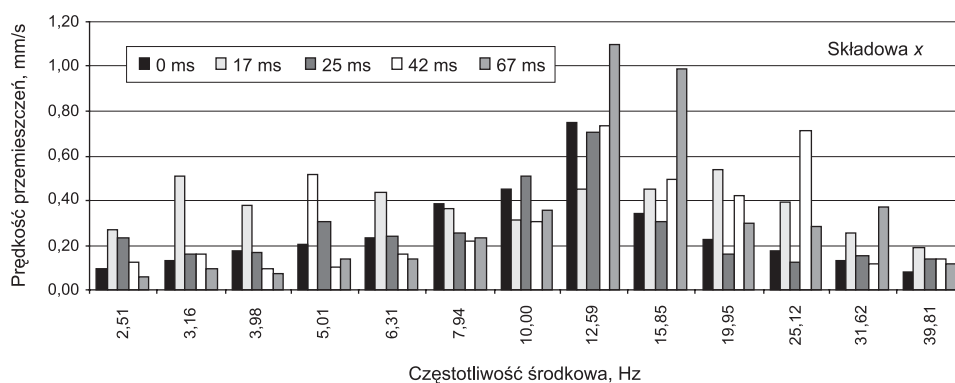
Rys. 10. Histogram maksymalnych prędkości drgań dla częstotliwości środkowych pasma tercjowego

Wyraźnie widać przesuwanie się dominujących częstotliwości drgań w widmie oraz zmianę proporcji udziału poszczególnych częstotliwości środkowych w budowaniu obrazu drgań w porównaniu z charakterystyką prezentowaną przez efekt pojedynczego ładunku MW (0 ms). Częstotliwość 12,6 Hz utrzymuje dominującą rolę we wszystkich, z wyjątkiem

17 ms, opóźnieniach. Jednakże otoczenie tej częstotliwości wyraźnie zmienia swój charakter. Przy opóźnieniu 17 ms dominują częstotliwości niższe ($3,2 \div 6,3$ Hz); opóźnienie 25 ms, najbardziej zbliżone do charakterystyki odniesienia (0 ms), lekko rozbudowuje również częstotliwości niższe; natomiast opóźnienia 42 i 67 ms wzmacniają częstotliwości wyższe, związane z częstotliwością odpalania ładunków MW — 25 Hz dla opóźnienia 42 ms i 15,9 Hz dla opóźnienia 67 ms.

Należy dodać, że zmienność ta rysuje się nieco odmiennie dla drgań rejestrowanych na fundamencie budynku, choć i w tym przypadku wpływ opóźnień jest bardzo wyraźny [12].

Analizę zmiany widma częstotliwościowego drgań przeprowadzono graficznie przez porównanie histogramów otrzymanych w wyniku filtrowania tercjowego dla poszczególnych opóźnień milisekundowych. Dla przykładu wyniki analizy przedstawiono na rysunku 11 dla składowej poziomej x.



Rys. 11. Stanowisko 1 — analiza tercjowa — histogram maksymalnych prędkości drgań dla częstotliwości środkowych pasma tercjowego

Podsumowując ten etap analizy należy podkreślić, że:

- istotny wpływ na zmianę charakterystyki częstotliwościowej drgań ma zastosowane opóźnienie milisekundowe. Zjawisko to występuje wyraźnie szczególnie przy skrajnych opóźnieniach 17 ms i 67 ms;
- opóźnienia 25 ms i 42 ms posiadają lokalne wzmocnienia w stosunku do poziomu odniesienia, ale generalnie nie powodują gwałtownych zmian dominujących częstotliwości — stanowią rodzaj pomostu między opóźnieniami skrajnymi;
- opóźnienie 17 ms powoduje wzmocnienie drgań budynku w zakresie niższych częstotliwości ($2,5 \div 7,9$ Hz) i to zarówno w stosunku do opóźnienia 0 ms, jak i drgań gruntu;
- opóźnienie 67 ms powoduje, że dominującą w histogramach drgań jest częstotliwość związana z odpalaniem ładunków MW. Maksymalna prędkość drgań o częstotliwości 15,9 Hz, która w histogramach efektu pojedynczego ładunku MW nie przekraczała połowy wartości prędkości o częstotliwości dominującej, zdecydowanie przeważa lub ma wartość zbliżoną do charakterystycznej dla 0 ms, czyli 12,6 Hz.

Przeprowadzone analizy częstotliwości drgań wzbudzanych odpalaniem ładunków MW w długich otworach z różnym opóźnieniem milisekundowym, z zastosowaniem algorytmu FFT i filtrów tercjowych, skłaniają do następujących wniosków:

- zarówno analiza FFT, jak i filtracja tercjowa wykazały istotny wpływ stosowanego opóźnienia międzystrzałowego do odpalania ładunków MW na charakterystykę częstotliwościową drgań gruntu i budynku;
- wnioski wynikające z analiz są zbieżne, co świadczy o istotności problemu;
- niewątpliwą zaletą analizy widmowej FFT jest to, że w sposób bardziej dynamiczny oddaje istotę zjawiska, gdyż obejmuje pełny okres drgań i skupia we współczynnikach charakteryzujących poszczególne częstotliwości ich udział w całym zapisie;
- zaletą filtracji tercjowej jest uzyskiwanie wyników wyrażonych w jednostkach oryginalnego przebiegu czasowego (w tym przypadku prędkościach przemieszczeń). Pozwala to, w przeciwieństwie do wyników analizy FFT, na wykorzystanie tych danych do oceny szkodliwego wpływu drgań na obiekty z zastosowaniem skal SWD.

Ponieważ celem prowadzonych badań było określenie, w jakim stopniu opóźnienia milisekundowe wpływają na częstotliwość, czyli jeden z parametrów oceny szkodliwości drgań dla obiektów, do dalszych analiz postanowiono przyjąć filtrację tercjową. Nie bez znaczenia był fakt stosowania tego typu analizy (zgodnie z normą) do oceny szkodliwości drgań z wykorzystaniem skal SWD, co wiąże się jednocześnie z możliwością łatwiejszego przeniesienia wniosków do praktyki górniczej.

4. Względna moc drgań

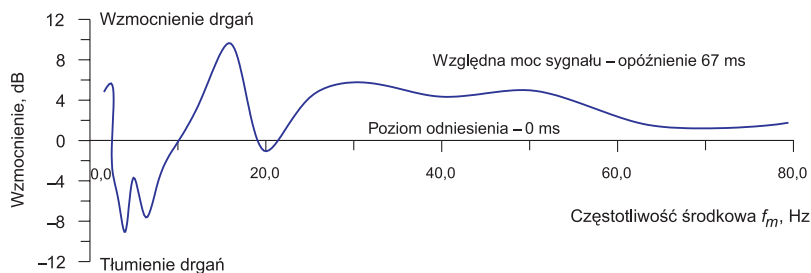
Histogramy maksymalnych prędkości drgań dla częstotliwości środkowych pasm tercjowych otrzymane w wyniku analizy tercjowej pozwalają na porównywanie bezpośrednie efektu sejsmicznego wzbudzanego stosowaniem do strzelania różnych opóźnień milisekundowych. Dla lepszego ujęcia ilościowego zmian zastosowano miarę decybelową, która jest używana do określania względnej mocy sygnałów. Ponieważ moc sygnałów czasowych (a takimi sygnałami są drgania) jest proporcjonalna do kwadratu prędkości, do analizy porównawczej zastosowano zależność [5, 12]

$$w_{dB} = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{u_{ms}}{u_0} \right) \text{ dB} \quad (1)$$

gdzie:

- w_{dB} — współczynnik względnej mocy drgań,
- u_{ms} — maksymalna amplituda dla częstotliwości środkowej pasma tercjowego przebiegu czasowego,
- u_0 — maksymalna amplituda dla częstotliwości środkowej pasma tercjowego przebiegu czasowego przyjmowanego jako poziom odniesienia.

Dzielenie przez wartość u_0 zawsze wymusza przyrównanie do 0 dB pierwszej wartości — przyjmowanej jako poziom odniesienia, stąd łatwość wnioskowania o wzmacnieniu lub tłumieniu względem poziomu odniesienia. Zastosowanie analizy względnej mocy do porównywania histogramów drgań rejestrowanych przy odpalaniu ładunków MW z różnym opóźnieniem czasowym przedstawiono na rysunku 12.

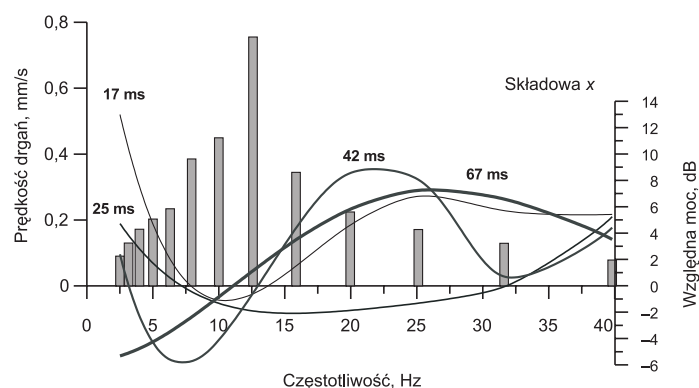


Rys. 12. Względna moc drgań przy zastosowaniu opóźnienia 67 ms [12]

Rysunek ten przedstawia zmienność współczynnika względnej mocy drgań dla opóźnienia 67 ms, co należy rozumieć jako wskazanie, w jakich częstotliwościach drgania uległy wzmacnieniu, a w jakich tłumieniu w stosunku do poziomu odniesienia, którym w tym przypadku był efekt sejsmiczny wzbudzony pojedynczym ładunkiem MW.

Wyznaczanie współczynnika względnej mocy sygnałów przyjęto jako metodę porównania struktury częstotliwościowej drgań zarejestrowanych w czasie strzelania długimi otworami z zastosowaniem różnych opóźnień milisekundowych [12].

Analiza względnej mocy drgań miała na celu wykazanie, że efekt sejsmiczny rejestrowany w czasie odpalenia pojedynczego ładunku MW, a przyjęty za poziom odniesienia, ulega zmianie wskutek zastosowania do odpalania ładunków w serii różnego opóźnienia milisekundowego. Wzmocnienie lub tłumienie drgań jako efekt zastosowania do strzelania różnych opóźnień milisekundowych przedstawiono na rysunku 13.



Rys. 13. Wzmocnienie i zmniejszenie efektu sejsmicznego od pojedynczego ładunku MW w zależności od zastosowanego opóźnienia milisekundowego — stanowisko 1

Na rysunku tym na wynik analizy tercjowej poziomu odniesienia naniesiono krzywe zmienności współczynnika względnej mocy drgań. Zastosowanie na rysunkach dwóch osi rzędnych pozwala odczytywać bezpośrednio spodziewany poziom wzmocnienia drgań, w stosunku do prędkości zarejestrowanych w czasie odpalenia pojedynczego ładunku MW.

5. Współczynnik strzelania milisekundowego

Współczynnik względnej mocy drgań w_{dB} , wyrażony w decybelach, dobrze oddaje dynamikę zjawiska wzmacniania lub tłumienia efektu sejsmicznego. Jednak dla celów praktycznych bardziej użytecznym jest określenie tego zjawiska przez współczynnik bezwymiarowy, co można osiągnąć przez przekształcenie wzoru (1) do postaci wyrażającej względność zmian prędkości u_{ms} (prognozowanej lub mierzonej w czasie strzelania milisekundowego) w stosunku do prędkości bazowej strzelania jednootworowego u_0 . Wzór (1) przyjmuje wtedy postać

$$u_{ms} = u_0 \cdot 10^{\frac{w_{dB}}{20}} \quad (2)$$

Wprowadzając pojęcie współczynnika strzelania milisekundowego k_{ms} w postaci [12]

$$k_{ms} = 10^{\frac{w_{dB}}{20}} \quad (3)$$

gdzie:

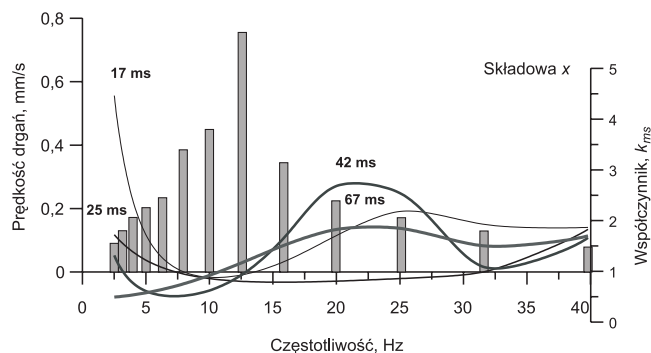
- u_{ms} — prędkość drgań wzbudzonych strzelaniem milisekundowym,
- u_0 — prędkość drgań wzbudzonych strzelaniem jednootworowym,
- k_{ms} — współczynnik strzelania milisekundowego,

otrzymano zależność [12]:

$$u_{ms} = u_0 \cdot k_{ms} \quad (4)$$

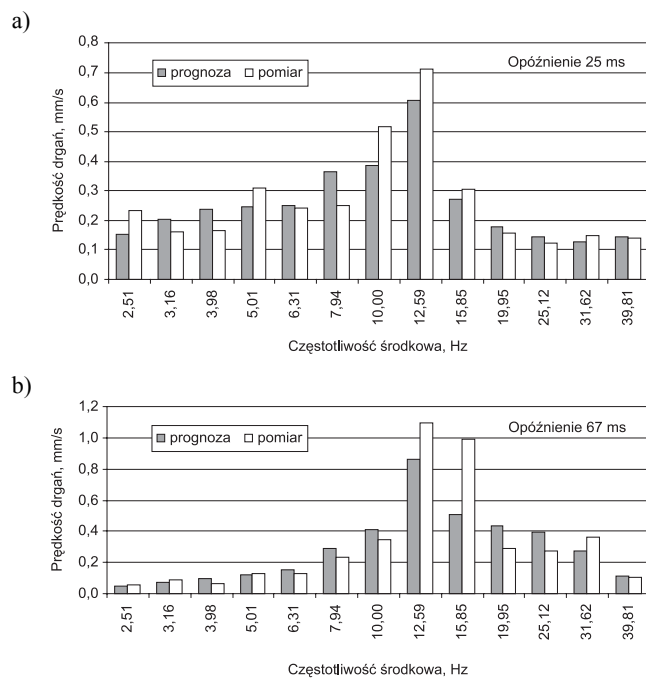
Współczynnik strzelania milisekundowego (który praktycznie jest współczynnikiem korekcyjnym) pozwala na prognozowanie efektu sejsmicznego wzbudzanego strzelaniem milisekundowym na podstawie znajomości poziomu odniesienia, czyli efektu sejsmicznego wywołanego pojedynczym ładunkiem MW. Wartości współczynnika k_{ms} dla poszczególnych opóźnień milisekundowych zostały przedstawione graficznie na rysunku 14. Podobnie jak dla współczynnika względnej mocy, współczynnik k_{ms} ukazano na wynikach analizy tercjowej poziomu odniesienia.

W ten sposób przedstawiony współczynnik k_{ms} pozwala bezpośrednio z rysunku wnioskować o intensywności drgań w poszczególnych częstotliwościach środkowych pasma tercjowego w zależności od zastosowanego opóźnienia międzystrzałowego.



Rys. 14. Współczynnik strzelania milisekundowego — stanowisko 1

Przeprowadzenie obliczeń zgodnie z wzorem (4) to dokonanie prognozy wyniku analizy trzecjowej drgań wzbudzonych strzelaniem milisekundowym z zastosowaniem poszczególnych opóźnień międzystrzałowych. Efekt obliczeń, dla opóźnień 25 i 67 ms, przedstawiono na rysunku 15 dla składowej poziomej na stanowisku 1. Na rysunku tym ukazano jednocześnie porównanie prognozowanej intensywności drgań wynikającej z analizy trzecjowej pomiaru.



Rys. 15. Wyniki obliczeń według zależności 4 — stanowisko 1, składowa x, opóźnienia 25 (a) i 67 (b) ms

6. Podsumowanie i wnioski

Celem przeprowadzonych strzelań doświadczalnych, pomiarów efektu sejsmicznego oraz analizy wyników było określenie wpływu wielkości opóźnienia milisekundowego na charakterystykę częstotliwościową drgań wzbudzanych strzelaniem długimi otworami.

Wybór optymalnego opóźnienia milisekundowego tylko na podstawie poziomu zmierzonych drgań może być obciążony poważnym błędem ze względu na pominięcie w analizie jednego z parametrów drgań, który bierze udział w ocenie szkodliwości — tym parametrem jest częstotliwość. Innymi słowy, osiągnięcie niskiego poziomu intensywności drgań nie jest jednoznaczne z osiągnięciem najmniejszego oddziaływania na chroniony obiekt.

Z tego powodu przeprowadzono analizę wpływu opóźnienia milisekundowego na ten właśnie parametr charakteryzujący drgania parasejsmiczne. Do obliczeń zastosowano analizę widmową FFT oraz analizę filtracyjną w pasmach tercjowych. Obydwie metody analityczne okazały się skuteczne i pozwoliły na sformułowanie następujących wniosków:

1. Zastosowane do strzelania długimi otworami opóźnienie milisekundowe powoduje zmianę widma drgań mierzonych zarówno na gruncie, jak i na fundamencie budynku.
2. Zastosowane w czasie strzelań doświadczalnych opóźnienia 17, 25, 42 i 67 ms w różny sposób wpływają na zmianę charakterystyki drgań. Daje się zauważyć prawidłowość, że opóźnienie 17 ms przesunęło dominującą częstotliwość w widmie w kierunku niższych częstotliwości, a opóźnienie 67 ms w kierunku wyższych. Opóźnienia 25 i 42 ms posiadają swoje lokalne wzmocnienia, ale nie powodują zdecydowanych przesunięć dominujących częstotliwości.
3. Opóźnienia 25, 42 i 67 ms wprowadzają do widma drgań częstotliwość, która jest związana z czasem odpalania ładunków MW. Jest to szczególnie widoczne, gdy w widmie drgań wzbudzonych pojedynczym ładunkiem MW jedną z dominujących jest właśnie taka częstotliwość. Najlepszym przykładem jest opóźnienie 67 ms, które zdecydowanie wzmacnia częstotliwości rzędu 14÷16 Hz. Jest to efekt rezonansu, czyli wzmocnienia określonych częstotliwości drgań związanych z częstotliwością własną źródła, jakim jest strzelanie milisekundowe (zjawisko stwierdzone przez Dowdinga [3] — odwrotność interwału czasowego).
4. Punktem odniesienia do badań zmienności widma efektu sejsmicznego, wzbudzanego strzelaniem długimi otworami, jest widmo drgań wzbudzanych odpaleniem pojedynczego ładunku MW (efekt pojedynczego otworu). Porównanie widma efektu sejsmicznego serii otworów odpalanych z opóźnieniem milisekundowym z widmem pojedynczego ładunku MW pozwala uzyskać informację o zakresach częstotliwości, w których można spodziewać się wzmocnienia lub tłumienia drgań.
5. Opóźnienia milisekundowe mają istotny wpływ na kształtowanie widma drgań, zarówno podłoża (gruntu), jak i budynku, który jest na tym podłożu posadowiony. Niezależnie od charakterystyki drgań opóźnienia wpływają również na stopień tłumienia drgań między podłożem a budynkiem. Zastosowane opóźnienie milisekundowe może spowodować wystąpienie drgań o częstotliwościach zbliżonych do częstotliwości własnych (re-

zonansowych) budynku i wtedy nie można już mówić o tłumieniu, ale o wzmocnieniu drgań. Typowym przykładem jest opóźnienie 17 ms, które spowodowało przesunięcie dominujących częstotliwości w zakres niższych wartości, a w konsekwencji wzrost drgań budynku w porównaniu do drgań gruntu.

- 6) Analizując zmienność współczynnika strzelania milisekundowego k_{ms} , nie można wykluczyć wariantu osiągnięcia efektu sejsmicznego serii otworów mniejszego od efektu pojedynczego ładunku MW.

Jako wniosek końcowy, wynikający z przeprowadzonej analizy częstotliwości drgań wzbudzanych strzelaniem długimi otworami, należy stwierdzić, że opóźnienia milisekundowe mają wpływ na widmo drgań rejestrowanych na gruncie i na budynkach w otoczeniu wykonywanych robót strzelniczych.

LITERATURA

- [1] Ciesielski R.: Inżynieria parasejsmiczna, problemowe ujęcie współczesnego stanu zagadnienia. Nauka, nr 1, 1995
- [2] Ciesielski R., Kwiecień A., Stypuła K.: Propagacja drgań w warstwach przypowierzchniowych podłoża gruntowego: badania doświadczalne in situ. Monografia 263, Politechnika Krakowska, Kraków 1999
- [3] Dowding C.H.: Blast Vibration Monitoring and Control. Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, 1985
- [4] Kwiatek J. (red.): Ochrona obiektów budowlanych na terenach górniczych. Wyd. GIG, Katowice 1997
- [5] Lyons R.G.: Wprowadzenie do cyfrowego przetworzenia sygnałów. WKiŁ, Warszawa 2000
- [6] Maciąg E.: Ocena wpływów wstrząsów górniczych na budynki. Sympozjum Warsztaty 2000 nt. Zagrożenia naturalne w górnictwie
- [7] Onderka Z., Winzer J.: Częstotliwość i jej wpływ na ocenę intensywności drgań parasejsmicznych i fal powietrznych. Konferencja pt. Technika strzelnicza w górnictwie, Jaszowiec 1996
- [8] Onderka Z., Winzer J.: Nonel Unidet — możliwości doboru opóźnień milisekundowych dla strzelania długimi otworami. Konferencja pt. Technika strzelnicza w górnictwie. ART-TEKST, Jaszowiec 2001
- [9] PN-85/B-02170: Ocena szkodliwości drgań przekazywanych przez podłoże na budynki
- [10] Winzer J., Biessikirski R.: Uwagi o doborze opóźnień milisekundowych ze względu na ograniczenie wielkości drgań parasejsmicznych. Konferencja pt. Technika strzelnicza w górnictwie, Jaszowiec 1996
- [11] Winzer J., Biessikirski R., Sieradzki J.: The influence of using millisecond-delays on the character of the ground and buildings vibrations. Blasting Techniques 2000 Słowacja, Stara Leśna 2002
- [12] Winzer J.: Wpływ opóźnień milisekundowych przy prowadzeniu strzelań eksploatacyjnych na częstotliwościowe charakterystyki drgań gruntu i budynków na przykładzie złoża gipsu. AGH, Kraków 2003 (praca doktorska)

Zatwierdzono do druku: 17.09.2004 r.