



Odpalanie pojedynczych ładunków MW jako baza do wyznaczania optymalnego opóźnienia milisekundowego

Firing of singular explosive charges as the basis for determining the optimal millisecond delay

Dr inż. Anna Sołtys*)

Treść: Używanie materiałów wybuchowych do urabiania złóż w kopalniach surowców skalnych nieodzownie wiąże się z zastosowaniem odpowiedniego systemu inicjowania, umożliwiającego odpalenie ładunków MW z opóźnieniem czasowym (milisekundowym). Taki sposób detonacji ładunków daje szerokie możliwości przy projektowaniu wielostrzajowych siatek strzałowych, a jednocześnie wpływa korzystnie na minimalizację oddziaływania robót strzałowych na zabudowania w otoczeniu kopalń. Dobór właściwego opóźnienia milisekundowego powinien bazować na sejsmogramach drgań wzbudzanych w czasie odpalania pojedynczych ładunków MW i analizie struktury tych drgań. W artykule przedstawiono wyniki z pierwszych prac badawczych opartych na zastosowaniu milisekundowej zapalarki ZT 480t, skonstruowanej na przełomie lat 80. i 90. w Instytucie Górnictwa Odkrywkowego AGH. Spostrzeżenia z przeprowadzonych doświadczeń stały się przyczynkiem do kontynuacji prac wskazujących na konieczność budowy systemów odpalania ładunków MW, które pozwolą na szerszy wybór opóźnień milisekundowych, a tym samym dadzą możliwość modyfikacji struktury wzbudzanych drgań. Wymiernym efektem prowadzonych badań było dopuszczenie, w roku 1994, do stosowania w górnictwie odkrywkowym zapalarki milisekundowej EXPLO-201, również skonstruowanej w Instytucie Górnictwa Odkrywkowego AGH. Komputerowa optymalizacja opóźnień milisekundowych, przy obecnie stosowanych, nowoczesnych, elektronicznych systemach inicjowania, bazuje właśnie na danych pozyskiwanych z odpalania pojedynczych ładunków MW. Jak widać, spostrzeżenia z badań prowadzonych w ubiegłym wieku są nadal aktualne i stanowią mocną podstawę dla obecnie projektowanych robót strzałowych.

Abstract: The use of explosives to extract resources in rock material mines is necessarily associated with the use of an appropriate initiation system that allows the firing of explosive charges with a time delay (millisecond). Such a method of charges detonation gives a wide range of possibilities when designing multi-row blasting patterns, and at the same time, it has a positive effect on the blasting impact minimization on buildings in the vicinity of mines. The selection of the right millisecond delay should be based on the seismograms recorded during the firing of a singular blasthole and the analysis of the vibrations structure. This paper presents the results of the first research which included the application of millisecond blaster ZT 480t, constructed at the turn of the 80s and 90s, at the Institute of Open Mining AGH. Observations from the experience have contributed to the continuation of the pursue which indicates the need to build firing systems that will allow a wider selection of millisecond delay and thus allow for the possibility of modifying the structure of the induced vibrations. The tangible outcome of the research in 1994 was the authorization of the EXPLO-201 blaster for mining, also constructed at the Open Mining Institute AGH. Computer-based optimization of millisecond delay, with today's modern, electronic initiation systems, is based on data derived from firing a singular blasthole. As shown, observations from the research conducted in the last century are still valid and provide a strong basis for the currently planned blasting.

Słowa kluczowe:

górnictwo, technika strzelnicza, strzelanie milisekundowe, oddziaływanie drgań

Key words:

mining, blasting works, millisecond blasting technique, ground born vibration

1. Wprowadzenie

Zastosowanie materiałów wybuchowych w procesie urabiania złóż surowców skalnych jest, szczególnie przy odpalaniu ładunków w długich otworach, źródłem drgań, które mogą oddziaływać na zabudowania w otoczeniu odkrywkowego wyrobiska górnictwa. Dążeniem każdego zakładu górnictwa jest z jednej strony minimalizacja tego oddziaływania, a z drugiej strony stosowanie dużych mas MW do strzelania, gdyż gwarantuje to obniżenie kosztów prowadzenia robót strzałowych. Wprowadzenie do stosowania nowoczesnych MW, mechanicznego ładunku MW do otworów strzałowych, elektronicznych systemów odpalania, stwarza możliwo-

ści prawidłowego i bezpiecznego dla otoczenia prowadzenia robót strzałowych.

Z końcem lat dziewięćdziesiątych ubiegłego wieku do praktyki górnictwa w polskich kopalniach surowców skalnych wprowadzono nieelektryczny system odpalania ładunków MW, co stanowiło dużą zmianę jakościową w stosunku do systemu elektrycznego (Biessikirski i in. 2001). System nieelektryczny umożliwił rozszerzenie wyboru opóźnień milisekundowych, pozwolił zwiększyć liczbę otworów odpalanych w serii, zapewniał optymalne projektowanie robót strzałowych z zabezpieczeniem oczekiwanej granulacji urobku, jak i minimalizacji oddziaływania na zabudowania w otoczeniu.

Na początku obecnego stulecia (Batko, Winzer 2008) w polskim górnictwie odkrywkowym rozpoczęto stoso-

*) AGH Akademia Górniczo-Hutnicza

wanie elektronicznego systemu odpalania ładunków MW. Możliwości, jakie stwarza ten system to przede wszystkim uelastycznienie wyboru opóźnienia milisekundowego, poszerzenie zakresu projektowania wielootworowych siatek strzałowych z użyciem programów komputerowych. Można zaryzykować stwierdzenie, że system elektroniczny pozwala na sterowanie procesem urabiania z lepszym wykorzystaniem energii MW i zabezpieczeniem otoczenia przed negatywnymi skutkami użycia MW.

Podstawowym problemem dobrego wykorzystania nowoczesnych systemów odpalania jest świadomy wybór opóźnienia milisekundowego. Jest to szczególnie ważne w przypadkach, gdy roboty prowadzone są wieloszeregowo, przy użyciu dużej liczby ładunków MW (Landman 2010, Person i in. 1993). Należy zdawać sobie sprawę, że sam fakt użycia systemu elektronicznego nie jest rozwiązaniem samym w sobie. Nieodpowiednie użycie zapalników elektronicznych, przy ich precyzyjnym zadawaniu opóźnień, może prowadzić do całkowicie niepożądanych efektów.

Kilka lat doświadczeń w wdrażaniu zarówno systemu nieelektrycznego, jak i elektronicznego pozwala stwierdzić, że wprowadzenie tych systemów winno być poprzedzone serią badań, które pozwalają na wybór optymalnego opóźnienia dla robót strzałowych w warunkach konkretnej kopalni. W czasie takich badań należy zwrócić uwagę na podstawowe charakterystyki drgań wzbudzanych w wyrobisku i propagowanych do otoczenia. Charakterystyki takie można uzyskać na podstawie analizy drgań wzbudzanych odpalaniem pojedynczych ładunków MW. Pomiary drgań należy prowadzić w kilku punktach w otoczeniu kopalni, o ile to możliwe zarówno w podłożu (gruncie), jak i na fundamencie wybranych obiektów budowlanych. Ładunki należy odpalać w kilku miejscach wyrobiska, gdyż mogą wystąpić istotne różnice w charakterystykach drgań. Jest to związane z budową geologiczną zarówno złoża, jak i środowiska w jego otoczeniu.

Uwagi powyższe dotyczą w szczególności systemu elektronicznego. Programy komputerowe, które pozwalają projektować opóźnienia dla odpalania ładunków MW, wymagają wprowadzenia właśnie takich danych bazowych uwzględniających lokalne warunki kopalni i jej otoczenia.

Można zadać pytanie czy w latach 90. ubiegłego wieku byliśmy przygotowani na wprowadzenie szerokiej gamy opóźnień milisekundowych i czy prowadzone w naszym kraju badania uwzględniały takie rozwiązania ?

2. Badania prowadzone w Instytucie Górnictwa Odkrywkowego AGH

Prace badawcze prowadzone w latach 80. w warunkach kopalnianych pozwoliły na dokonanie następujących spostrzeżeń (Winzer i in. 1997):

- żadne racjonalne przesłanki nie pozwalają przyjąć opóźnienia 25 ms, jako dominującego i wskazanego dla wszystkich surowców skalnych,
- dzięki odpowiedniemu doborowi opóźnienia międzystrzałowego można wydłużyć serie otworów, zwiększyć ładunki MW, jak również prowadzić roboty strzałowe bliżej ochraniających obiektów,
- przez dobór opóźnienia można dość dokładnie regulować granulację urobku.

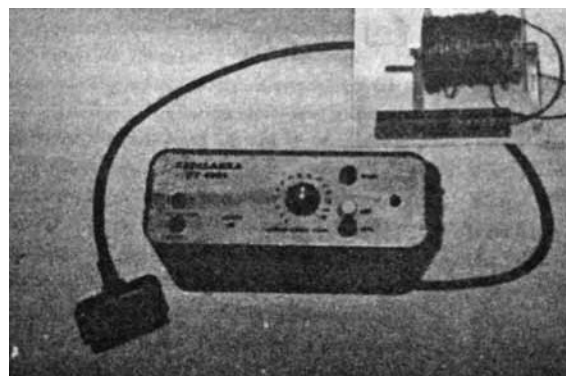
Dysponując wysokiej klasy aparaturą badawczą (rejestrator cyfrowy Terraloc Mk3) i specjalistycznym oprogramowaniem, od roku 1988 realizowano wstępne badania nad metodyką doboru optymalnych opóźnień międzystrzałowych dla różnych grup surowcowych.

2.1. Zapalarki do milisekundowego odpalania ładunków MW

W latach 80. trudno było prowadzić tego typu badania ze względu na brak odpowiedniego sprzętu strzałowego. Z jednej strony doświadczenia ograniczane były liczbą stopni opóźnień w wiązce elektrycznych zapalników milisekundowych (np. 15 opóźnień), z drugiej strony brakiem zapalarek milisekundowych dopuszczonych do elektrycznego odpalania ładunków MW. Dlatego też pierwszym elementem tych badań była konieczność zbudowania doświadczalnej zapalarki milisekundowej, dzięki której można było odpalać otwory z dokładnie określonym opóźnieniem w zakresie od 0 ÷ 150 ms. Tak powstała zapalarka ZT 480t (rys. 1), która została dopuszczona przez WUG do strzelań doświadczalnych w wskazanych zakładach górniczych (Biessikirski 1991). Zastosowanie tej zapalarki stanowiło duże doświadczenie zarówno dla zespołu badawczego AGH, jak i służb strzałowych w kopalniach.

W tym samym czasie w Kopalni Doświadczalnej BARBARA opracowano system zapalarki typu BARBARA 30 z regulowanymi elektronicznie opóźnieniami międzystrzałowymi (Dworok 1993).

W wyniku nabytych doświadczeń i poczynionych obserwacji, w roku 1994 skonstruowano i wprowadzono do stosowania zapalarkę milisekundową Explo-201 (rys. 2) (Biessikirski 1996). Zapalarka ta, dopuszczona do stosowania w górnictwie odkrywkowym decyzją Prezesa WUG z dnia 11.01.1995 r., pozwoliła na popularyzację innego niż 25 ms opóźnienia milisekundowego i rozpoczęcie na większą skalę prac badawczych.



Rys. 1. Zapalarka ZT 480t (Biessikirski 1991)

Fig. 1. Millisecond blaster – ZT 480t (Biessikirski 1991)



Rys. 2. Górnicza Zapalarka Milisekundowa Explo-201 (Biessikirski 1996)

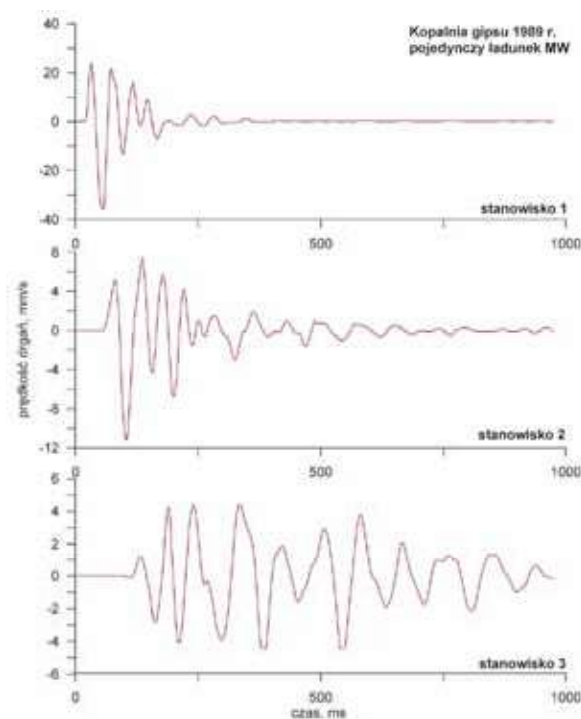
Fig. 2. Millisecond blaster – Explo-201 (Biessikirski 1996)

Zapalarka Explo-201 (Biessikirski 1996) była dwudziestoobwodową zapalarką kondensatorową o regulowanym napięciu ładowania baterii kondensatorów strzałowych. Przeznaczona była do odpalania zapalników natychmiastowych i milisekundowych o prądzie bezpiecznym 0,2 A i 0,45 A. Opóźnienia dobierane były z przedziału $0 \div 99$ ms, z krokiem czasowym, co 1 ms. Zapalarka była stosunkowo łatwa w obsłudze, ale trudności występowały przy wykonywaniu obwodów strzałowych dla dużych siatek otworów. Możliwość programowania zapalarki, zabezpieczenia przed niepożądanym uruchomieniem, możliwość stosowania różnych opóźnień dla każdego odpalanego ładunku, możliwość jednoczesnego pomiaru oporu obwodu strzałowego i przerywanie procesu strzelania w razie wystąpienia niewypału łącznie z jego lokalizacją to tylko niektóre istotne zalety, które pozwalały zaliczyć ją do bezpiecznego i nowoczesnego sprzętu strzałowego. Wykonane strzelania z zastosowaniem różnych opóźnień milisekundowych w kopalni gipsu „Borków” i kopalni wapienia „Truskawica” dały wyraźny sygnał, że w stosowaniu optymalnych opóźnień milisekundowych tkwią olbrzymie rezerwy zarówno w kierowaniu granulacją urobku, jak i ograniczaniu szkodliwego oddziaływania na otaczające środowisko (Winzer i in. 1997).

2.2. Charakterystyka prac badawczych z zastosowaniem zapalarki ZT 480t

Pierwsze prace w ramach CPBR 1.6 cel nr 90 „Wpływ opóźnień międzystrzałowych i konstrukcji ładunków na intensywność drgań sejsmicznych”, z zastosowaniem zapalarki ZT 480t, wykonano w kopalni gipsu, gdzie przeprowadzono 15 odstrzałów długimi otworami przy zachowaniu, możliwych do uzyskania w warunkach przemysłowych, stałych warunków badań zarówno w zakresie parametrów robót strzałowych, jak i warunków pomiarowych:

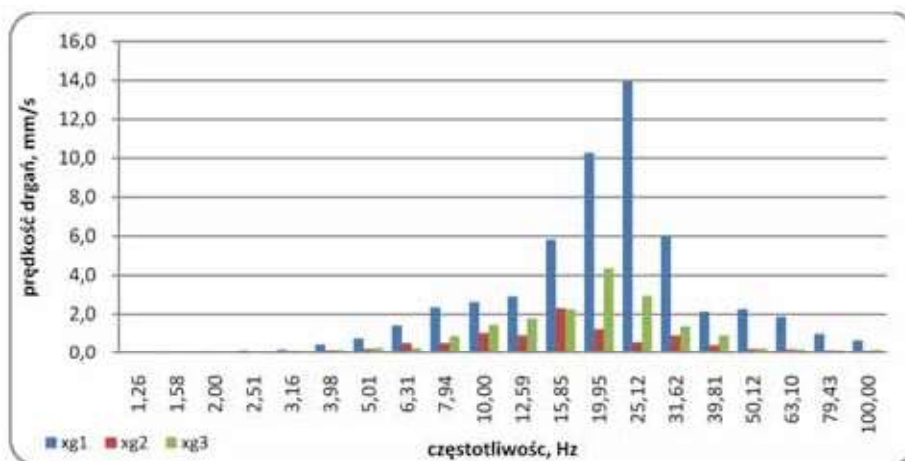
- jako informację bazową, do porównań efektu sejsmicznego i częstotliwości drgań, wykonano strzelania pojedynczych ładunków MW (rys. 3),
- odpalano jednoszeregowe serie 6 otworów, o średnicy 105 mm i długości $12 \div 13$ m, przy zabiorze i odległości między otworami rzędu 4,2 m,
- ładunek w otworze miał masę 75 kg, a do strzelania używano Amonit 0 (specjalnie fabrycznie sporządzany i cechujący się znaczną stałością właściwości), inicjowany w otworze przy pomocy natychmiastowych zapalników elektrycznych i pobudzaczy trotylowych T-50,



Rys. 3. Sejsmogram drgań wzbudzonych odpaleniem pojedynczego ładunku MW – rejestracja na trzech stanowiskach pomiarowych (składowa pozioma x)

Fig. 3. Seismogram of vibrations induced by firing a single blasthole – registration at three measurement points (horizontal component x)

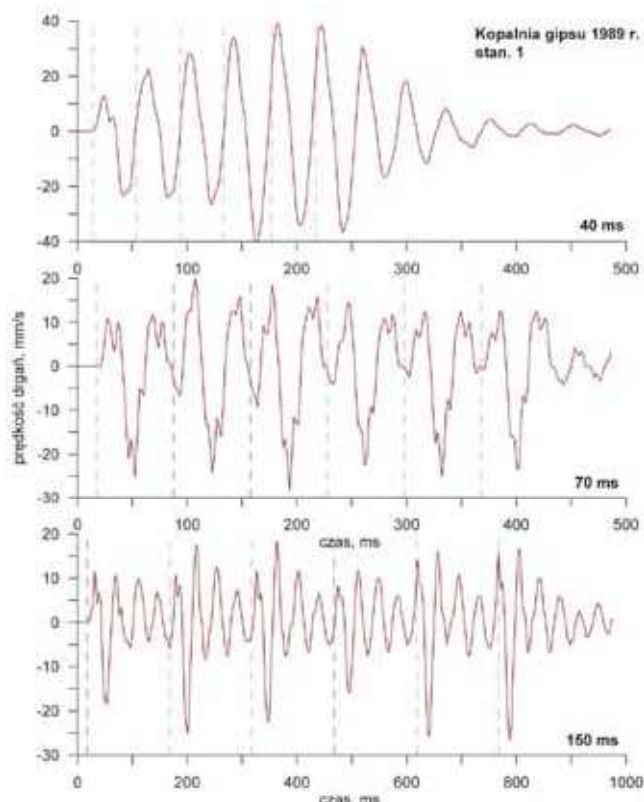
- w czasie badań zastosowano opóźnienia: 0 ms, 40 ms, 60 ms, 70 ms, 110 ms i 150 ms,
- efekt sejsmiczny w postaci prędkości drgań mierzono na trzech stanowiskach pomiarowych w podłożu, w odległości: $120 \div 141$ m dla stanowiska 1, $233 \div 254$ m dla stanowiska 2 i $351 \div 372$ m dla stanowiska 3; analizowano również strukturę wzbudzanych drgań (rys. 4).
W efekcie przeprowadzonych doświadczeń uzyskano szereg ciekawych obserwacji:
- przy zastosowaniu opóźnienia 150 ms nastąpiło rozdzielenie sygnału sejsmicznego każdego z sześciu kolejno odpalanych ładunków MW (rys. 5),



Rys. 4. Struktura drgań wzbudzonych odpaleniem pojedynczego ładunku MW – rejestracje na trzech stanowiskach pomiarowych

Fig. 4. Structure of vibrations induced by firing a single charge of explosives – registrations at three measurement points

- przy zastosowaniu opóźnienia 70 ms (rys. 5) uzyskano podobny efekt, ale w tym przypadku nie wystąpiło pełne rozdzielenie sygnału od każdego ładunku, tylko wytłumienie sygnału powyżej czasu 70 ms. Praktycznie również w tym przypadku efekt sejsmiczny odpalenia sześciu ładunków jest taki sam jak pojedynczego,
- na sejsmogramach można zauważyć precyzję zadawanych opóźnień – wyraźnie zaznacza się wejście sygnału wzbudzonego kolejnym ładunkiem MW (rys. 5),



Rys. 5. Sejsmogramy drgań wzbudzonych w czasie odpalenia 6 ładunków MW z różnym opóźnieniem milisekundowym – składowa pozioma x

Fig. 5. Seismograms of vibrations induced during the firing of six explosive charges with different millisecond delay – horizontal component x

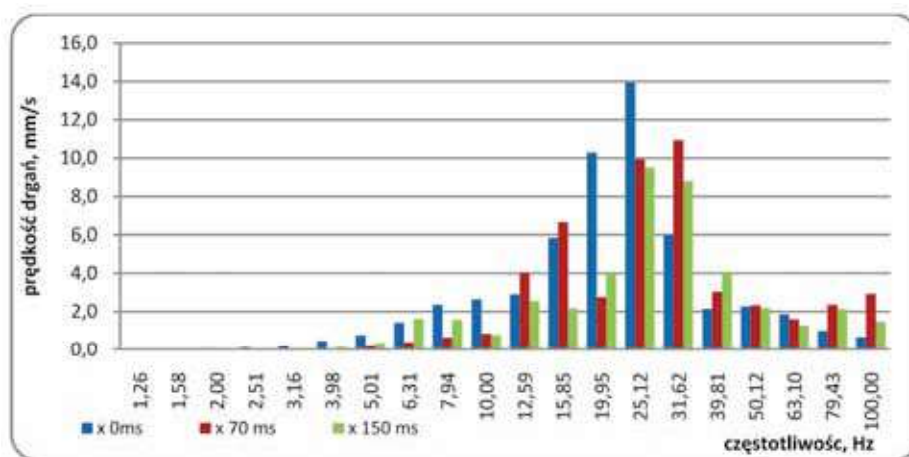
- przeprowadzona analiza struktury zarejestrowanych drgań wykazała duże zbliżenie charakterystyki częstotliwościowej drgań zarówno dla pojedynczego ładunku, jak i dla ładunków odpalonych z opóźnieniem 70 ms i 150 ms (rys. 6), a największa dominująca częstotliwość drgań wynosiła 31,62 Hz,
- zdecydowanie odmienną strukturą charakteryzują się drgania wzbudzone w czasie odpalania serii z opóźnieniem 40 ms (rys. 7) – wyraźnie zaznacza się dominacja częstotliwości 25 Hz, którą można wiązać z opóźnieniem milisekundowym (40 ms to odpalenie ładunków z częstotliwością 25 Hz). Zjawisko to zostało potwierdzone w późniejszych badaniach (Winzer, Biessikirski 1996).

Wyraźna zmiana struktury wzbudzanych drgań, przy odpalaniu z opóźnieniem 40 ms, była pierwszym sygnałem o możliwości sterowania strukturą drgań za pomocą opóźnień milisekundowych.

W celu potwierdzenia tego wniosku, zarejestrowane drgania poddano również analizie z zastosowaniem metody MP. Jest to analiza, która pozwala na identyfikację w czasie również częstotliwości drgań. Podobnie jak w analizie tercjowej, wyniki analizy MP można przedstawić w postaci histogramów, w tym przypadku atomów Gabora, których cechą charakterystyczną jest częstotliwość, amplituda i energia sygnału. Elementem uzupełniającym wyniki analizy są mapy Wignera-Ville'a, które pokazują kształt i położenie atomów Gabora na płaszczyźnie tworzonej przez czas i częstotliwość (Mallat, Zhang 1993, Sołtys 2015). Wyniki analizy MP przedstawiono na rys. 8 i 9.

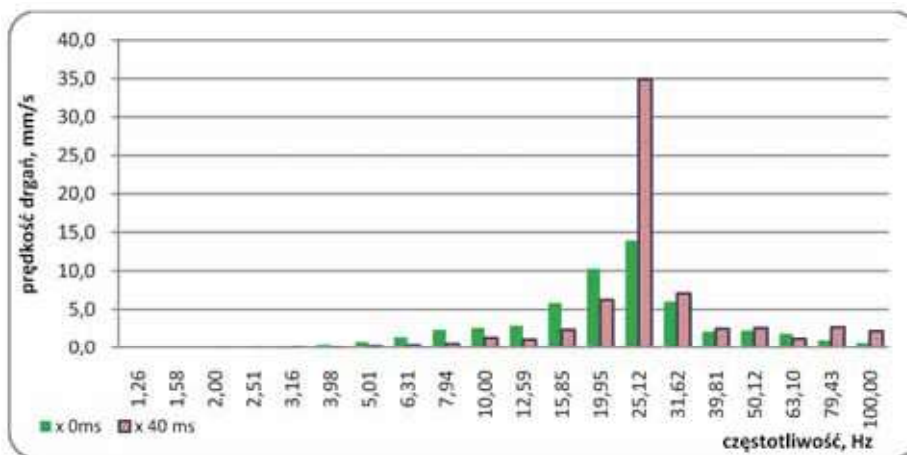
W przypadku odpalania 6 ładunków MW z opóźnieniem 40 ms doszło do skumulowania prawie całej energii sygnału (98%) w atomie Gabora o częstotliwości 24,6 Hz i amplitudzie 39,92 mm/s, a czas trwania atomu 200 ms dał w efekcie energię prawie czterokrotnie większą od energii pojedynczego ładunku ($125160,5 \text{ (mm/s)}^2$). Potwierdza to silny wpływ opóźnienia milisekundowego na strukturę częstotliwościową drgań.

Rozdzielenie sygnału od każdego z sześciu odpalanych otworów przy odpalaniu serii ładunków z opóźnieniem 70 ms i 150 ms potwierdza naniesienie na wspólny wykres zapisu drgań wzbudzonych pojedynczym ładunkiem MW (rys. 10). Z rys. 10 wynika, że początkowa faza sejsmogramów dla serii ładunków jest zbliżona do zapisu drgań wzbudzonych pojedynczym ładunkiem MW.



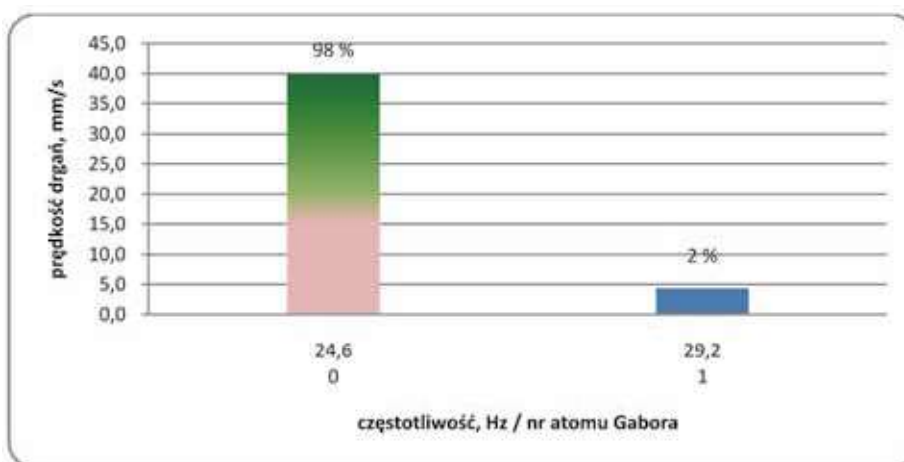
Rys. 6. Porównanie struktury drgań wzbudzonych odpaleniem pojedynczego ładunku MW oraz seriami ładunków odpalanych z opóźnieniem 70 ms i 150 ms

Fig. 6. Comparison of the structure of vibrations induced by detonating a single explosive charge and the blasting patterns designed with a delay of 70 ms and 150 ms



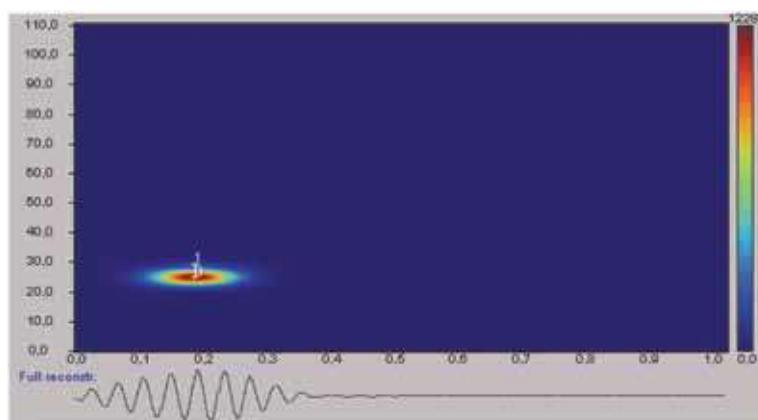
Rys. 7. Porównanie struktury drgań wzbudzonych odpaleniem pojedynczego ładunku MW i serią ładunków z opóźnieniem 40 ms

Fig. 7. Comparison of the structure of vibrations induced by detonating a single explosive charge and the blasting patterns designed with a delay of 40 ms



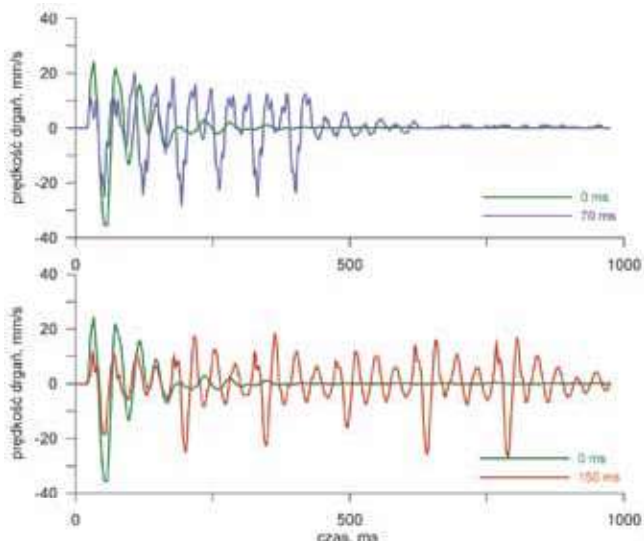
Rys. 8. Histogram atomów Gabora – składowa pozioma x – opóźnienie 40 ms

Fig. 8. Histogram of Gabor's atoms – horizontal component x – 40 ms delay



Rys. 9. Mapa Wignera-Ville'a atomów Gabora – składowa pozioma x – opóźnienie 40 ms

Fig. 9. Wigner-Ville map of Gabor's atoms – horizontal component x – 40 ms delay



Rys. 10. Porównanie sejsmogramów drgań wzbudzonych odpaleniem pojedynczego ładunku MW i serią ładunków z opóźnieniem 70 ms i 150 ms

Fig. 10. Comparison of the seismograms of vibrations induced by detonating a single explosive charge and the blasting patterns designed with a delay of 70 ms and 150 ms

Spostrzeżenia te były podstawą do wysunięcia wniosku, że optymalnych opóźnień należy szukać w zakresie poniżej czasu trwania istotnej fazy drgań uzyskanych od pojedynczego ładunku. Inaczej efekt serii ładunków będzie zbliżony do efektu

uzyskanego w czasie odpalania pojedynczego ładunku MW.

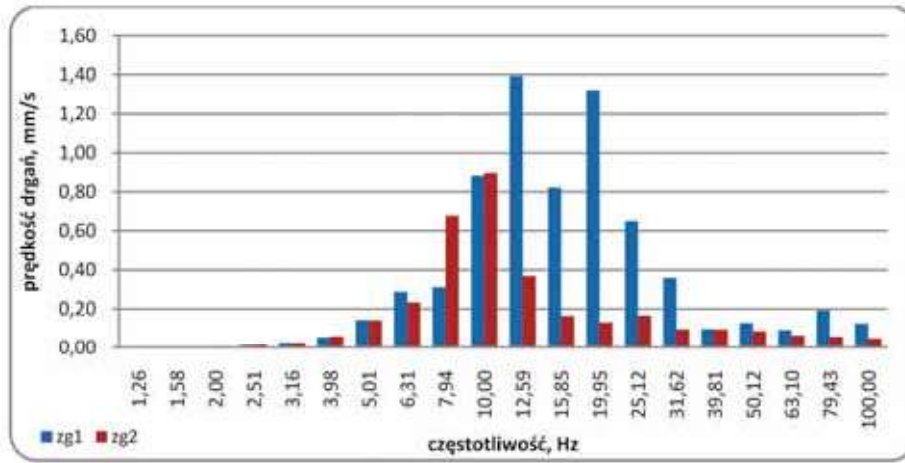
Należy zdawać sobie sprawę z faktu, że struktura drgań w istotny sposób zależy od budowy geologicznej w miejscu wykonywania robót strzałowych, od budowy geologicznej ośrodka skalnego, w którym propagowane są drgania, jak również od podłoża w miejscu posadowienia obiektu chronionego. Analiza efektu sejsmicznego wzbudzanego odpaleniem pojedynczego ładunku MW pozwala na zebranie ważnych informacji o zmienności struktury drgań na drodze od źródła do obiektu chronionego. Dla przykładu na rys. 11 i 12 przedstawiono strukturę drgań zarejestrowanych na czterech stanowiskach pomiarowych w otoczeniu jednej z kopalń gipsu, usytuowanych w różnych odległościach i w różnych kierunkach od wyrobiska.

Jak wynika z rys. 11 w strukturze drgań na stanowisku 1 dominują częstotliwości od 10 Hz do 20 Hz, natomiast na stanowisku 2 dominują częstotliwości 7,94 Hz i 10 Hz. Na stanowiskach 3 i 4 różnice są bardziej wyraźne – na stanowisku 3 o strukturze drgań decydują częstotliwości od 6,31 Hz do 15,85 Hz, a na stanowisku 4, oprócz częstotliwości niższych 6,31 Hz i 7,94 Hz, pojawiają się w strukturze częstotliwości wyższe 31,62 Hz i 79,43 Hz. Takie różnice, wynikające z odległości od miejsca strzelania i kierunku propagacji drgań, mogą w istotny sposób wpływać na wybór optymalnego opóźnienia milisekundowego dla lokalnych warunków kopalni i podłoża w otoczeniu.

Ważnym elementem prac badawczych jest również określenie, w jakim stopniu na intensywność drgań wpływa masa ładunku MW przypadająca na opóźnienie milisekundowe. Masa ładunku MW jest determinowana średnicą otworu, długością kolumny MW i konstrukcją ładunku w otworze.

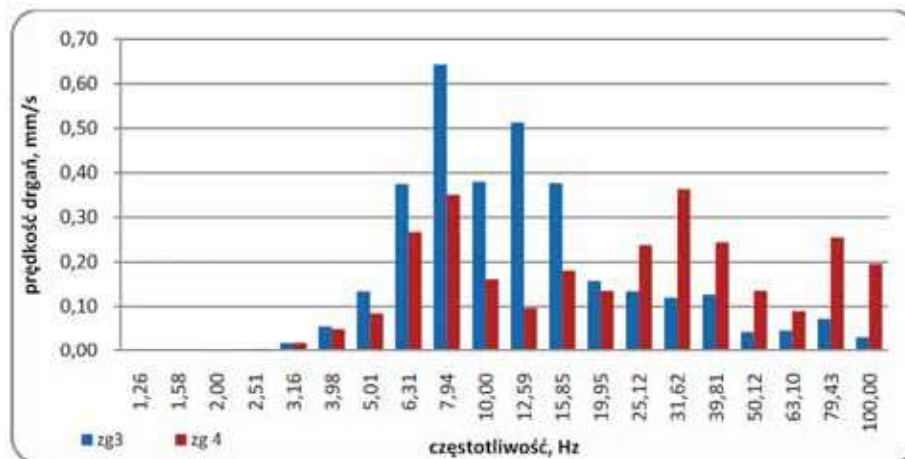
Rys. 11. Struktura drgań wzbudzonych odpaleniem pojedynczego ładunku MW – stanowisko 1 w odległości 262 m i stanowisko 2 w odległości 430 m od miejsca detonacji

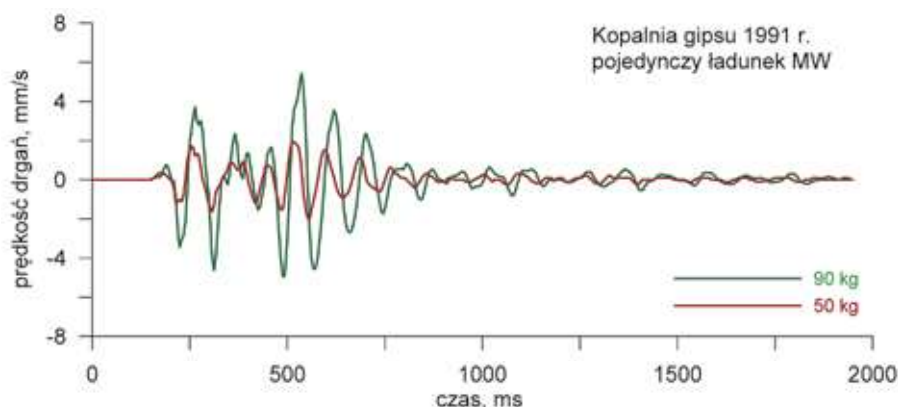
Fig. 11. Structure of vibrations induced by firing a single charge of explosives – Position 1 and Position 2 at the distance of 262 m and 430 m from the detonation site, respectively



Rys. 12. Struktura drgań wzbudzonych odpaleniem pojedynczego ładunku MW – stanowiska 3 i 4 w odległości 590 m od miejsca detonacji, ale na różnych kierunkach od wyrobiska

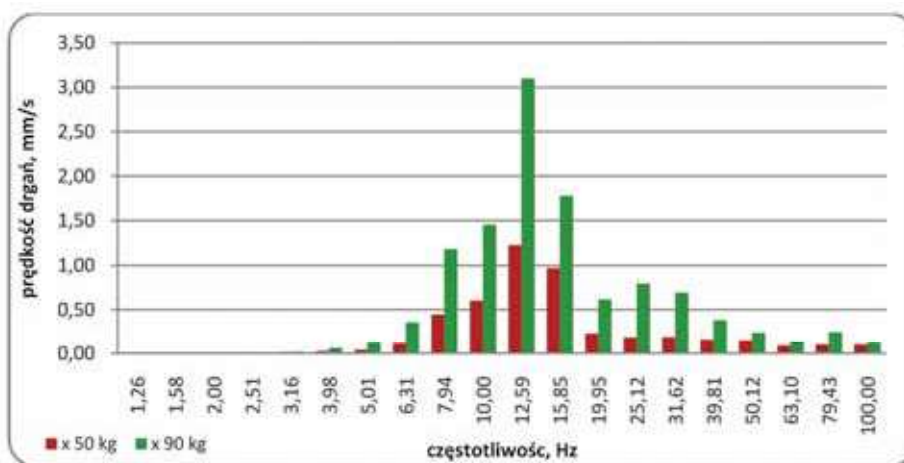
Fig. 12. Structure of vibrations induced by firing a single charge of explosives - Position 3 and Position 4 at the distance of 590 m from the detonation site, but in different directions from the pit





Rys. 13. Porównanie zapisu drgań wzbudzonych odpaleniem pojedynczych ładunków MW o masie 50 kg i 90 kg

Fig. 13. Comparison of vibration recordings triggered by firing individual explosive charges of 50 kg and 90 kg in weight



Rys. 14. Porównanie struktury drgań wzbudzonych odpaleniem pojedynczych ładunków MW o masie 50 kg i 90 kg (dla sejsmogramów z rysunku 13)

Fig. 14. Comparison of the structure of vibrations induced by detonating a single explosive charge of 50 kg and 90 kg in weight (for the seismograms from Fig. 13)

Trudno jest czasem zmniejszać wysokość ściany w wyrobisku, nie zawsze przynosi dobry efekt podział ładunku w otworze, a więc pozostaje zmiana średnicy otworu. Dobrze jest w czasie wstępnych prac badawczych określić wpływ masy ładunku w otworze na efekt sejsmiczny strzelania. W przypadku omawianych badań, przeprowadzono odpalenie pojedynczych ładunku MW umieszczonych w otworach o średnicy 80 mm i 105 mm. Pozwoliło to na porównanie intensywności i struktury drgań wzbudzanych ładunkami 50 kg i 90 kg MW (rys. 13 i 14).

Jak wynika z rys. 14, wzmocnienie intensywności drgań, w zakresie dominujących częstotliwości wynosi od 80% do 160%. Dla pozostałych stanowisk pomiarowych wzmocnienie wynosi od 120% do nawet 230%. Oznacza to, że wpływ masy ładunku MW w otworze w tym przypadku jest bardzo istotny.

W tym samym cyklu badawczym przeprowadzono pomiary intensywności drgań wzbudzanych w czasie odpalania 6 ładunków o masie 50 kg lub 88 kg MW, z opóźnieniem 10 ms, 20 ms, 30 ms, 80 ms i 110 ms. Do odpalania zastosowano zapalarkę doświadczalną ZT 480t. Przykładowe sejsmogramy drgań rejestrowanych (dla składowej poziomej) na najbliższym położonym stanowisku przedstawiono na rys. 15.

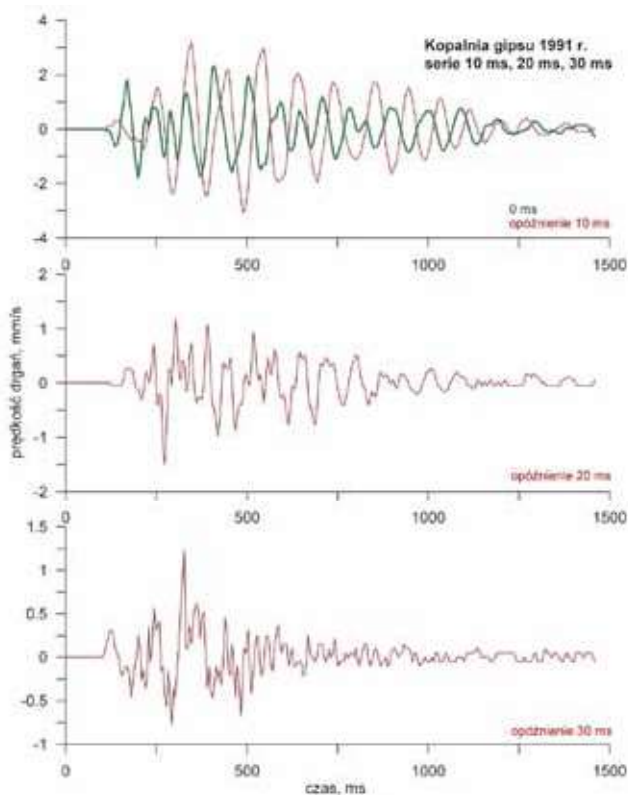
Sejsmogramy dotyczą serii odpalanych z opóźnieniem 10 ms, 20 ms i 30 ms, a masa ładunku w otworze wynosiła 88 kg. Dla porównania na rys. 15 przedstawiono również zapis drgań dla pojedynczego ładunku MW.

Przeprowadzona analiza wykazała istotny wpływ zastosowanego opóźnienia milisekundowego zarówno na intensywność, jak i strukturę zarejestrowanych drgań. Z rys. 15, 16 i 17 wynika, że intensywność drgań wzbudzonych odpaleniem serii ładunków z opóźnieniem 10 ms jest porównywalna z efektem od pojedynczego ładunku (rys. 14), natomiast wyraźnie niższa w przypadku serii odpalanych z opóźnieniem 20 i 30 ms.

Do podobnych wniosków skłania wynik analizy struktury częstotliwościowej drgań (rys. 16 i 17):

- struktura drgań wzbudzonych odpaleniem serii z opóźnieniem 10 ms jest zbliżona do pojedynczego ładunku MW, ale bardzo wyraźnie podkreślona jest dominacja częstotliwości 10 Hz; można przypuszczać, że większość energii drgań jest związana właśnie z tą częstotliwością,
- jak widać z rys. 17, całkowicie odmiennie przedstawia się struktura drgań wzbudzonych odpaleniem serii z opóźnieniem 20 ms i 30 ms. Nastąpiło przesunięcie częstotliwości dominujących w kierunku wyższych wartości – dla

opóźnienia 20 ms - 15,85 Hz, 19,95 Hz i 63,10 Hz; a dla opóźnienia 30 ms – 15,85 Hz i 39,81 Hz. Potwierdza się wyraźnie niższa intensywność tych drgań, szczególnie dla opóźnienia 30 ms (por. rys. 16 i 17).



Rys. 15. Sejsmogramy drgań wzbudzonych odpaleniem serii 6 ładunków MW z zastosowaniem opóźnienia 10 ms, 20 ms i 30 ms

Fig. 15. Seismograms of vibrations induced during firing six explosive charges designed with a delay of 10 ms, 20 ms and 30 ms

Nawet wizualna analiza rys. 15, 16 i 17 potwierdza wcześniejsze spostrzeżenia, że przez dobór opóźnienia między poszczególnymi ładunkami MW w serii można modyfikować strukturę wzbudzanych drgań. Pozostaje pytanie jak szukać

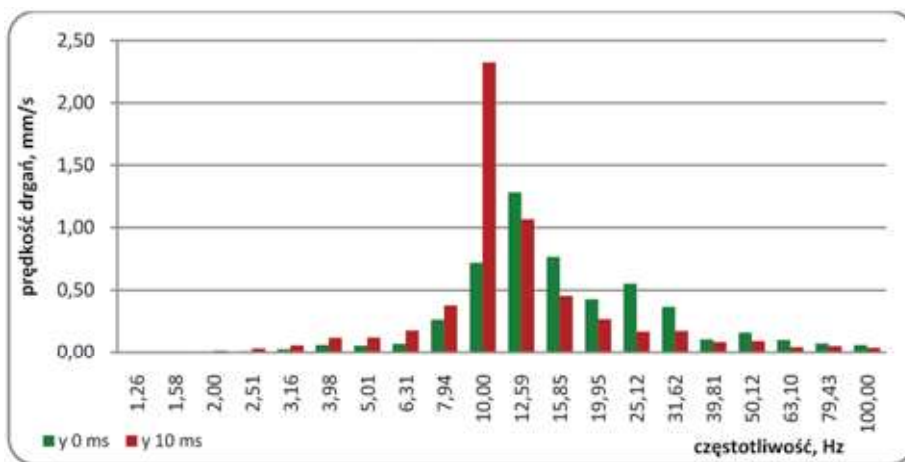
optymalnego opóźnienia, które pozwoli na zmniejszenie intensywności wzbudzanych drgań? Zauważona w czasie odpalania pojedynczych ładunków MW zmienność struktury drgań w zależności od odległości i kierunku propagacji, skłania do przyjmowania rozwiązań, które pozwolą na uwzględnienie wpływu szeregu czynników i ostrożnego, a może raczej rozsądnego dokonywania wyboru.

3. Dobór optymalnego opóźnienia milisekundowego

Jak już wspomniano, analiza efektu sejsmicznego wzbudzonego odpaleniem pojedynczych ładunków MW, pozwala na określenie nie tylko intensywności i struktury drgań, ale również czasu trwania impulsu. Określenie czasu trwania istotnej fazy drgań pozwala na ograniczenie zakresu poszukiwanych wartości opóźnień milisekundowych. W omawianych badaniach wskazano, że już opóźnienie 70 ms, a na pewno opóźnienie 150 ms, rozdziela sygnał sejsmiczny od poszczególnych ładunków MW, czyli należy poszukiwać opóźnień poniżej tych wartości. Czy można dokonać takiego uogólnienia dla całego otoczenia wyrobiska górniczego?

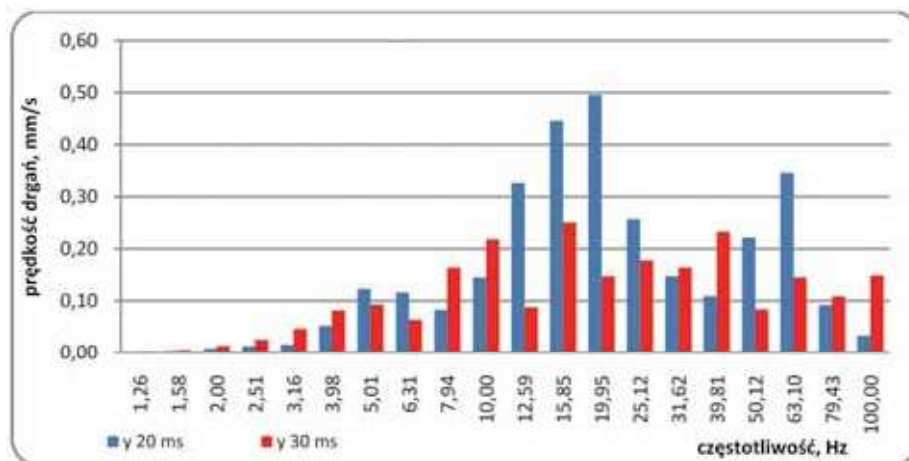
Na rys. 10 i 11 wykazano, że struktura wzbudzanych drgań w otoczeniu może być istotnie różna, a to oznacza, że modyfikacja przez dobór opóźnień milisekundowych może również spowodować niekorzystne zmiany w strukturze drgań w niektórych rejonach. Dobrym przykładem takiego zdarzenia jest zastosowanie opóźnienia 110 ms do odpalenia serii 6 ładunków MW i analiza wyników pomiarów w 4 punktach (opisanych na rysunkach 11 i 12) w otoczeniu wyrobiska górniczego. Sejsmogramy drgań przedstawione na rysunkach 18 i 19 pozwalają stwierdzić, że na stanowisku 1 nastąpiło rozdzielenie efektu sejsmicznego od kolejnych ładunków MW odpalanych z opóźnieniem 110 ms.

Wyraźnie zaznacza się wejście sygnału od kolejno odpalanych ładunków MW. Potwierdza to spostrzeżenia wynikające z rys. 5. Na kolejnych stanowiskach trudno jest zauważyć tę prawidłowość, co świadczy o silnej modyfikacji sygnału sejsmicznego. Sejsmogramy drgań zarejestrowanych na stanowiskach 2, 3 i 4 charakteryzują się regularnym przebiegiem o czasie trwania około 2,5 s i częstotliwości dominującej 10 Hz, co stwierdzono na podstawie analizy trzecjowej (rys. 20-23). Na rysunkach tych przedstawiono porównanie struktury



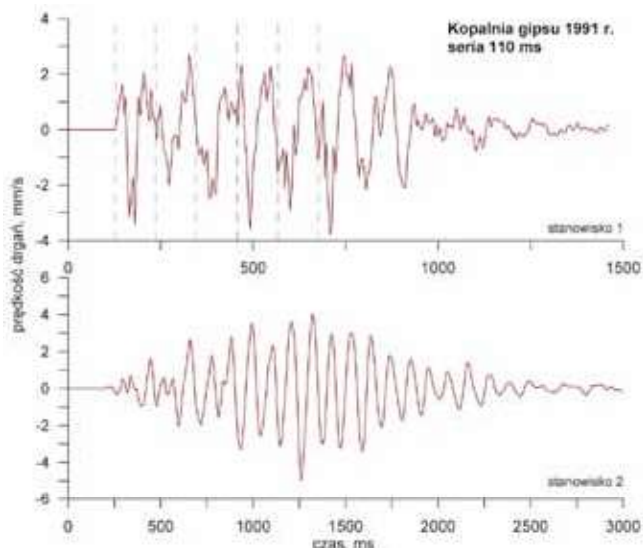
Rys. 16. Porównanie struktury drgań wzbudzonych odpaleniem pojedynczego ładunku MW i serii 6 ładunków z opóźnieniem 10 ms

Fig. 16. Comparison of the structure of vibrations induced by detonating a single explosive charge and blasting pattern consisting of six charges with a delay of 10 ms



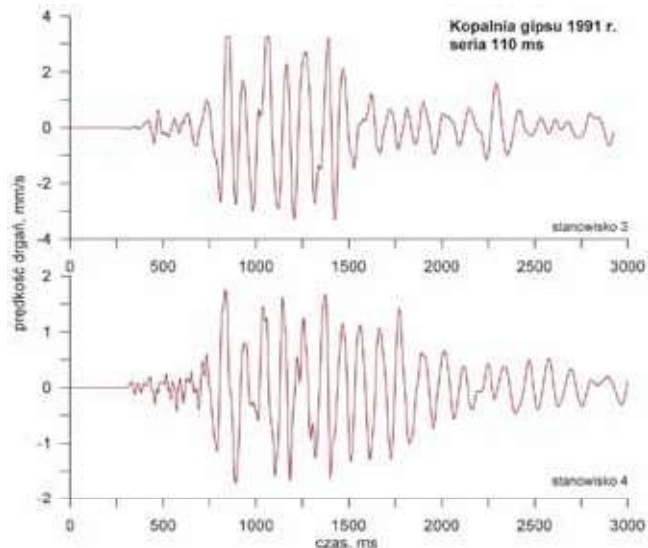
Rys. 17. Porównanie struktury drgań wzbudzonych odpaleniem serii 6 ładunków MW z opóźnieniem 20 ms i 30 ms

Fig. 17. Comparison of the structure of vibrations induced by firing a series of six charges with 20 ms and 30 ms delay



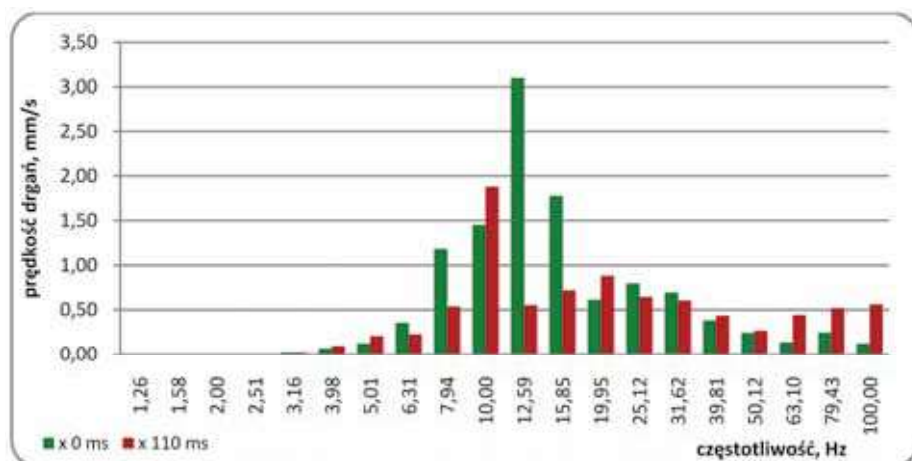
Rys. 18. Sejsmogramy drgań wzbudzonych odpaleniem serii 6 ładunków MW – stanowiska 1 i 2

Fig. 18. Seismograms of vibrations induced by detonating a series of six charges – Positions 1 and 2



Rys. 19. Sejsmogramy drgań wzbudzonych odpaleniem serii 6 ładunków MW – stanowiska 3 i 4

Fig. 19. Seismograms of vibrations induced by detonating a series of six charges – Positions 3 and 4

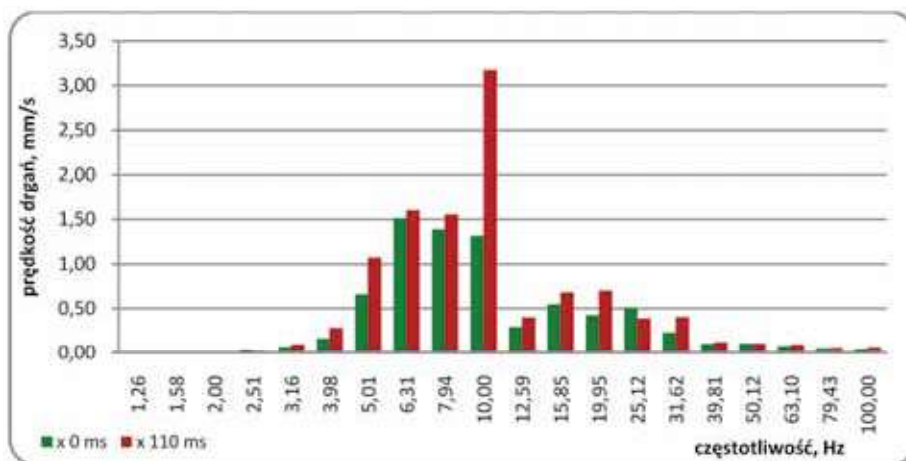


Rys. 20. Porównanie struktury drgań wzbudzonych odpaleniem pojedynczego ładunku MW i serii 6 ładunków MW z opóźnieniem 110 ms – stanowisko 1

Fig. 20. Comparison of the structure of vibrations induced by firing a single and a series of six charges with 110 ms delay – Position 1

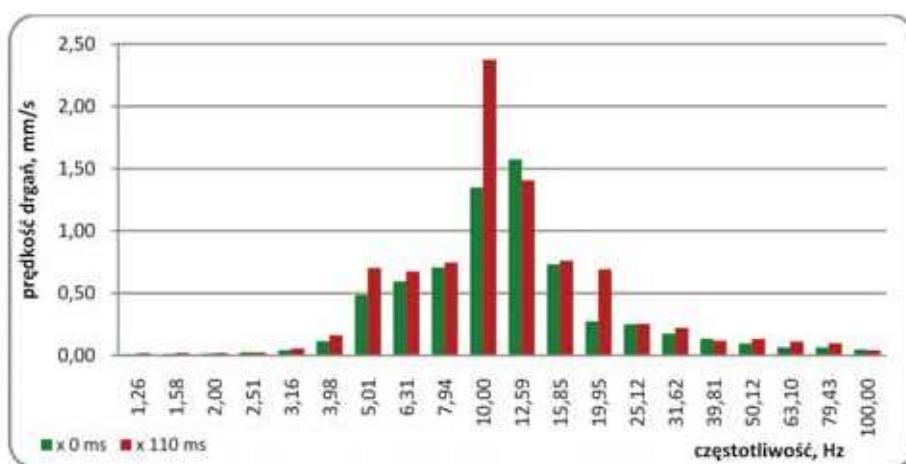
Rys. 21. Porównanie struktury drgań wzbudzonych odpaleniem pojedynczego ładunku MW i serii 6 ładunków MW z opóźnieniem 110 ms – stanowisko 2

Fig. 21. Comparison of the structure of vibrations induced by firing a single and a series of six charges with 110 ms delay – Position 2



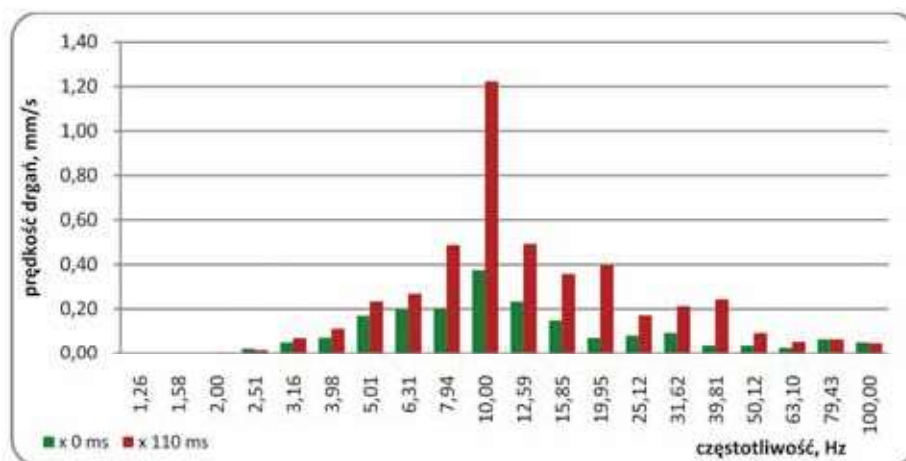
Rys. 22. Porównanie struktury drgań wzbudzonych odpaleniem pojedynczego ładunku MW i serii 6 ładunków MW z opóźnieniem 110 ms – stanowisko 3

Fig. 22. Comparison of the structure of vibrations induced by firing a single and a series of six charges with 110 ms delay – Position 3



Rys. 23. Porównanie struktury drgań wzbudzonych odpaleniem pojedynczego ładunku MW i serii 6 ładunków MW z opóźnieniem 110 ms – stanowisko 4

Fig. 23. Comparison of the structure of vibrations induced by firing a single and a series of six charges with 110 ms delay – Position 4



drgań wzbudzonych pojedynczym ładunkiem MW i serią 6 ładunków odpalanych z opóźnieniem 110 ms. Na wszystkich stanowiskach pomiarowych w strukturze drgań dominuje częstotliwość 10 Hz, która jest związana z zastosowanym opóźnieniem milisekundowym – częstotliwość własna opóźnienia milisekundowego.

Można zauważyć również silne podobieństwo struktury drgań wzbudzonych serią i pojedynczym ładunkiem MW. Oznacza to, że jednak wyraźne rozdzielanie sygnałów na stanowisku 1 występuje również na pozostałych stanowiskach, a w strukturze drgań dominuje częstotliwość własna opóźnienia, co zdecydowanie zmienia zapis drgań na tych stanowiskach.

Zwraca uwagę fakt, że z wyłączeniem stanowiska 1, na pozostałych nastąpiło silne wzmocnienie intensywności drgań od 80% do 220%, przede wszystkim dla częstotliwości dominującej 10 Hz. Na stanowisku 1, w zakresie częstotliwości 10 Hz, nastąpiło wzmocnienie 25%, ale w przypadku tego stanowiska można mówić nawet o obniżeniu intensywności w stosunku do pojedynczego ładunku MW.

4. Podsumowanie

W latach 1989 do 1991 w Instytucie Górnictwa Odkrywkowego AGH prowadzono badania nad wpływem

wem opóźnienia milisekundowego na intensywność drgań wzbudzanych w czasie robót strzałowych. Skonstruowana dla celów badawczych zapalarka milisekundowa ZT 480t umożliwiła zadawanie opóźnień w zakresie od 0 ms do 150 ms, co w warunkach krajowych było ewidentną nowością. Badania te pozwoliły na zebranie pierwszych doświadczeń, wyciągnięcie pierwszych wniosków, które dały podstawy do nakreślenia planu dalszych badań. Efektem tych badań była również świadomość konieczności budowy systemów odpalania ładunków MW, które pozwolą na szerszy wybór opóźnień milisekundowych. Jak już wspomniano, w roku 1994 została dopuszczona do stosowania w górnictwie odkrywkowym zapalarka milisekundowa EXPLO-201, a w roku 1995 rozpoczęto stosowanie w Polsce systemu nieelektrycznego NONEL (firmy Nitro Nobel AB).

W pracach badawczych nad opóźnieniem milisekundowym wprowadzono po raz pierwszy odpalanie pojedynczych ładunków MW, jako sposób na zebranie danych o strukturze drgań mierzonych w różnych punktach w otoczeniu. Dzisiaj ten sposób postępowania można uznać za standard, a informacja uzyskana z odpalania pojedynczych ładunków (sejsmogramy drgań) jest bazową dla programów komputerowych do projektowania opóźnień milisekundowych, dla odpalania serii ładunków MW z zastosowaniem zapalników elektronicznych (np. program Blasting Solutions).

W warunkach kopalni gipsu, dzięki odpalaniu pojedynczych ładunków MW, uzyskano ważną informację o rozdzieleniu sygnału od pojedynczego ładunku MW w przypadku zastosowania opóźnienia 70 ms. Ograniczało to zakres poszukiwanych opóźnień do wartości niższych, co zostało potwierdzone w artykule – opóźnienia 20 ms i 30 ms pozwalają na wyraźne obniżenie intensywności drgań.

Podstawowym wnioskiem, który wynikał z przeprowadzonych badań, to możliwość modyfikacji struktury drgań przez dobór odpowiedniego opóźnienia milisekundowego. Przeprowadzone dzisiaj bardziej zaawansowane analizy częstotliwościowe drgań potwierdziły sformułowane wtedy wnioski. Opisany w artykule przykład zastosowania opóźnienia 110 ms i pojawienie się, jako dominującej w sygnale, częstotliwości własnej opóźnienia milisekundowego, wskazuje, że wprowadzenie innego opóźnienia milisekundowego powinno być poprzedzone badaniami, gdyż można osiągnąć efekt odwrotny do zakładanego.

Zmiana struktury drgań podłoża może mieć wpływ na interakcję układu podłoża-budynki, dlatego też w planach na dalsze badania ujęto również analizę drgań fundamentów budynków. Prace takie przeprowadzono w roku 1996 w kopalni wapienia z zastosowaniem zapalarki Explo-201.

Analizy przedstawione w niniejszym artykule zostały przeprowadzone z wykorzystaniem archiwalnych pomiarów drgań wykonanych w latach 1989 do 1991, w Instytucie Górnictwa Odkrywkowego AGH.

Literatura

- BATKO P., WINZER J. 2008 - Uwarunkowania i pierwsze doświadczenia wprowadzania zapalników elektronicznych w Polsce. Bezpieczeństwo Robót Strzałowych. GIG. Katowice, s. 99-108.
- BIESSIKIRSKI R. 1991 - Wybrane informacje na temat konstrukcji i testowania zapalarki milisekundowej – Konferencja: Problemy techniki strzelniczej w górnictwie – perspektywy rozwoju. Wydawnictwo ZG AGH – 347/91. Kraków, s. 61-64.
- BIESSIKIRSKI R. 1996 – Zapalarka milisekundowa Explo-201 – Konferencja: Technika strzelnicza w górnictwie. Jaszowiec 1996 r. Wydawnictwo IGSMiE PAN Kraków, s. 47-67.
- BIESSIKIRSKI R., WINZER J. 1991 – Zastosowanie aparatury ABEM Terraloc Mk3 do badań sejsmicznych w górnictwie odkrywkowym. Konferencja: Problemy techniki strzelniczej w górnictwie – perspektywy rozwoju. Kraków, s. 97-104.
- BIESSIKIRSKI R., SIERADZKI J., WINZER J. 2001 - Uwagi praktyczne do nieelektrycznego odpalania długich otworów na przykładzie systemu Nonel Unidet. Konferencja: Technika strzelnicza w górnictwie. Jaszowiec 2001. Agencja Wydawniczo-Poligraficzna „ART-TEKST”, s. 241-251.
- DWOROK R. 1993 - System zapalarki typu BARBARA 30 z regulowanymi elektronicznie opóźnieniami międzyszałowymi. Konferencja: Materiały wybuchowe i technika strzelnicza – Aktualny stan i perspektywy rozwoju. Gliwice-Kraków 1993 r. Wydawnictwo AGAT-PRINT, s. 222-236.
- LANDMAN G.R.V. 2010 - How electronics can release the imagination. The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy. Volume 110, s. 491-499.
- MALLAT S., ZHANG Z. 1993 - Matching Pursuit with time – frequency dictionaries. IEEE Transactions on Signal Processing.
- PERSSON P., HOLMBERG R. AND LEE J. 1993 - Rock Blasting and Explosives Engineering. CRC Press, p. 560. ISBN 9780849389788.
- SOLTYS A. 2015 - Analiza oddziaływania na otoczenie drgań wzbudzanych przez roboty strzałowe z zastosowaniem metody Matching Pursuit. Monografia – Wydawnictwa AGH Kraków, 188 s.
- WINZER J. 2004 - Wpływ opóźnień milisekundowych przy prowadzeniu strzelań eksploatacyjnych na częstotliwościowe charakterystyki drgań gruntu i budynków. Zeszyty Naukowe AGH „Górnictwo i Geoinżynieria” 3/1, s. 456-476.
- WINZER J., BIESSIKIRSKI R. 1996 - Uwagi o doborze opóźnienia milisekundowego ze względu na ograniczenie wielkości drgań parasejsmicznych. Konferencja: Technika strzelnicza w górnictwie. Jaszowiec 1996 r. Wydawnictwo IGSMiE PAN Kraków, s. 297-306.
- WINZER J., BIESSIKIRSKI R., SIERADZKI J. 1997 – Minimalizacja szkodliwego oddziaływania robót strzałowych na otoczenie, jako kierunek prac badawczych prowadzonych w Katedrze Górnictwa Odkrywkowego AGH. Górnictwo odkrywkowe a ochrona środowiska – Fakty i mity. Kraków, s. 367-378.

Artykuł wpłynął do redakcji – luty 2017
Artykuł akceptowano do druku 7.06.2017