



## Dobór opóźnień milisekundowych przy elektronicznym odpalaniu serii jednoszeregowych

### Selection of millisecond delays in the electronic initiating of the one row series

Dr inż. Anna Sołtys<sup>\*)</sup>

**Treść:** Wprowadzenie do stosowania w polskim górnictwie elektronicznego systemu inicjowania ładunków MW, zdecydowanie zwiększyło możliwości doboru optymalnego opóźnienia milisekundowego. Korzystnie wpłynęło również na poszerzenie zakresu projektowania wielootworowych siatek strzałowych, z użyciem programów komputerowych. Kilkuletnie doświadczenie uzyskane w oparciu o prace badawcze prowadzone wspólnie przez Laboratorium Robót Strzałowych i Ochrony Środowiska KGO AGH oraz firmy Austin Powder Polska Sp. z o.o., pozwoliło na wypracowanie procedury doboru optymalnego opóźnienia milisekundowego poprzez wybór właściwego rozwiązania (wariantu) symulowanego przez program komputerowy. W oparciu o wypracowaną procedurę, w artykule przedstawiono wyniki badań uzyskanych w kopalni margli podczas odpalania ładunków MW ułożonych w jednym szeregu. Dla tych warunków oraz mając na uwadze skomplikowaną strukturę drgań, głównym celem badań było zaprojektowanie optymalnych opóźnień milisekundowych, których zastosowanie umożliwi osiągnięcie jak najniższej intensywności drgań przy jednoczesnym modulowaniu częstotliwości tych drgań, w kierunku uzyskania korzystnej struktury w aspekcie oceny oddziaływania na budynki zgodnie z normą PN-B-02170:2016-12. Na podstawie przeprowadzonych badań udało się uzyskać pozytywne efekty, ale również wskazać dalsze możliwości wprowadzenia zmian w technice wykonywania robót strzałowych

**Abstract:** The introduction to the use in the Polish mining of an electronic system for initiating explosive charges significantly increased the possibilities of selecting the optimal millisecond delay. It was also beneficial for expanding the design possibilities of multi-hole blasting patterns, using computer programs. Several years of experience gained by research carried out jointly by the Research Laboratory of Blasting Works and Environmental Protection AGH, and Austin Powder Polska LLC has allowed to work out the procedure of selecting the optimal millisecond delay by choosing the right solution (variant) simulated by the software. Based on the developed procedure, the article presents the results of field tests obtained in the marl mine using a single row blasting. For these conditions and having in mind the complex vibration structure, the primary goal of the research was to design optimal millisecond delays, application of which will allow achieving the lowest vibration intensity while modulating the frequency of these vibrations, in order to obtain a favorable structure in the aspect of impact assessment on buildings in accordance with PN-B-02170:2016-12. Based on the test results, positive effects were obtained, but also further possibilities of introducing changes in the technique of blasting works were indicated.

#### Słowa kluczowe:

górnictwo, technika strzelnicza, strzelanie milisekundowe, minimalizacja drgań

#### Keywords:

mining, blasting works, millisecond blasting technique, reduction of blast 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 ich załadunku do otworów strzałowych, elektronicznych systemów odpalania, stwarza możliwości do 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. System nieelektryczny umożliwił rozszerzenie wyboru opóźnienia milisekundowego, pozwolił zwielokrotnić liczbę otworów odpalanych w serii, zapewnił optymalne projektowanie robót strzałowych z zabezpieczeniem oczekiwanej granulacji urobku, jak i minimalizacji oddziaływania na zabudowania w otoczeniu.

Na początku obecnego stulecia w polskim górnictwie odkrywkowym rozpoczęto stosowanie 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 ich użycia.

Podstawowym problemem dobrego wykorzystania nowoczesnych systemów odpalania jest świadomy wybór

<sup>\*)</sup> AGH, Akademia Górniczo-Hutnicza, WGiG w Krakowie

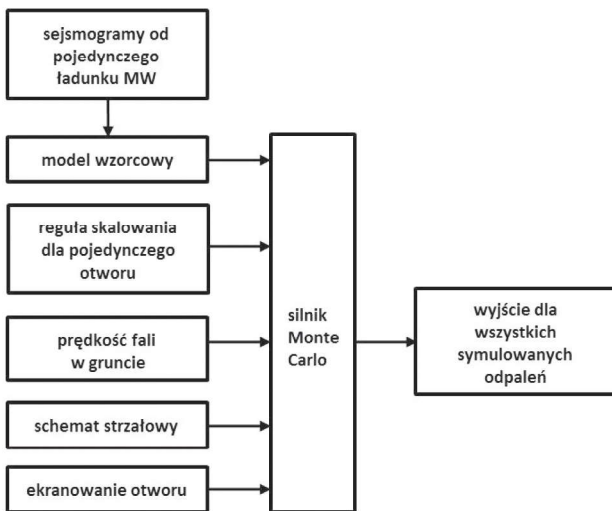
opóźnienia milisekundowego. Jest to szczególnie ważne w przypadkach, gdy roboty prowadzone są wieloszerogowo lub przy użyciu dużej liczby ładunków MW.

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 (Winzer i in. 2016). 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 odpaleniem pojedynczych ładunków MW. Pomiar drgań należy prowadzić w kilku punktach w otoczeniu kopalni, o ile to możliwe zarówno w podłożu (gruncie), jak i na fundamentach 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.

Taki sposób postępowania przyjęty został w algorytmie programu *Blasting Solutions* (BS) firmy Austin Powder.

Pełne wykorzystanie systemu elektronicznego jest ściśle związane z zastosowaniem informatycznych programów do projektowania opóźnień milisekundowych w konkretnych warunkach serii otworów, z uwzględnieniem lokalnych warunków złoża i budowy geologicznej w otoczeniu. Stosowany od ponad 20 lat statystyczny model prognozowania drgań wykorzystuje technikę Monte Carlo. Możliwości modelu były i są w dalszym ciągu ulepszane na bazie prac badawczych i badań terenowych (Blair 2008; Burke 2008; Grothe, Reinders 2007).

Zastosowanie modelu wymaga zdefiniowania szeregu parametrów wejściowych, jak to pokazano na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat blokowy modelu prognozowania drgań  
Fig. 1. Block diagram of the vibration prediction model

Program, na podstawie wskazanych powyżej danych wejściowych, dokonuje symulacji przebiegu drgań podłoża z zastosowaniem różnych kombinacji opóźnień, wskazując jako wynik końcowy maksymalne wartości prędkości drgań i skorelowane z nimi częstotliwości. Wynik obliczeń może być uzupełniony dodatkowo współczynnikami, które pomagają w dokonywaniu wyboru rozwiązania (Soltys i in. 2017).

Efektem obliczeń programu BS jest propozycja czasem ponad tysiąca i więcej kombinacji opóźnień między ładunkami MW i między szeregami. Każda propozycja rozwiązania może zostać zaprezentowana w postaci przebiegów drgań

na poszczególnych składowych oraz wykresu zmienności w czasie wektora przestrzennego prędkości drgań.

Algorytm programu BS umożliwia transfer danych w postaci plików (przebiegi drgań w czasie), a to pozwala na przeprowadzanie dalszych analiz, które wspomagają trafność podejmowanych wyborów i decyzji.

Zadaniem projektującego strzelanie jest dokonanie wyboru rozwiązania, które przyniesie oczekiwane efekty. Jak wybrać optymalne rozwiązanie?

## 2. Procedura wyboru optymalnego rozwiązania

Wybór optymalnego rozwiązania jest najważniejszym momentem pracy projektującego strzelanie. Dokonanie wyboru spośród tysiąca rozwiązań musi być z jednej strony poparte szerszymi analizami, a z drugiej strony konieczna jest weryfikacja wybranego rozwiązania przez pomiar drgań w wybranym punkcie w otoczeniu kopalni i porównanie efektu prognozowanego z rzeczywistym.

Cztery lata stosowania programu BS do projektowania odpalania wieloszerogowych siatek ładunków MW pozwoliło na wypracowanie następującej procedury wyboru optymalnego rozwiązania (Soltys i in. 2017):

- analiza dotychczasowych badań pod kątem intensywności i struktury drgań podłoża oraz fundamentu budynku,
- analiza interakcji układu budynek-podłoże,
- wskazanie pożądanej intensywności i struktury drgań podłoża,
- określenie wskaźników pozwalających na wyselekcjonowanie grupy rozwiązań spełniających oczekiwania,
- analiza szczegółowa kilku kombinacji opóźnień,
- wybór optymalnego rozwiązania,
- wykonanie strzelania z zastosowaniem wybranego rozwiązania,
- weryfikacja symulacji drgań przez porównanie z wynikiem pomiarów kontrolnych.

W badaniach wpływu robót strzałowych na zabudowania w otoczeniu koniecznym jest analizowanie struktury drgań wzbudzanych w podłożu, jak i drgań przenoszonych do budynków. Rozpoznanie zjawiska interakcji układ budynek-podłoże stanowi niejednokrotnie klucz do poszukiwania optymalnych rozwiązań. Jak wykazano w szeregu publikacji, opóźnienie milisekundowe ma istotny wpływ na strukturę drgań, czyli za pomocą czasu opóźnienia między detonacjami kolejnych ładunków MW można zmieniać strukturę wzbudzanych drgań podłoża, a tym samym poszukiwać rozwiązań pozwalających na uzyskanie silnego tłumienia drgań przy przejściu do fundamentu budynku.

Dlatego tak ważną informacją dla programu jest przebieg drgań wzbudzanych detonacją pojedynczego ładunku MW. Program BS opiera symulacje na zapisie drgań podłoża, ale dla projektującego strzelanie, bardzo ważną informacją jest również zapis drgań fundamentu uzyskany w wyniku pomiaru.

## 3. Badania przeprowadzone przy odpalaniu serii jednoszerogowych

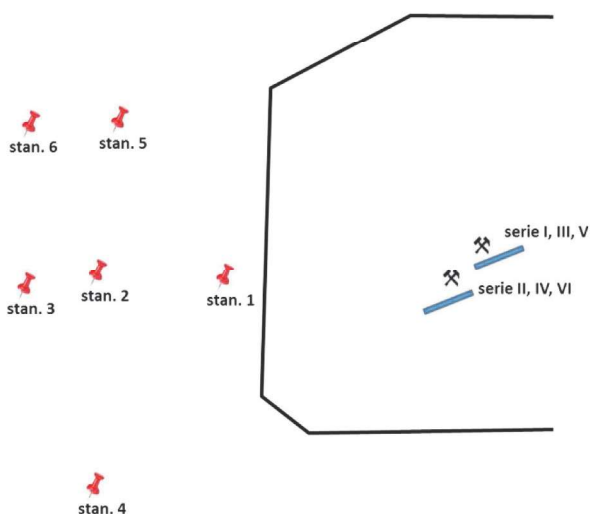
Opisaną powyżej procedurę badawczą zastosowano w kopalni margli, w czasie strzelań doświadczalnych mających na celu rozpoznanie możliwych do osiągnięcia efektów zastosowania elektronicznego systemu odpalania ładunków MW ułożonych w jednym szeregu:

- odpalono pojedynczy ładunek MW, jako bazowy dla projektowania kolejnych serii; wzbudzone drgania mie-

rzono na 5 stanowiskach pomiarowych gruntowych oraz 2 stanowiskach na fundamentach budynków,  
 – odpalono po trzy serie ładunków, zlokalizowane w rejonie najbliższym do zabudowań; wzbudzone drgania mierzone na 5 stanowiskach pomiarowych gruntowych oraz 3 stanowiskach na fundamentach budynków.

Schematycznie lokalizację odpalania pojedynczych ładunków MW i serii oraz lokalizację stanowisk pomiarowych przedstawiono na rysunku 2.

W celu jak najszerszego ujęcia ewentualnej zmienności podłoża w otoczeniu wyrobiska, stanowiska pomiarowe (grunt) rozmieszczono, jako profil w kierunku zachodnim – stanowisko 1, 2 i 3 oraz w kierunku południowo-zachodnim (stanowisko 4) i północno-zachodnim (stanowisko 5). Na stanowiskach 3 i 5 dodatkowo zainstalowano aparaturę pomiarową również na fundamentach budynków – stanowisko 3' i 5'.

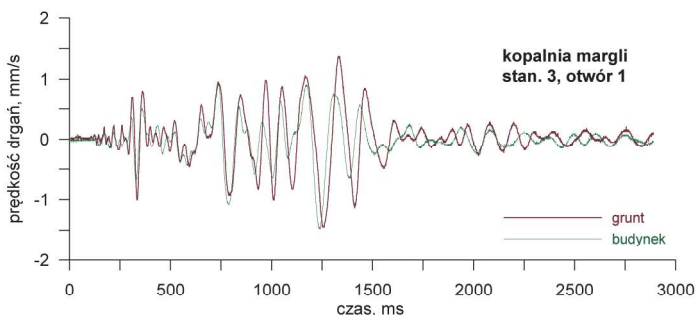


Rys. 2. Miejsca odpalania pojedynczego ładunku MW i serii doświadczalnych oraz rozmieszczenie stanowisk pomiarowych

Fig. 2. The blasting site of a single charge of explosives and experimental blasting pattern as well as the distribution of measurement stations

Rys. 3. Sejsmogram drgań zarejestrowanych na stanowisku 3 i 3' – odpalenie pojedynczego ładunku MW

Fig. 3. Seismogram of vibrations recorded at stands 3 and 3', - blasting of a single shot



Rys. 4. Porównanie struktury drgań podłoża i fundamentu budynku przedstawionych na rysunku 3

Fig. 4. Comparison of vibration structure recorded on the ground and foundation of the building shown in Figure 3

#### 4. Analiza wyników pomiarów intensywności drgań

##### 4.1. Odpalanie pojedynczych ładunków MW

Jak już wspomniano, w pierwszej kolejności przeprowadzono pomiary intensywności drgań przy odpalaniu pojedynczych ładunków MW w celu pozyskania informacji bazowych o strukturze i intensywności wzbudzanych drgań.

Przykładowy sejsmogram drgań podłoża i fundamentu budynku (składowa pozioma x), zarejestrowanych na stanowiskach 3 i 3', przedstawiono na rysunku 3. W wyniku przeprowadzonej analizy struktury zarejestrowanych drgań, na rysunku 4, przedstawiono porównanie histogramów maksymalnych wartości prędkości dla częstotliwości środkowych pasm tercjowych, dla drgań podłoża i fundamentu budynku.

Analiza sejsmogramów i struktury drgań wskazują jednoznacznie na występowanie dwóch faz rozwoju drgań:

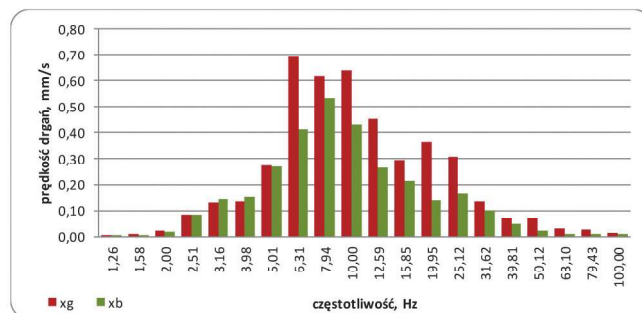
- faza I – charakteryzująca się wyższą prędkością przebiegu i wyższą częstotliwością – fala podłużna,
- faza II – o wyraźnie niższej prędkości przebiegu i niższych częstotliwościach – fala powierzchniowa.

Różne prędkości przebiegu fali sprężystej (podłużnej i powierzchniowej) w warstwach podłoża powodują, że ze wzrostem odległości od źródła drgań, wydłuża się czas dojścia fali do odbiornika. Oznacza to, że rośnie różnica czasu między fazą I i II.

W ocenie oddziaływania drgań na obiekty budowlane decydującą rolę odgrywają składowe poziome (x i y). Analizując histogramy struktury drgań przy przejściu z podłoża do fundamentu, można zauważyć, że składowe poziome przeważają w II fazie sejsmogramów (fala powierzchniowa), czyli II faza decyduje o intensywności oddziaływania drgań na obiekty. Można też wstępnie zauważyć, że w przypadku składowych poziomych w II fazie tłumienie jest niewielkie lub nie występuje w ogóle.

Analiza struktury drgań wzbudzonych pojedynczym ładunkiem MW wykazuje, że w II fazie drgań na składowych poziomych, dla stanowisk zlokalizowanych w rejonie zabudowań (stanowiska 3 i 5), zdecydowanie dominują częstotliwości 6,31 Hz, 7,94 Hz i 10,0 Hz.

Aktualnie roboty strzałowe w kopalni margli są prowadzone zgodnie z ekspertyzą z roku 2014, w której wyznaczono



równania propagacji oraz dopuszczalne ładunki MW, dla poszczególnych rejonów prowadzenia robót strzałowych. Zależności te zostały wykorzystane w aktualnej analizie wyników pomiarów dla zastosowania procedury badań kontrolnych (Winzer i in. 2016), co pozwala stwierdzić, w jakim stopniu strzelania bazowe (jednoładunkowe) korelują się z wyprowadzonym wcześniej równaniem oraz czy są zgodne z obowiązującymi ograniczeniami (rys. 5).

Analiza rysunku 5 wskazuje, że efekt sejsmiczny wzbudzony pojedynczym ładunkiem MW wykazuje silną korelację z wyprowadzonym równaniem propagacji – porównanie wysokości słupka zielonego i słupka brązowego. Porównanie wysokości słupka brązowego z niebieskim pozwala na stwierdzenie, że zastosowane ładunki spełniają ograniczenia, co do dopuszczalnej masy MW. Należy zaznaczyć, że przekroczenie wysokości słupka niebieskiego w przypadku stanowiska 1, wynika z położenia tego stanowiska wewnątrz strefy oddziaływania sejsmicznego (stanowisko odsunięte od zabudowań w kierunku wyrobiska).

Ponieważ, w dalszej części prac doświadczalnych, zaplanowano odpalenie 6 serii ładunków MW o lokalizacji zbliżonej do położenia otworu 1, do prac projektowych wykorzystano zapis drgań zarejestrowanych na stanowisku 3 (podłoże).

#### 4.2. Projektowanie siatki opóźnień z zastosowaniem programu *Blasting Solutions*

Zgodnie z przyjętą procedurą badawczą, do projektowania opóźnień milisekundowych w poszczególnych seriach, zastosowano program *Blasting Solutions* firmy Austin Powder, wykorzystując jako informację bazową sejsmogram drgań zarejestrowanych na stanowisku 3 w czasie odpalania otwo-

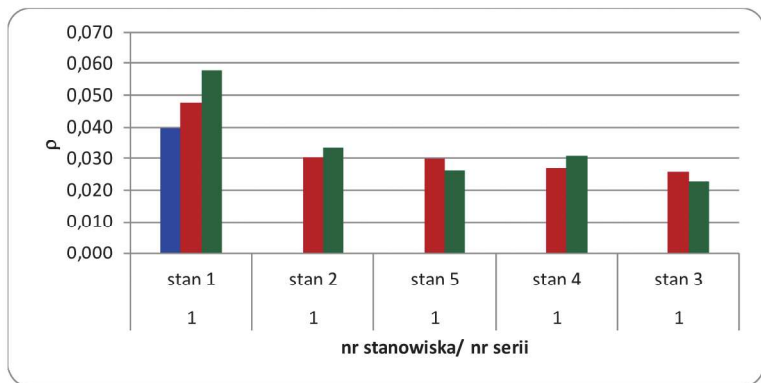
ru 1. Wprowadzenie do programu BS informacji bazowych pozwala na uzyskanie szeregu propozycji rozwiązań, a tę najlepszą musi wybrać operator programu, przez przygotowanie odpowiednich kryteriów, które pozwolą na wybór rozwiązania, które będzie spełniało określone założenia i oczekiwania.

W przypadku prac projektowych i symulacyjnych prowadzonych dla kopalni margli, generowano symulowane przebiegi drgań, które były dodatkowo poddawane analizie struktury drgań. Pozwoliło to na dokonanie wyboru optymalnego rozwiązania, przez sterowanie strukturą drgań, przede wszystkim w II fazie sejsmogramu. Zmiana struktury drgań i przesunięcie dominujących częstotliwości w zakres bardziej korzystny, pod względem oceny oddziaływania, może być w tym przypadku dobrym kryterium wyboru rozwiązania.

Oczywiście w początkowej fazie badań dobrze jest wykonywać pomiary kontrolne, celem dokonania weryfikacji prognozy – w jakim stopniu projektowane drgania zostały zrealizowane po zastosowaniu rozwiązania wskazanego jako optymalne.

Dla przykładu, na rysunkach 6 i 7 przedstawiono weryfikację symulacji zaprojektowanej dla serii IV, wraz z analizą struktury drgań symulowanych i zmierzonych oraz porównanie tych struktur.

Analiza rysunku 6 pozwala stwierdzić, że istnieje duża zgodność przebiegu symulowanego z zarejestrowanym przebiegiem drgań. Jak już wspomniano, program BS uczy się, czyli im więcej informacji dostarczy się do jego bazy, tym to dopasowanie będzie lepsze i podniesie zdecydowanie jakość i sprawdzalność prognozowania. Istotne zbliżenie prognozy i realizacji występuje też w strukturze drgań (rys. 7), co jest elementem trudnym do osiągnięcia, a to bardzo dobrze rokuje dla skuteczności projektowania opóźnień milisekundowych.

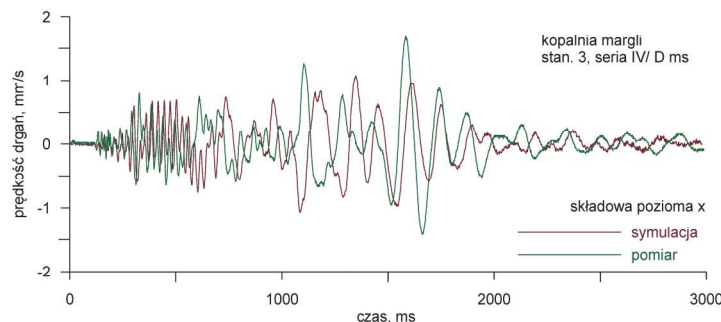


Otwór 1

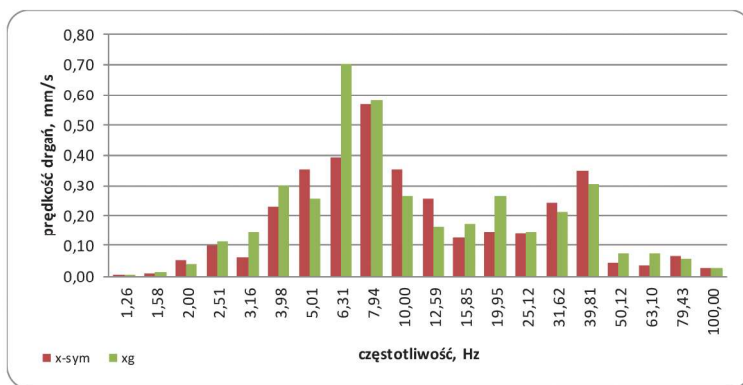
- dopuszczalny ładunek MW – 70 kg  
- ładunek zastosowany – 70 kg

Rys. 5. Porównanie wartości parametru dopuszczalnej z prognozowaną i wynikającą z pomiaru

Fig. 5. Comparison of the permissible parameter with the forecasted and resulting from the measurement



Rys. 6. Porównanie sejsmogramu symulowanego przez program BS z sejsmogramem zmierzonym na stanowisku 3  
Fig. 6. Comparison of the seismogram simulated by the BS program with the seismogram measured at test stand 3



Rys. 7. Porównanie struktury drgań symulowanych przez program BS i drgań zmierzonych w czasie odpalania serii IV

Fig. 7. Comparison of vibration simulated by the program and the vibration measured during the firing of a series of IV

### 4.3. Odpalenie serii ładunków MW

Założonym efektem do zrealizowania w trakcie prac doświadczalnych było uzyskanie zmniejszonego oddziaływania robót strzałowych przy zachowaniu aktualnie obowiązujących ograniczeń, co do masy stosowanego MW.

Efekt ten można osiągnąć przez zmniejszenie intensywności drgań propagowanych do otoczenia, jak również przez zmianę struktury wzbudzanych drgań.

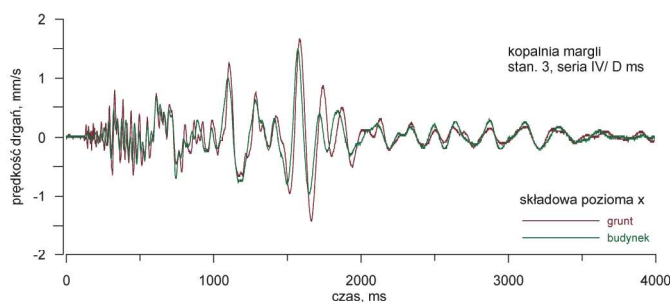
Takie założenia zostały przyjęte przy wyborze optymalnego rozwiązania, z proponowanych przez program BS. Jako kryterium podstawowe przyjęto minimalizację prędkości drgań, a kryterium dodatkowym było uzyskanie niższych częstotliwości dominujących. Kryterium niższych częstotliwości wynika z konstrukcji skal SWD normy (PN-B-02170:2016-12), które dopuszczają wyższe prędkości drgań dla niższych częstotliwości. W efekcie przesunięcie charakterystyki czę-

stotliwościowej drgań w zakres niższych wartości skutkuje zmniejszeniem oddziaływania drgań na budynek.

Każde strzelanie było osobno projektowane i dla każdego strzelania wyznaczano opóźnienie milisekundowe między poszczególnymi ładunkami MW w szeregu.

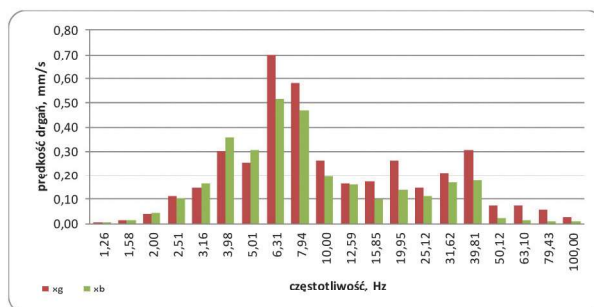
W czasie wykonywania robót strzałowych prowadzone były pomiary, których celem była ocena intensywności wzbudzanych drgań, ocena ich oddziaływania na obiekty w otoczeniu oraz weryfikacja prognozy i symulacji przebiegów drgań wykonanych przez program BS. Jak już wspomniano, jako informację bazową przyjęto efekt sejsmiczny zmierzony na stanowisku 3 i względem tego stanowiska dokonywano weryfikacji wyników symulacji.

Dla przykładu, dla serii IV, w której zastosowano opóźnienie D ms, na rysunkach 8 i 9 przedstawiono przebiegi drgań, zarejestrowanych na stanowisku 3, wraz z analizą struktury drgań.



Rys. 8. Sejsmogram drgań podłoża i fundamentu zarejestrowanych na stanowiskach 3 i 3' – seria IV

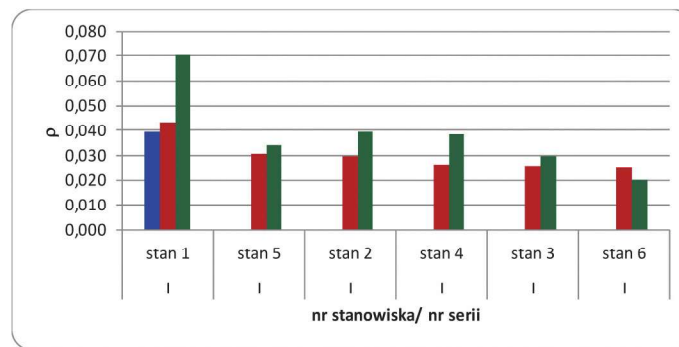
Fig. 8. A seismogram of ground and foundation vibrations recorded at stations 3 and 3' - series IV



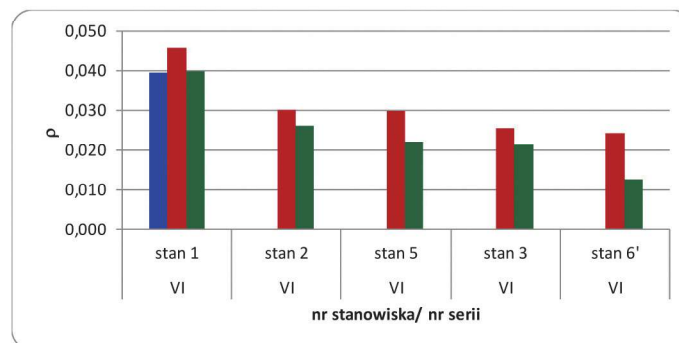
Rys. 9. Struktura drgań podłoża i fundamentu zarejestrowanych na stanowiskach 3 i 3' – seria IV

Fig. 9. Structure of ground and foundation vibrations registered at stations 3 and 3' - series IV

- seria I – A ms



- seria VI – F ms



**Rys. 10. Porównanie wartości parametru dopuszczalnej z prognozowaną i wynikającą z pomiaru**

**Fig. 10. Comparison of the permissible parameter with the forecasted and resulting from the measurement**

Do wstępnej analizy porównawczej, podobnie jak w przypadku pojedynczych ładunków MW, zastosowano procedurę badań kontrolnych. Wynik obliczeń przedstawiono graficznie na rysunku 10, dla serii I odpalanej z opóźnieniem A ms, uzyskując efekt najmniej korzystny oraz dla serii VI, którą odpalono z opóźnieniem F ms, uzyskując najlepszy efekt w aspekcie obniżenia intensywności drgań.

Z rysunku 10 wynika, że zastosowanie opóźnienia F ms jest optymalnym, pozwalającym nawet na obniżenie intensywności drgań w stosunku do wartości prognozowanych (porównanie wysokości słupków zielonego i brązowego).

Określając warunki bezpiecznego dla otoczenia wykonywania robót strzałowych, nie można pominąć faktu, że w większości przypadków równania propagacji wyznaczane są dla podłoża gruntowego, czyli dla drgań propagowanych w podłożu. Natomiast ochronie podlegają budynki, które na tym podłożu są posadowione. Oznacza to, że istotnym elementem procedury jest rozpoznanie interakcji układu budynek-podłoże. Zatem znowu wraca problem częstotliwości drgań, czyli struktury drgań wzbudanych w podłożu. Można przyjąć założenie, że drgania przy przejściu z podłoża do fundamentu budynku, ulegają mniejszemu lub większemu tłumieniu. Również częstotliwość drgań ulega modyfikacji i w większości przypadków częstotliwości wyższe nie przechodzą do fundamentu budynku. Natomiast modyfikacja częstotliwości i tłumienie intensywności w zakresie częstotliwości niższych czasem jest pomijalna. Dlatego też badania interakcji układu budynek-podłoże winny być prowadzone z uwzględnieniem struktury drgań zarówno podłoża, jak i fundamentu budynku.

Zmieniona w grudniu 2016 roku polska norma dotycząca oceny wpływu drgań na obiekty budowlane, w szczególności sposób podkreśla znaczenie częstotliwości drgań, stawiając

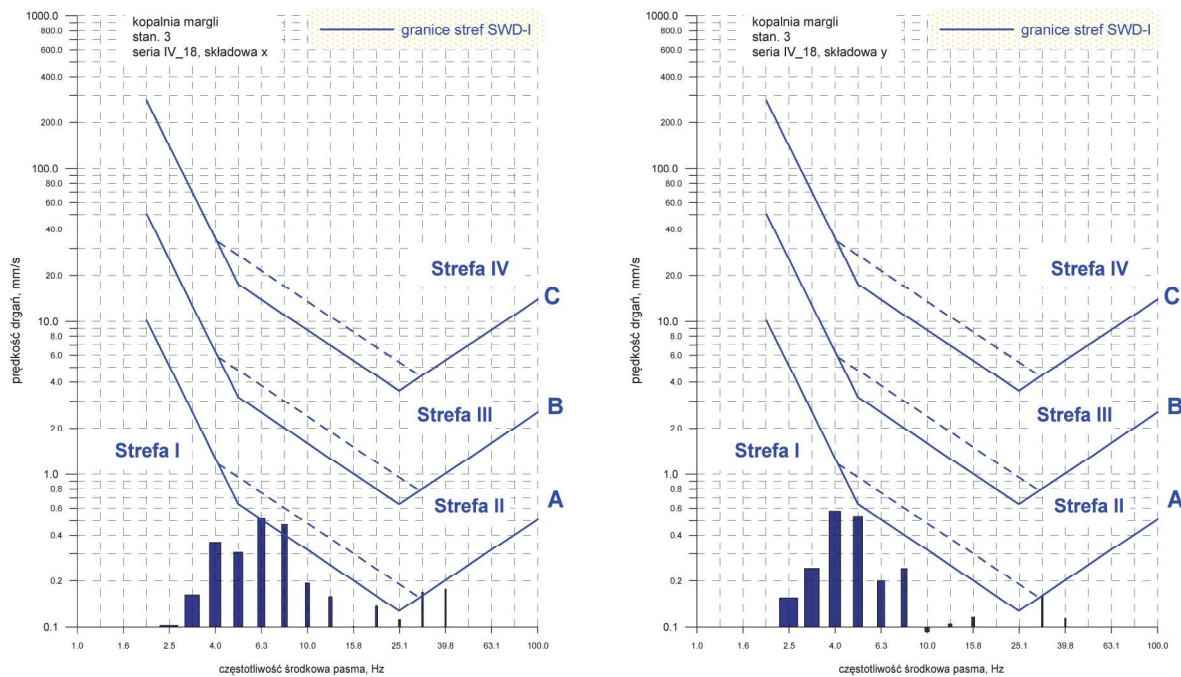
wymagania dotyczące procedury korzystania ze skal SWD. Aktualnie na skalę SWD nanosi się nie wartości maksymalne drgań, ale bada się strukturę rejestrowanych drgań, a na skalę SWD nanosi się histogram wartości maksymalnych dla częstotliwości środkowych pasm tercjowych. Oznacza to, że zarejestrowane przebiegi drgań należy poddać analizie tercjowej i wynik tej analizy (histogram) nanosi się na skalę SWD celem dokonania kwalifikacji oddziaływania.

Taki tok postępowania stwarza dodatkowe wymagania, co do stosowanych procedur analitycznych, ale również daje dodatkowe możliwości sterowania intensywnością oddziaływania drgań przez modyfikowanie ich struktury. Stanowi to potencjał dla projektujących roboty strzałowe, posiadających możliwości stosowania nowoczesnych systemów odpalania wspomaganymi przez programy komputerowe do projektowania opóźnień milisekundowych, symulowania przebiegów wzbudanych drgań i prowadzenia szczegółowych analiz na etapie projektu.

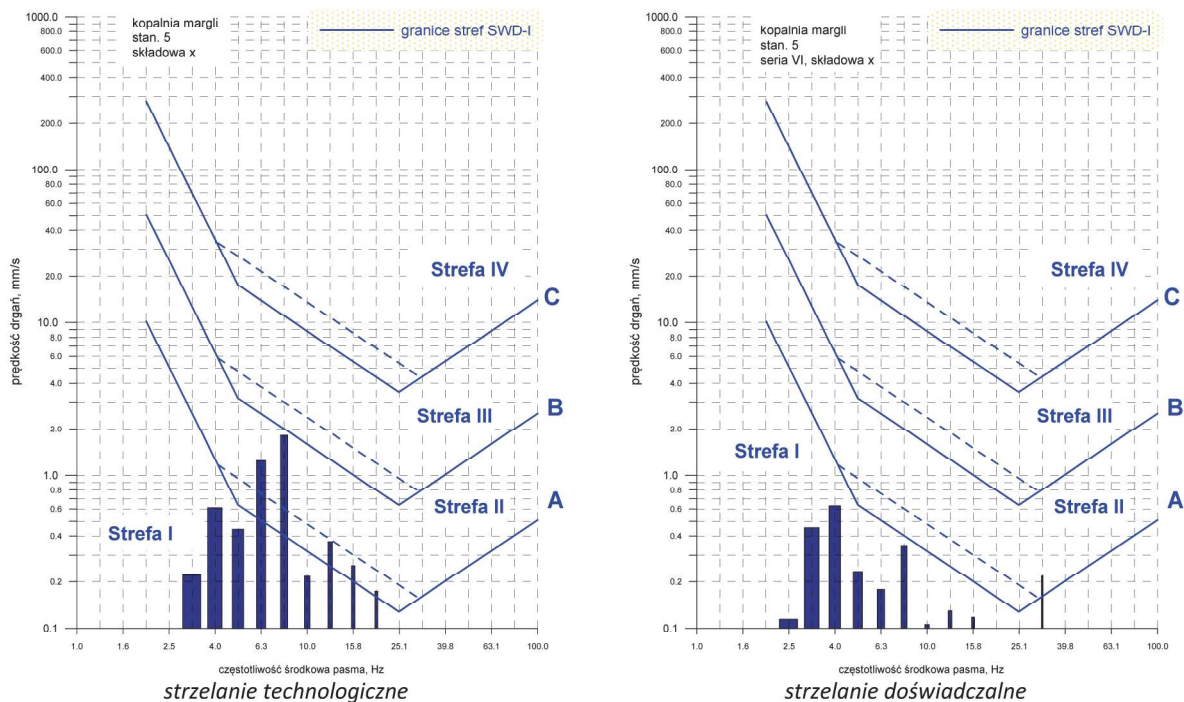
W pracach analitycznych efektu sejsmicznego robót strzałowych prowadzonych w kopalni margli z zastosowaniem odpalania systemem E\*Star, przeprowadzono również badanie struktury drgań na etapie projektowania jak i weryfikacji.

Analiza dodatkowo została uzupełniona o ocenę oddziaływania wzbudanych drgań na obiekty na stanowiskach 3', 5' i 6'. W efekcie uzyskano szereg informacji, które pozwalają na wybór optymalnego opóźnienia milisekundowego zarówno pod kątem zmniejszenia intensywności drgań, jak i uzyskania struktury korzystniejszej dla oddziaływania drgań na budynki w otoczeniu.

Analiza z zastosowaniem skal SWD pozwoliła na wskazanie opóźnień D ms, które zastosowane w serii IV, pozwoliło na przesunięcie charakterystyki wzbudanych drgań w zakres



Rys. 11. Ocena struktury drgań z zastosowaniem skali SWD-I – seria 12 ładunków MW odpalona z opóźnieniem D ms  
 Fig. 11. Vibration structure evaluation using the SWD-I scale - a blasting pattern consisting of 12 blast holes with a D ms delay



Rys. 12. Porównanie oceny oddziaływania drgań wzbudzanych robotami strzałowymi technologicznymi i doświadczalnymi (stanowisko 5')  
 Fig. 12. Comparison of impact assessment of vibrations induced by production and experimental blasting works (stand-5')

niższych wartości, a to w efekcie pozwoliło na zakwalifikowanie drgań, jako pomijalne w ocenie oddziaływania na budynek (rys.11).

Kopalnia margli prowadzi stały monitoring drgań wzbudzanych robotami strzałowymi. Stacja monitorująca jest zainstalowana również w budynku na stanowisku 5', dlatego

też możliwe było porównanie poziomu drgań wzbudzanych w czasie strzałów technologicznych z doświadczalnymi (rys.12).

Z rysunku 12 wynika, że struktura drgań wzbudzanych robotami strzałowymi uległa istotnemu przesunięciu, co pozwała również w tym przypadku zakwalifikować drgania, jako pomijalne w ocenie ich wpływu na budynek.

## 5. Podsumowanie

Przeprowadzone w kopalni margli roboty strzałowe, z zastosowaniem systemu elektronicznego E\*Star do odpalania ładunków MW, pozwoliły wstępnie określić możliwość wpływu na zmniejszenie oddziaływania drgań na zabudowania

Skomplikowana struktura drgań wzbudzanych w czasie robót strzałowych była przyczyną przyjęcia wstępnych założeń dla prac projektowych i celów do osiągnięcia.

Założeniem głównym było osiągnięcie jak najniższej intensywności drgań przy jednoczesnym modulowaniu częstotliwości tych drgań, w kierunku uzyskania korzystnej struktury w aspekcie oceny oddziaływania na budynki zgodnie z normą PN-B-02170:2016-12.

Celem podstawowym było opracowanie procedury doboru opóźnień milisekundowych dla odpalania jednoszeregowych serii ładunków MW w warunkach kopalni margli. Mimo ograniczonej liczby strzelań, udało się uzyskać pozytywne efekty, ale również wskazać dalsze możliwości wprowadzenia zmian w technice wykonywania robót strzałowych, przede wszystkim w kierunku znaczącego powiększenia liczby ładunków MW odpalanych w jednej serii.

Efekty pozytywne:

- przesunięcie struktury drgań w kierunku niższych częstotliwości, co pozwala na obniżenie kwalifikacji drgań do *pojemnych w ocenie ich wpływu na budynek* (rys. 11),
- w przypadku odpalania serii ładunków MW uzyskiwanie efektu sejsmicznego nieprzekraczającego efektu od pojedynczego ładunku MW (rys. 5 i 10), a to oznacza, że ładunek całkowity serii może nie mieć wpływu na efekt sejsmiczny strzelania.

Należy podkreślić, że przeprowadzone badania w kopalni margli mają charakter rozpoznawczy, a ich kontynuacja

może przynieść dalsze korzyści dla podniesienia zarówno efektywności robót strzałowych, jak i ich bezpieczeństwa dla otoczenia.

*Publikacja została zrealizowana w ramach pracy statutowej nr 11.11.100.597*

## Literatura

- BLAIR D.P. 2008 - Non-linear superposition models of blast vibration. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 45(2), pp. 235-247.
- BURKE B. 2008 - Advanced Vibration Management. Quarry production blasting in environmentally sensitive locations. *Quarry Management*, pp. 41-44.
- GROTHER D., REINDERS P. 2007 - Advanced vibration in quarries using a predictive blast vibration model. *EFEE Conference proceedings*. Vienna, pp. 93-97.
- SOLTYS A., GOŁĄBEK B., ŻOŁĄDEK T. 2017 - Zastosowanie informatycznych systemów firmy Austin Powder do optymalizacji odpalania siatek wieloszeregowych z użyciem zapalników elektronicznych E\*Star. *Inżynieria Mineralna*, R. XVIII, Nr 2(40), s. 225-235.
- WINZER J., SOLTYS A., PYRA J. 2016 - Oddziaływanie na otoczenie robót z użyciem materiałów wybuchowych. Wydawnictwa AGH. Kraków. PN-B-02170:2016-12. Ocena szkodliwości drgań przekazywanych przez podłoże na budynki.

Artykuł wpłynął do redakcji – luty 2019

Artykuł akceptowano do druku – czerwiec 2019