



Dr inż. Anna Soltys\*)

## Dobór opóźnienia milisekundowego z zastosowaniem symulacji komputerowej - weryfikacja efektu sejsmicznego w oparciu o pomiary terenowe

Delay time optimization based on computer simulation – verification of ground born vibration effect according to field measurements

**Treść:** W artykule wskazano na konieczność weryfikacji efektu sejsmicznego robót strzałowych prowadzonych w kopalni odkrywkowej. Do odpalania ładunków MW zastosowano system elektroniczny, a w celu doboru optymalnego opóźnienia milisekundowego wykonano symulacje komputerowe w oparciu o przeprowadzone pomiary intensywności drgań wzbudzanych pojedynczymi ładunkami MW. Umożliwiło to zweryfikowanie pomiarem rzeczywistym wartości prognozowanych uzyskanych w procesie projektowania. Analizę intensywności i struktury wzbudzanych drgań przeprowadzono wykorzystując filtrowanie tercjowe. Dokonano również oceny wpływu zarejestrowanych drgań na obiekty budowlane za pomocą skal SWD.

**Abstract:** This paper presents the necessity of blasting work effect verification. The analysis was performed on the basis of data gathered from ground born vibration monitoring which was applied in the surroundings of one of the open pit mines. Electronic detonators were applied in blasting works. Delay time optimization was done, based on the computer simulation which uses data obtained from the single borehole blasting. This approach allows to verify the presumptive ground born vibration intensity by a field measurement. Ground born vibration analysis was done on the basis on the Octave analysis. The evaluation of the ground born vibration impact on the concrete structure was included in this paper.

### Słowa kluczowe:

górnictwo, technika strzelnicza, strzelanie milisekundowe, oddziaływanie drgań

### Key words:

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

## 1. Wprowadzenie

Roboty strzałowe w górnictwie odkrywkowym charakteryzują się stosowaniem dużych mas MW do jednorazowego odpalania. Serie liczą od kilku do kilkudziesięciu, a nawet kilkaset ładunków umieszczonych w długich otworach. Roboty często prowadzone są w bezpośrednim sąsiedztwie zabudowań mieszkalnych i innych obiektów budowlanych, stąd problematyka ograniczenia oddziaływania drgań indukowanych robotami strzałowymi ma zasadnicze znaczenie dla kopalń odkrywkowych.

W zdecydowanej większości, w górnictwie odkrywkowym ładunki MW odpala się milisekundowo, z zastosowaniem systemów elektrycznych, nieelektrycznych lub elektronicznych. Te ostatnie, ze względu na wysoką precyzję opóźnień dają szerokie możliwości projektowania siatek wieloszezegowych, korzystnych z uwagi na uzysk znacznych ilości odpowiednio rozdrobnionego urobku. Należy jednak pamiętać, że dobór opóźnień milisekundowych, szczególnie w systemie elektronicznym musi być procesem ściśle kontrolowanym i uwzględniającym szereg czynników mających wpływ na efekt oddziaływania prowadzonych robót strzałowych w otoczeniu.

Jednym z niekorzystnych skutków detonacji ładunków MW są drgania parasejsmiczne, które mogą być przyczyną

uszkodzeń obiektów budowlanych lub innych obiektów infrastruktury w otoczeniu wykonywanych robót, a także mogą być uciążliwe dla przebywających w nich ludzi. Intensywność tych drgań zależy między innymi od masy ładunku MW, parametrów siatki otworów strzałowych, sposobu odpalania ładunków a więc również od zastosowanego opóźnienia milisekundowego. Nie bez znaczenia jest także odległość od miejsca wykonywania robót strzałowych do punktu pomiaru drgań i charakterystyka podłoża, w którym drgania są propagowane (Soltys 2015).

Informacje bazowe o strukturze drgań można uzyskać na podstawie analizy drgań wzbudzanych odpaleniem pojedynczych ładunków MW. Pomiary drgań należy prowadzić w kilku punktach w otoczeniu kopalni, o ile to możliwe zarówno w podłożu (gruncie), jak i na fundamentach wybranych obiektów budowlanych, a 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 (Soltys i in. 2015).

Celem niniejszego artykułu jest przedstawienie możliwości zastosowania programów komputerowych do optymalizacji opóźnień milisekundowych, w oparciu o dane pozyskiwane z odpalania pojedynczych ładunków MW oraz wskazanie na konieczność weryfikacji parametrów drgań wynikających z symulacji komputerowej pomiarami prowadzonymi *in situ*.

\*) AGH w Krakowie

## 2. Projektowanie opóźnień milisekundowych z zastosowaniem symulacji komputerowej – studium przypadku

Dobór optymalnych opóźnień milisekundowych dla konkretnych warunków geologiczno-górnictwa jest procesem bardzo trudnym, wymagającym zastosowania specjalistycznych programów komputerowych, niejednokrotnie dużej liczby pomiarów terenowych, które pozwalają na zebranie odpowiednich informacji bazowych i weryfikację założonych modeli symulacyjnych. Jak już wspomniano, informacje bazowe dla programu komputerowego, to przede wszystkim charakterystyka propagacji drgań w otoczeniu kopalni, czyli intensywność i struktura indukowanych drgań oraz mechanizm przenoszenia drgań z podłoża do obiektów chronionych.

We wstępnej fazie informacje te gromadzone są dzięki odpalaniu pojedynczych ładunków MW, dzięki czemu charakterystyka drgań nie jest zakłócona milisekundowym odpalaniem większej liczby ładunków, z których każdy stanowi osobne źródło drgań.

Wyniki tak przeprowadzonych pomiarów stanowią bazę dla programu komputerowego, który przeprowadza obliczenia symulacyjne, generując szereg propozycji opóźnień, dla zadanych warunków siatki otworów, wraz z prognozą intensywności drgań w postaci maksymalnej wartości prędkości drgań i charakterystycznej częstotliwości. Do projektanta należy wybór jednej z propozycji i zastosowanie jej parametrów do odpalenia ładunków MW. Zadaniem pomiarów drgań jest weryfikacja prognozowanych wartości i uzupełnienie bazy danych dla programu komputerowego.

Opisaną powyżej procedurę zastosowano w warunkach jednej z kopalń odkrywkowych. W pracach badawczych zastosowano program komputerowy *Blasting Solutions* firmy Austin Powder (Rink i in. 2015), a ładunki MW, według zaprojektowanych siatek opóźnień, odpalano elektronicznym systemem E\*Star również firmy Austin Powder.

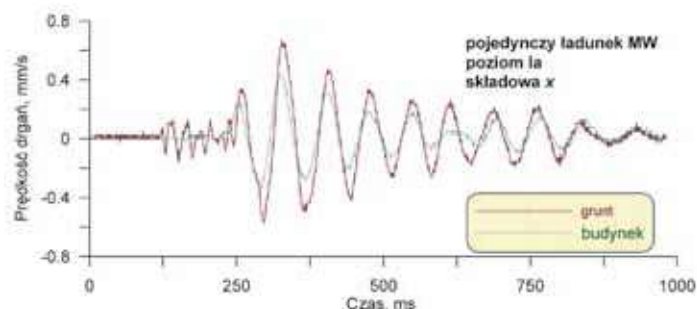
W początkowej fazie doboru opóźnień milisekundowych odpalono kilkanaście pojedynczych ładunków MW w kilku miejscach wyrobiska i na różnych poziomach eksploatacyjnych. Drgania mierzono zarówno w podłożu, jak i na fundamentach obiektów budowlanych na stałych stanowiskach pomiarowych. Analizę struktury drgań przeprowadzono za pomocą filtrowania tercjowego i algorytmu *Matching Pursuit* (MP).

Wstępne analizy pozwoliły na dokonanie wyboru głównego kierunku optymalizacji opóźnień – modelowanie struktury drgań propagowanych podłożem tak, by osiągnąć maksymalne tłumienie przy przejściu drgań do fundamentu budynku.

Ze względu na obszerny materiał badawczy, dla celów powyższego artykułu, przedstawiono analizę dla jednego miejsca prowadzenia robót strzałowych w wyrobisku odkrywkowym.

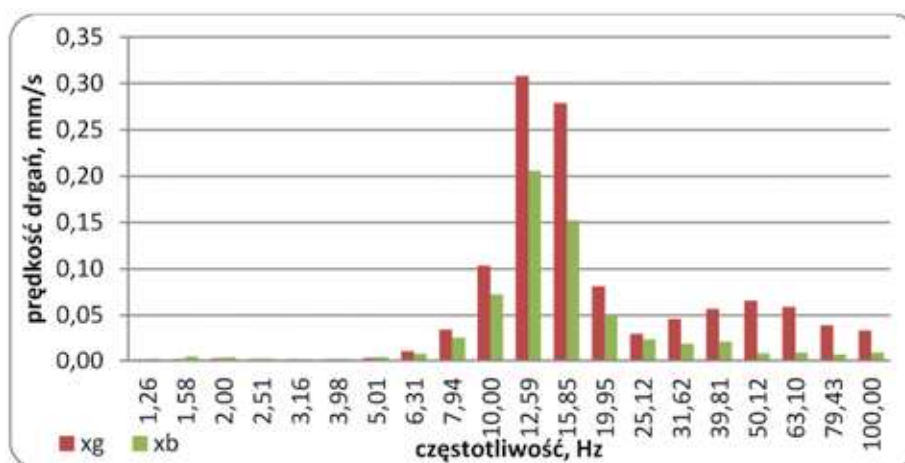
Poniżej przedstawiono wyniki symulacji komputerowej doboru opóźnień milisekundowych dla wybranej serii otworów odpalonych w I poziomie eksploatacyjnym.

Jak już wspomniano, punktem wyjściowym dla procesu projektowania były wyniki pomiaru drgań wzbudzonych detonacją pojedynczego ładunku MW w tym samym poziomie eksploatacyjnym. Przykładowy sejsmogram drgań przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Przykładowy sejsmogram drgań – pojedynczy ładunek MW – poziom I

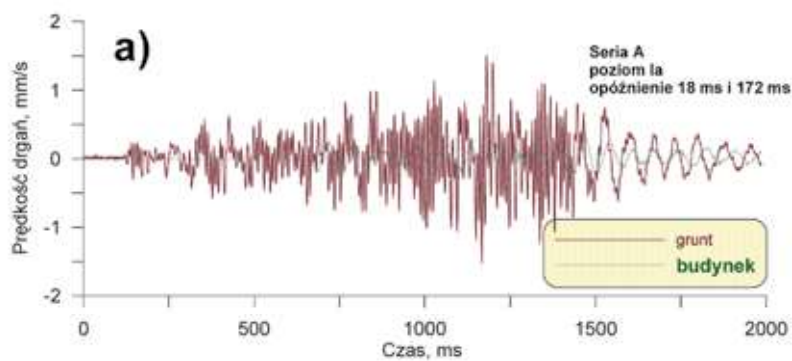
Fig. 1. Example of a vibration seismogram – a single explosive charge – level I



Rys. 2. Struktura drgań – pojedynczy ładunek MW – składowa x

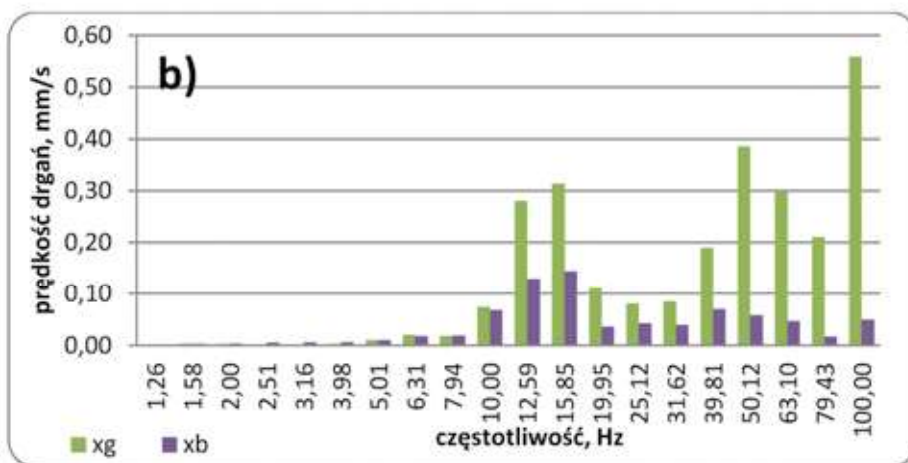
Fig. 2. The structure of the vibration – a single explosive charge - component x





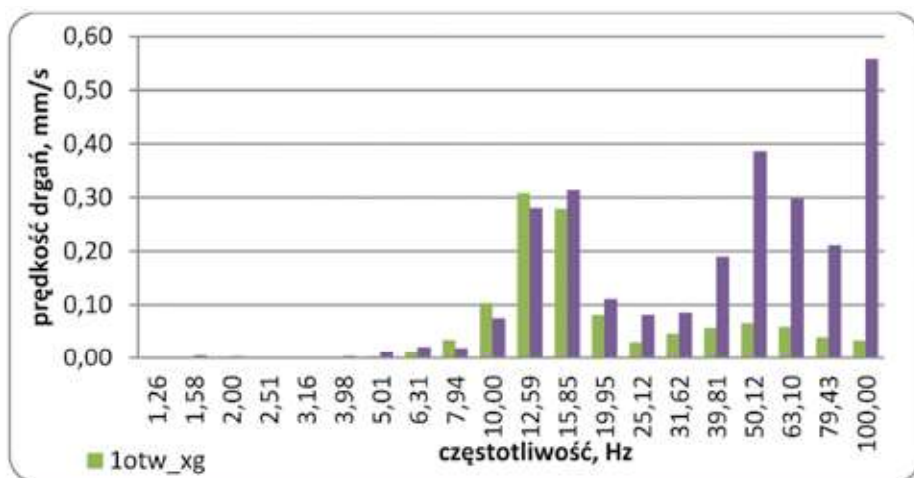
Rys. 4. Sejsmogram (a) i struktura drgań (b) – seria A – składowa pozioma x

Fig. 4. Seismogram (a) and the structure of the vibration (b) – series A – horizontal component x



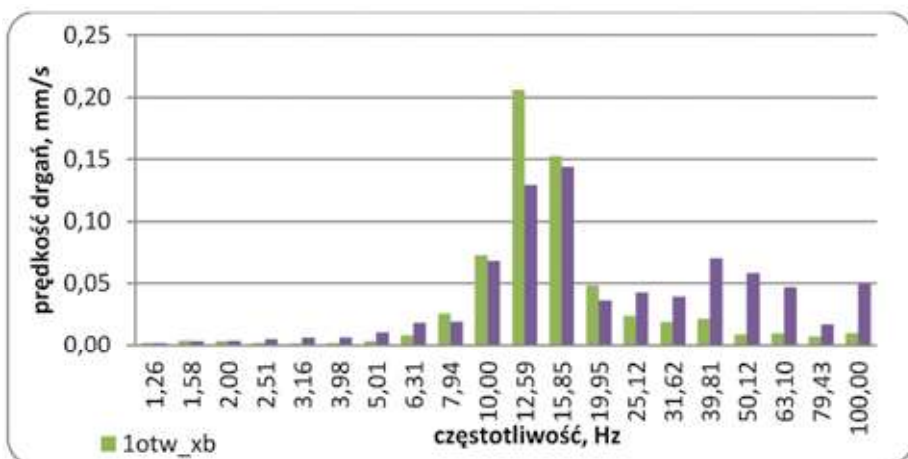
Rys. 5. Porównanie struktury drgań – składowa pozioma x – podłoże

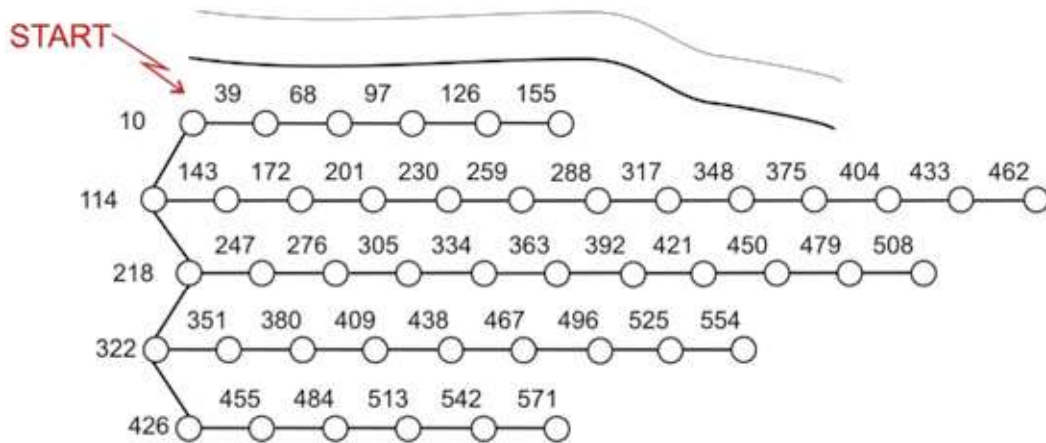
Fig. 5. Comparison of the vibration structure – the horizontal component x – ground



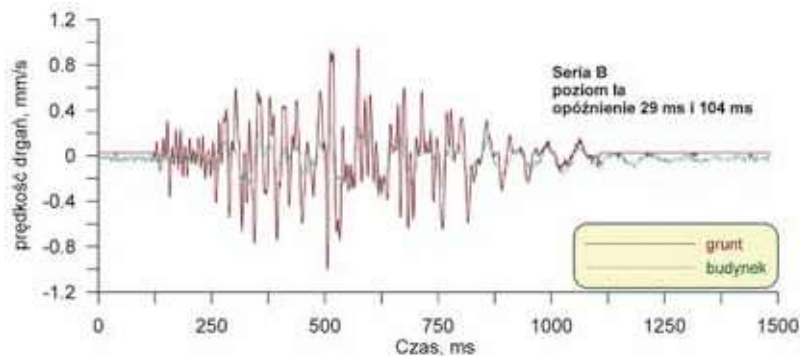
Rys. 6. Porównanie struktury drgań – składowa pozioma x – fundament

Fig. 6. Comparison of the vibration structure – the horizontal component x – foundation

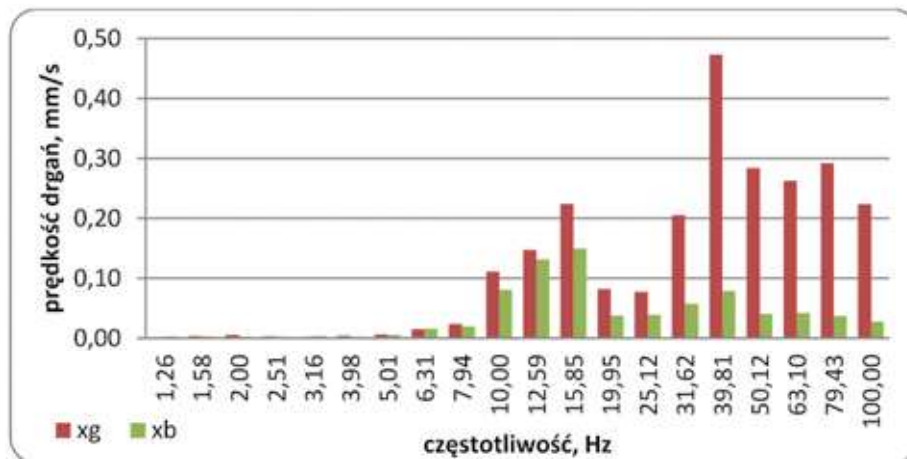




Rys. 7. Projekt odpalania siatki otworów – seria B  
Fig. 7. Project detonation grid of holes – series B



Rys. 8. Sejsmogram drgań – seria B – składowa pozioma x  
Fig. 8. Seismogram of vibrations – series B – horizontal component x

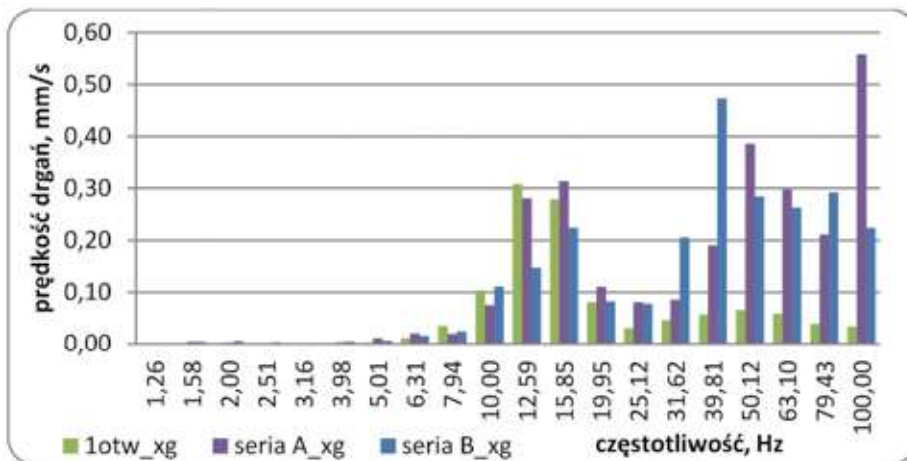


Rys. 9. Struktura drgań – seria B – składowa pozioma x  
Fig. 9. The structure of the vibration – series B – horizontal component x

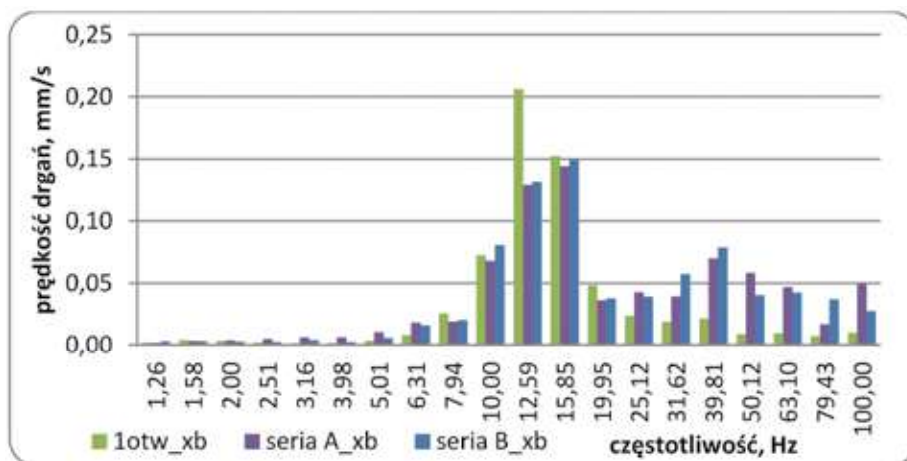
Analiza rys. 9 wskazuje, że w wyniku zastosowanego opóźnienia milisekundowego zakres częstotliwości dominujących, dla drgań rejestrowanych na fundamencie budynku, nadal pozostał bez zmian (12,59 Hz i 15,85 Hz). Również w tej serii, w zakresie częstotliwości wyższych wyraźnie widać silne tłumienie przy przejściu drgań z podłoża do fundamentu budynku i zauważalną dominację częstotliwości 39,81 Hz, co podobnie jak w przypadku serii A, może wskazywać, że zosta-

ła ona wzbudzona jako częstotliwość własna zastosowanego opóźnienia (29 ms między ładunkami w szeregu).

Ponieważ omawiane przykłady dotyczą robót strzałowych wykonanych na tym samym poziomie eksploatacyjnym, strukturę częstotliwościową drgań wzbudzonych odpaleniem serii B porównano nie tylko ze strukturą drgań wzbudzonych odpaleniem pojedynczego ładunku MW, ale również serii A (rys. 10 i 11).



Rys. 10. Porównanie struktury drgań – składowa x – podłoże  
 Fig. 10. Comparison of the vibration structure – the horizontal component x – ground



Rys. 11. Porównanie struktury drgań – składowa x – fundament  
 Fig. 11. Comparison of the vibration structure – the horizontal component x – foundation

Z porównania struktury drgań, przedstawionego na rys. 10 i 11 wynika, że w istotnym zakresie częstotliwości nie ulega ona zmianie – dominują częstotliwości 12,59 Hz i 15,85 Hz (rys. 11). Podobnie, po odpaleniu serii B, w podłożu również zostały wzbudzone drgania o częstotliwościach wyższych, które istotnie zostały wytłumione przez fundament budynku (rys. 11).

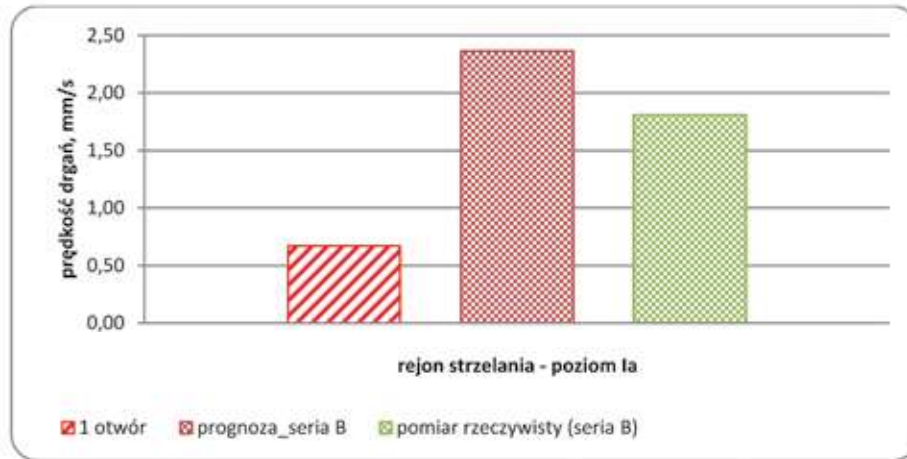
Jak wcześniej wspomniano, projektując opóźnienia milisekundowe dla serii B, wykonano również prognozę intensywności drgań w podłożu. W tab. 1 zestawiono wyniki pomiarów

drgań dla pojedynczego ładunku MW i serii B oraz parametry drgań prognozowanych za pomocą programu komputerowego. Natomiast, na rys. 12, na podstawie największych wartości intensywności drgań, przedstawiono ich porównanie.

Na rys. 12 widać, że po uwzględnieniu, przy projektowaniu opóźnień milisekundowych za pomocą symulacji komputerowej, wyników pomiarów intensywności drgań wzbudzonych odpaleniem pojedynczego ładunku MW, możliwe było zaprognozowanie intensywności drgań (słupki brązowy), która jak widać nie odbiega aż tak bardzo od rzeczywistej, zmierzonej intensywności drgań (słupki zielony).

Tabela 1. Zestawienie wartości intensywności drgań  
 Table 1. The statement of values of vibration intensity

Nr serii	Prędkość drgań, mm/s,			Częstotliwość, Hz		
	u <sub>y</sub>	u <sub>x</sub>	u <sub>z</sub>	f <sub>y</sub>	f <sub>x</sub>	f <sub>z</sub>
Miejsce pomiaru						
pojedynczy ładunek						
	0,33	0,67	0,33	17,3	13,3	8,5
podłoże						
	0,21	0,44	0,23	16,6	12,5	13,5
fundament						
Intensywność prognozowana (seria B)						
	1,12	2,00	2,36	33,0	45,0	45,0
podłoże						
Pomiar (seria B)						
	0,93	1,00	1,81	58,6	63,2	55,1
podłoże						
	0,31	0,36	0,49	22,9	13,7	35,6
fundament						



Rys. 12. Porównanie intensywności drgań z prognozy i pomiarów *in situ*

Fig. 12. Comparison of the intensity of vibration from the prediction and measurements *in situ*

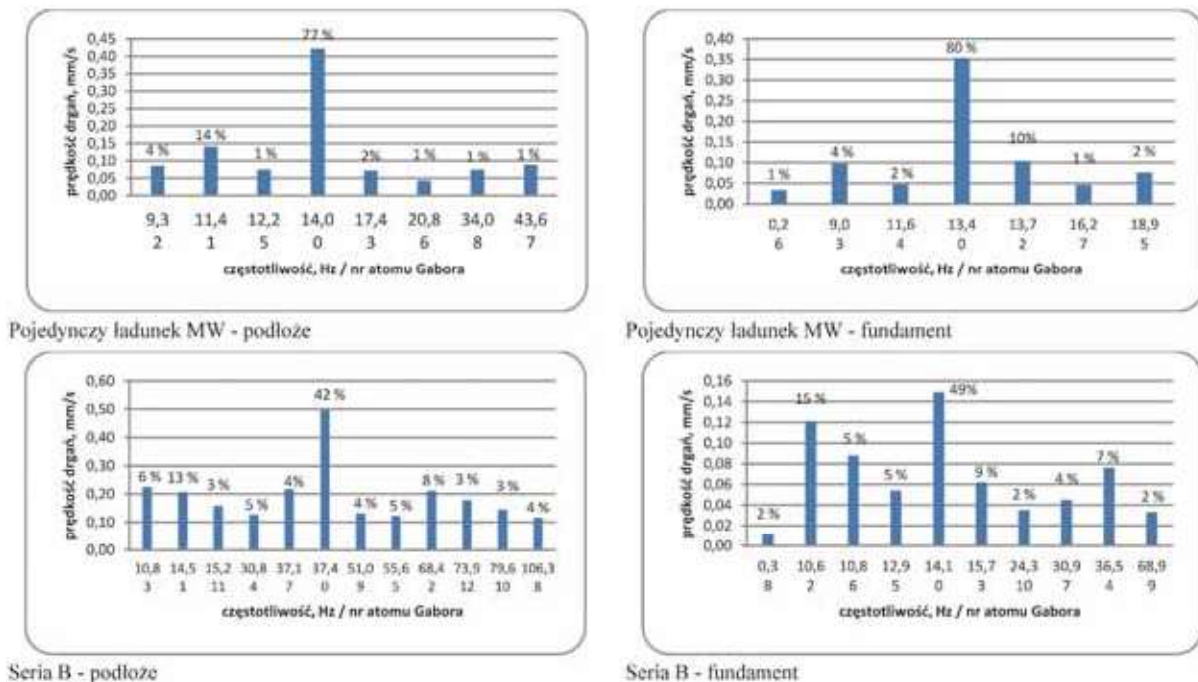
Omawiane przykłady dotyczyły serii ładunków MW odpalanych w tym samym poziomie eksploatacyjnym, jednak nie można zakładać, że warunki robót strzałowych były takie same, co mogłoby wpływać na pewne podobieństwa w wynikach analiz. Zmienność czynników górniczo-geologicznych jest tak duża, że projektując roboty strzałowe nie wolno popadać w rutynę.

Jako podsumowanie przeprowadzono analizę czasowo-częstotliwościową z zastosowaniem algorytmu MP, w celu porównania energetycznego udziału, w strukturze sygnału, częstotliwości rozpoznanych przez atomy Gabora. Wyniki tej analizy przedstawiono na rys. 12, a w tab. 2 zestawiono dane dla poszczególnych zdarzeń.

Tabela 2. Wyniki analizy czasowo-częstotliwościowej MP - składowa x

Table 2. The results of analysis of time-frequency MP – component x

Nr serii	częstotliwość	amplituda,	energia atomu,	% udział w energii	energia sygnału
Miejsce pomiaru	Hz	mm/s	(mm/s) <sup>2</sup>	sygnału	(mm/s) <sup>2</sup>
pojedynczy ładunek podłoże fundament	14,0	0,42	25,6	77%	33,1
	13,4	0,35	10,2	80%	12,8
Seria B podłoże fundament	37,4	0,50	24,9	42%	58,8
	14,1	0,15	5,0	49%	10,3



Rys. 13. Analiza czasowo-częstotliwościowa MP – histogram atomów Gabora

Fig. 13. Analysis of time-frequency MP – histogram of Gabor atoms

Analizując wyniki przedstawione w tab. 2 oraz na rys. 13, należy stwierdzić, że:

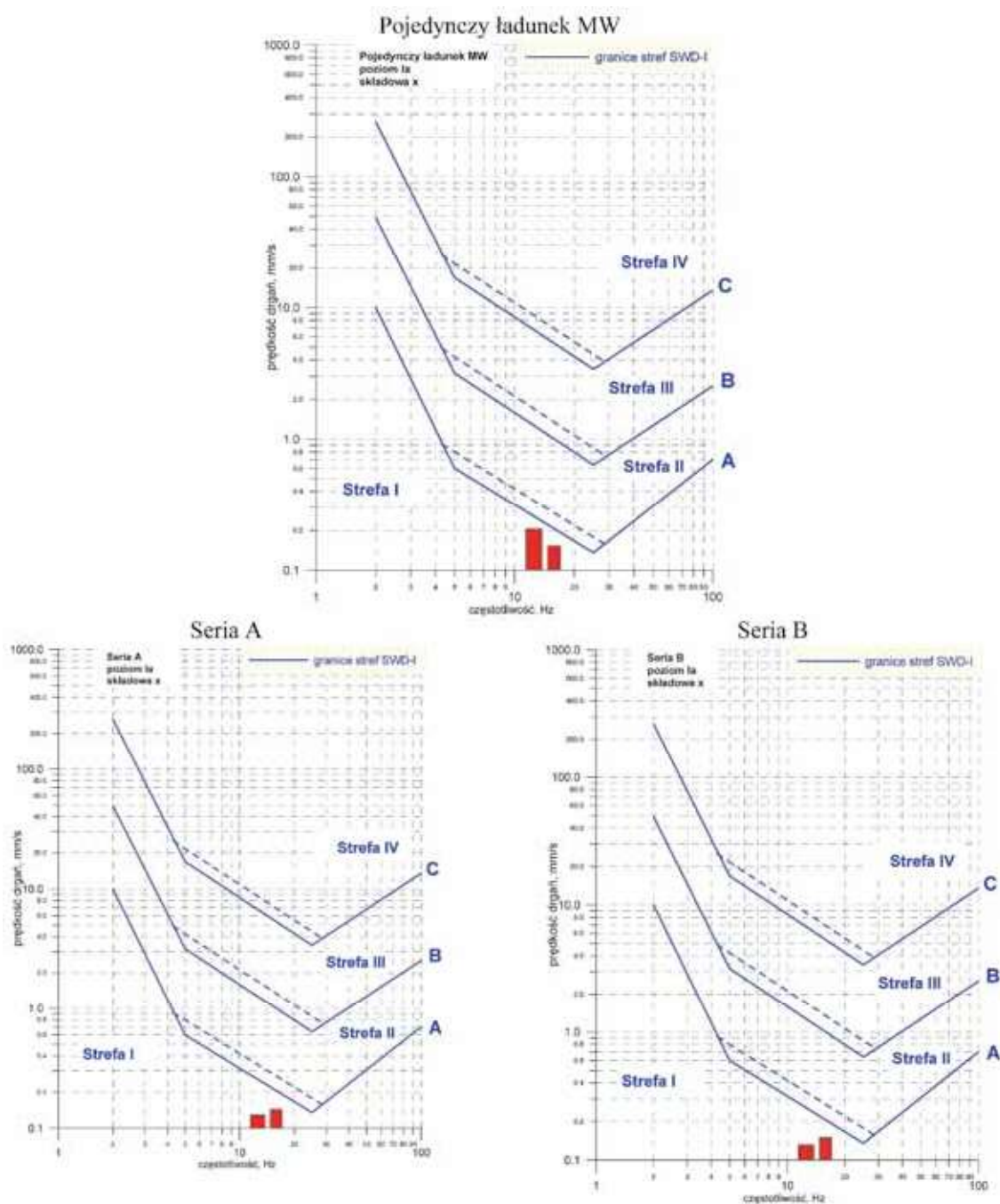
- drgania wzbudzone odpalaniem pojedynczego ładunku MW charakteryzują się, zarówno w przypadku podłoża, jak i fundamentu budynku, skumulowaniem energii w częstotliwościach niskich 14,0 Hz (dla podłoża) i 13,4 Hz (dla fundamentu). Częstotliwości te niosą odpowiednio 77 % i 80 % energii sygnału,
- odpalenie serii 45 ładunków MW wzbudziło w podłożu drgania o prawie dwukrotnie większej energii (patrz tab. 2), ale 75 % tej energii zawierają częstotliwości wyższe, które, jak wynika z analizy tercylowej, zostały wytłumione przy przejściu z podłoża do fundamentu budynku,
- w efekcie energia drgań zarejestrowanych na fundamencie budynku, w czasie odpalania serii 45 ładunków MW, jest

mniejsza od energii drgań wzbudzonych pojedynczym ładunkiem MW.

Praktycznie, analiza czasowo-częstotliwościowa MP wykazała, że założony cel został osiągnięty – nawet intensywniejsze drgania podłoża, ale o odpowiednio dobranej strukturze częstotliwościowej, w mniejszym stopniu oddziałują na obiekt budowlany.

Potwierdzeniem tego wniosku jest wynik przeprowadzonej oceny oddziaływania drgań na obiekt budowlany za pomocą skali SWD-I (rys.14).

Z rysunku wynika, że oddziaływanie drgań wzbudzonych w czasie odpalania serii A i B, jest wyraźnie niższe niż od pojedynczego ładunku MW. Należy podkreślić, że we wszystkich przypadkach drgania należy zakwalifikować jako nieodczuwalne dla obiektu.



Rys. 14. Ocena oddziaływania – budynek – pojedynczy ładunek MW, serie A i B  
 Fig. 14. Impact assessment – building – a single explosive charge, series A and B



## 5. Podsumowanie

Stosowane do odpalania ładunków MW systemy elektroniczne, ze względu na wysoką precyzję opóźnień milisekundowych, dają szerokie możliwości projektowania siatek wieloszeregowych. Jednakże dobór opóźnień, szczególnie w systemie elektronicznym, wymaga dużej rozważliwości i uwzględnienia szeregu czynników mających wpływ na efekt oddziaływania prowadzonych robót strzałowych w otoczeniu.

W celu optymalizacji opóźnień milisekundowych należy podejmować próby stosowania oprogramowania komputerowego. W artykule przedstawiono wyniki takich prac, wykonanych za pomocą programu *Blasting Solutions*. Podstawą projektowania opóźnień serii wieloszeregowych były dane pozyskane z odpalenia pojedynczego ładunku MW.

W oparciu o przeprowadzone analizy drgań indukowanych robotami strzałowymi można stwierdzić, że:

- badanie struktury drgań wzbudzonych detonacją pojedynczego ładunku MW jest niezbędne do określenia danych wejściowych dla programu komputerowego, w celu zaprojektowania opóźnień siatek strzałowych wieloszeregowych,
- struktura drgań podłoża, indukowanych odpaleniem serii wieloszeregowych, w stosunku do pojedynczego ładunku MW, w zakresie częstotliwości dominujących nie uległa zmianie. Natomiast zostały wzbudzone drgania o częstotliwościach wyższych, które w znacznym stopniu wytłumił fundament budynku, co było założeniem wstępnym do projektu i zostało zrealizowane,
- potwierdzeniem spełnienia założeń wstępnych, są wyniki analizy MP dla serii 45 ładunków MW, których odpalenie wzbudziło w podłożu drgania o prawie dwukrotnie większej energii w porównaniu do pojedynczego ładunku

MW. Jednakże 75% tej energii zawierają częstotliwości wyższe, które zostały wytłumione przy przejściu z podłoża do fundamentu budynku,

- w wyniku odpowiednio zaprojektowanych i zoptymalizowanych opóźnień milisekundowych, drgania indukowane w podłożu, mimo dużej intensywności, mogą mieć niewielki wpływ na konstrukcję budynku, co potwierdza ocena oddziaływania za pomocą skali SWD.

Biorąc pod uwagę powyższe wnioski, można sugerować, że stosowanie nowoczesnego i precyzyjnego systemu odpalania ładunków MW jest działaniem samym w sobie niewystarczającym. Konieczna jest weryfikacja efektu sejsmicznego, która dopiero może stać się punktem wyjścia do zaprojektowania optymalnych opóźnień milisekundowych.

## Literatura

- RINK P., GOŁĄBEK B., KORYTKOWSKI B., SUSZKA J. 2015 – Prace strzałowe z zastosowaniem zapalników elektronicznych w Kopalni łupków w warunkach dużego prawdopodobieństwa wystąpienia intensywnych fal parasejsmicznych. Mat. Konferencja – Technika Strzelnicza w Górnictwie i Budownictwie. Ustroń.
- SOŁTYS A. – Analiza oddziaływania na otoczenie drgań wzbudzanych przez roboty strzałowe z zastosowaniem metody Matching Pursuit. Monografia – Wydawnictwa AGH, Kraków.
- SOŁTYS A., WINZER J., DWORZAK M. – Dobór optymalnego opóźnienia milisekundowego – studium przypadku. Mat. Konferencja – Technika Strzelnicza w Górnictwie i Budownictwie. Ustroń.

Artykuł wpłynął do redakcji – grudzień 2016

Artykuł akceptowano do druku 15.02.2017