

Badania efektu sejsmicznego a nowoczesne systemy odpalania ładunków materiałów wybuchowych

The study of seismic effects and modern systems of blasting explosives



Dr inż. Anna Sołtys^{*)}



Dr inż. Jan Winzer^{*)}



Dr inż. Józef Pyra^{*)}

Treść: 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. Prace te często prowadzone są w bezpośrednim sąsiedztwie zabudowań mieszkalnych i innych obiektów budowlanych, stąd konieczność ograniczenia oddziaływania drgań ma zasadnicze znaczenie dla kopalń odkrywkowych. W artykule przedstawiono możliwości sterowania efektem sejsmicznym, poprzez stosowanie elektronicznych systemów do odpalania ładunków MW, które dają szerokie możliwości doboru opóźnień milisekundowych. Pozwala to na modyfikowanie struktury wzbudzanych drgań i może przyczynić się do minimalizacji oddziaływania robót strzałowych na otoczenie. Zwrócono również uwagę na konieczność prowadzenia badań efektu sejsmicznego, co pozwala na uniknięcie efektów niepożądanych.

Abstract: Blasting in opencast mining is characterized by the use of large Masse of explosives for single firing. Series count from several to tens or even hundreds of charge placed in long boreholes. These Works are often held in the immediate vicinity of residential buildings and other buildings, hence the need to reduce the impact of vibration is essential for open pit mines. This paper presents the results of seismic control capabilities through the use of electronic systems for blasting explosives which give wide selection of millisecond delays. This allows you to modify the structure induced vibration and can help to minimize the impact of blasting on the environment. Attention was also drawn to the need to research the seismic effect, thus avoiding side effects.

Słowa kluczowe:

górnictwo odkrywkowe, technika strzelnicza, strzelanie milisekundowe, oddziaływanie drgań na otoczenie

Key words:

opencast mining, blasting works, millisecond blasting, vibration impact on the environment

1. Wprowadzenie

W celu uzyskania urobku o żądanej granulacji należy prawidłowo zaprojektować roboty strzałowe, które jednocześnie zminimalizują negatywne skutki urabiania z użyciem materiałów wybuchowych (MW), tj. powietrzną falę podmuchową, rozrzut odłamków skalnych, drgania parasejsmiczne, progi przyspągowe, wysoki usyp itp. Jednym z wielu czynników mających decydujący wpływ na prawidłowy proces urabiania ośrodka skalnego, z użyciem MW, jest odpowiednio dobrane opóźnienie międzystrzałowe [1, 4].

Opóźnienie międzystrzałowe decyduje o rozdrobnieniu urobku, jego prawidłowym usypie, oraz o intensywności drgań parasejsmicznych. Zbyt małe opóźnienie zastosowane pomiędzy poszczególnymi ładunkami może zadziałać jak

odpalanie serii otworów natychmiastowo, co spowoduje słabe wytworzenie się dodatkowych płaszczyzn odsłonięcia i wzrost intensywności drgań, ale za to lepsze rozdrobnienie urobku. Za duże opóźnienie przyczynia się do dobrego wykształcenia dodatkowych płaszczyzn odsłonięcia, może powodować nie do końca kontrolowany efekt sejsmiczny (może w niektórych przypadkach dojść do wzmocnienia drgań), a także gorsze rozdrobnienie urobku (brak współdziałania ze sobą sąsiadujących ładunków w otworach) i w niektórych przypadkach pogorszenie stanu ociosu.

Na świecie coraz większą popularność zdobywa elektroniczny system inicjowania, który po raz pierwszy zbudowany został w wyniku współpracy firm Orica i Dynamit-Nobel. W Polsce, system inicjowania elektronicznego *i-kon* po raz pierwszy został zademonstrowany na pokazie zorganizowanym przez Stowarzyszenie Polskich Inżynierów Strzałowych oraz firmę Orica Poland w dniu 14 czerwca

^{*)} AGH w Krakowie

2008 roku, w Centralnym Laboratorium Techniki Strzelniczej i Materiałów Wybuchowych AGH w Regulicach. Na rynku polskim dostępne są również systemy firm: Maxam – Riotronic, SSE – Hot Shot, Nitroerg – Ergonic, Nitronic, Austin Powder Polska – E*star czy kolejne systemy firmy Orica – Unitronic 600, eDev II.

2. Wyniki badań

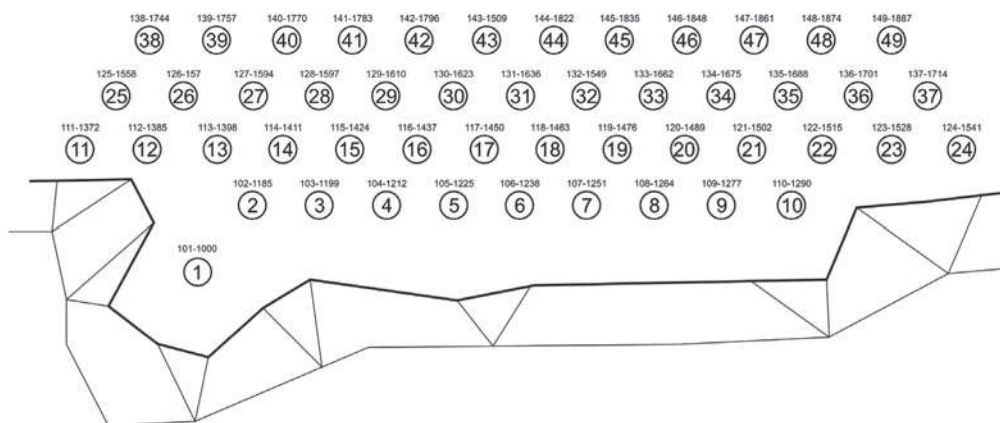
Badania prowadzone w kopalniach odkrywkowych wskazują jednoznacznie, że systemy elektroniczne pozwalają na osiąganie coraz lepszych efektów zarówno w zakresie pozyskiwania odpowiedniej granulacji urobku, jak i minimalizowania oddziaływania drgań na otoczenie. Niewątpliwie duże możliwości systemów elektronicznych wynikają z precyzji zadawanych opóźnień [5]. Sygnał sejsmiczny wzbudzony detonacją kilku, kilkunastu czy kilkudziesięciu ładunków MW odpalanych milisekundowo jest sygnałem złożonym, na który nanoszą się wzbudzenia od każdego ładunku składowego. Analizując sejsmogramy drgań zarejestrowanych w czasie

odpalania serii ładunków MW w długich otworach, z zastosowaniem systemu elektronicznego, można zauważyć wyraźne zaznaczenie czasu wejścia sygnału od detonacji kolejnego ładunku. Dla przykładu na rysunku 1 przedstawiono siatkę otworów z zaznaczonymi opóźnieniami milisekundowymi, a na rysunku 2 sejsmogram wzbudzonych drgań z zaznaczeniem czasu odpalenia kolejnych ładunków.

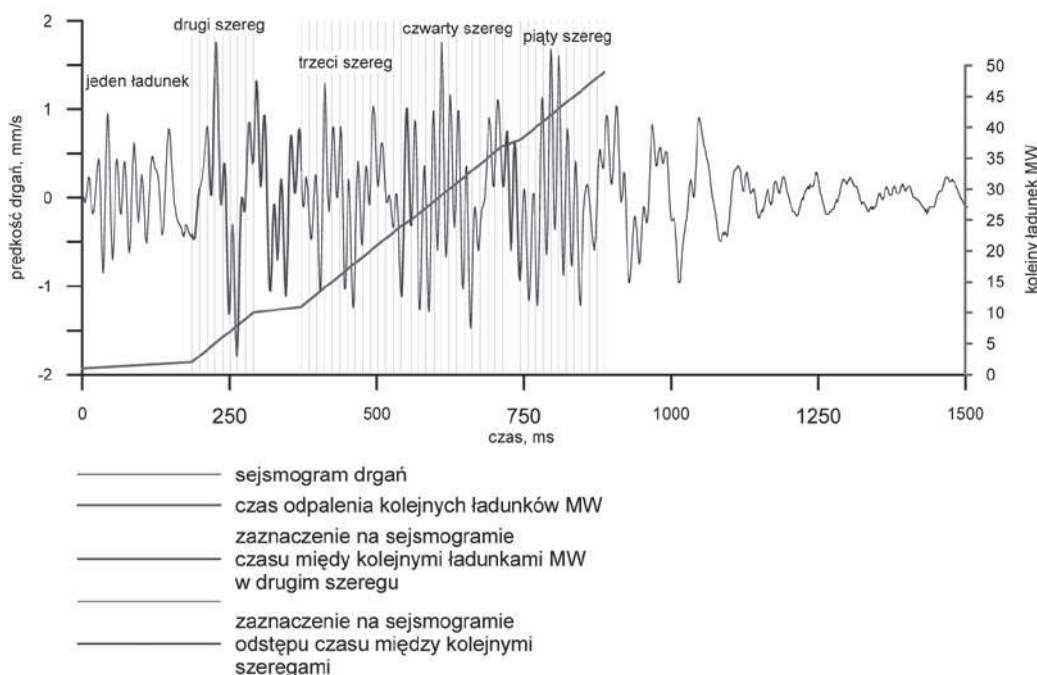
W siatce połączeń zastosowano następujące rozwiązanie: między ładunkami w szeregu zastosowano opóźnienie 13 ms, a między szeregami (otwory skrajne) 186 ms. Tak wykonane połączenie pozwoliło na uzyskanie następującego rozkładu opóźnień rzeczywistych – 13 ms – 92 % (44 ładunki), 17 ms – 2 % (1 ładunek), 30 ms – 2 % (1 ładunek), 82 ms – 2 % (1 ładunek) i 186 ms – 2 % (1 ładunek).

Na rysunku 1 zwraca uwagę fakt zastosowania opóźnienia 13 ms tylko między ładunkami w szeregach oraz ciekawe rozwiązanie w postaci odpalania kolejnych szeregów dopiero po zakończeniu odpalania w szeregu poprzedzającym. Widać to bardzo wyraźnie również na sejsmogramie (rys. 2).

Zastosowany sposób odpalania pozwolił na uzyskanie efektu sejsmicznego w postaci drgań podłoża i fundamentu,



Rys. 1. Schemat siatki otworów (ładunków MW)
Fig. 1. Scheme grid of boreholes (charges of explosives)



Rys. 2. Sejsmogram drgań z zaznaczeniem czasu odpalania kolejnych ładunków MW
Fig. 2. Vibration seismogram indicating the time of the firing of the next charge of explosives

o strukturze przedstawionej na rysunku 3. Jak widać uzyskano dwie grupy częstotliwości dominujących w strukturze drgań podłoża (kolor brązowy): częstotliwości niższe od 10 Hz do 16 Hz, oraz wyższe 63 Hz i 80 Hz. Przy przejściu z podłoża do fundamentu budynku struktura drgań uległa modyfikacji: częstotliwości wyższe zostały praktycznie wytłumione a w zakresie częstotliwości niższych uzyskano tłumienie rzędu 30 %.

Wysoka precyzja czasów odpalania wymaga jednocześnie odpowiedniej wiedzy i umiejętności od projektującego strzelanie oraz kontroli efektu sejsmicznego. Istnieje bowiem duże zagrożenie, że można osiągnąć efekt niepożądany w postaci wzrostu intensywności drgań lub osiągnięcia niekorzystnej modyfikacji struktury drgań.

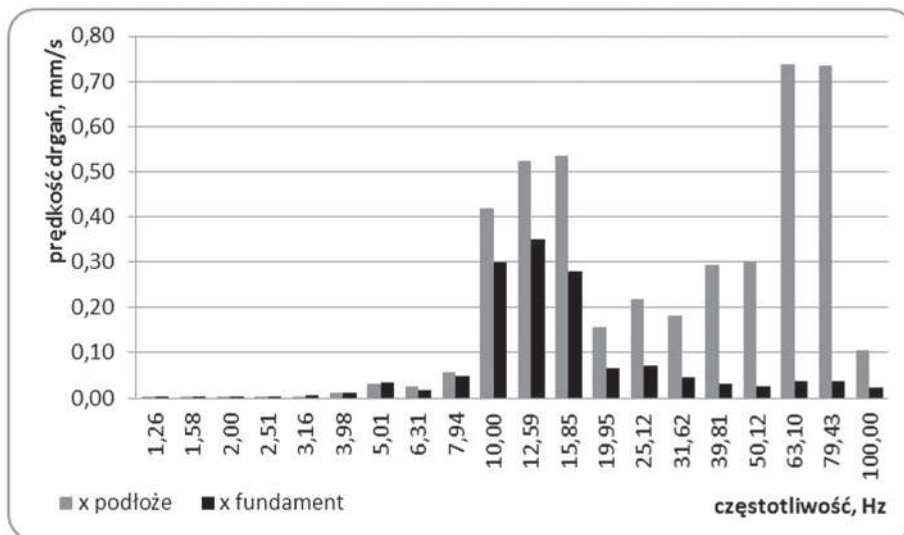
Dobłą ilustracją tego typu zdarzenia jest rysunek 4, na którym przedstawiono sejsmogram drgań podłoża i fundamentu budynku, zarejestrowanych w czasie strzelania w tej samej kopalni i na tym samym stanowisku pomiarowym.

Jak wynika z sejsmogramu intensywność drgań w obu przypadkach była zbliżona, natomiast zdarzenia zdecydowanie różnią się strukturą drgań (por. rysunki 3 i 5). Z porównania rysunków 3 i 5 wynika, że w przypadku drugim, cała energia drgań podłoża została skumulowana w częstotliwościach 12,6 Hz i 15,9 Hz, które dominują również w strukturze drgań fundamentu. W efekcie uzyskano prawie dwukrotny wzrost intensywności drgań w zakresie częstotliwości dominujących.

Ten negatywny efekt jest jeszcze bardziej widoczny po przeprowadzeniu analizy czasowo-częstotliwościowej Matching Pursuit (MP) [3] zarejestrowanych drgań podłoża (rys. 6 i 7).

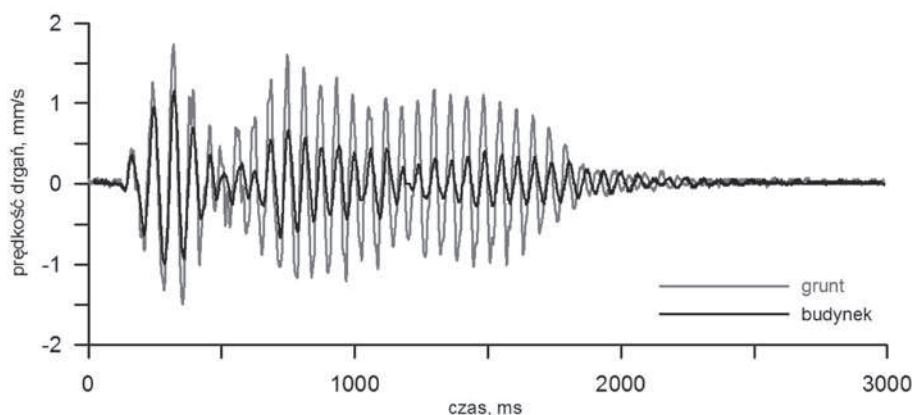
Jak widać z rysunku 7 cała energia drgań została skumulowana w częstotliwości 16 Hz, natomiast w przypadku przedstawionym na rysunku 6 energia została rozłożona na częstotliwości wyższe i niższe, z przewagą udziału częstotliwości wyższych. Porównując sumaryczną energię sygnału również widać zdecydowaną różnicę.

Poszukiwanie optymalnych opóźnień milisekundowych, jeżeli kryterium doboru dotyczy minimalizacji oddziaływania drgań w otoczeniu, musi być prowadzone pod kontrolą. Oznacza to prowa-



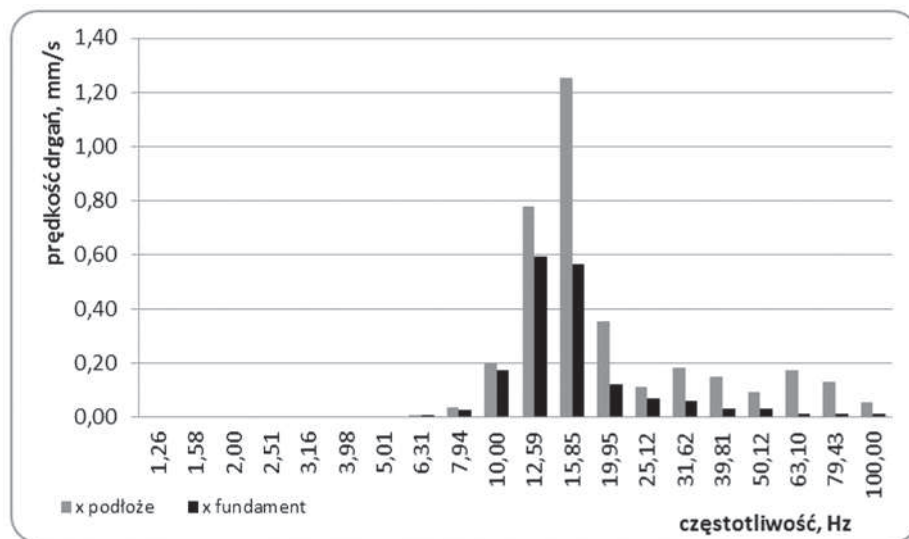
Rys. 3. Struktura drgań podłoża i fundamentu budynku wzbudzonych odpaleniem ładunków MW według połączeń z rysunku 1

Fig. 3. The structure of the vibration ground and the building foundation generated by firing charges of explosives by connection with Figure 1



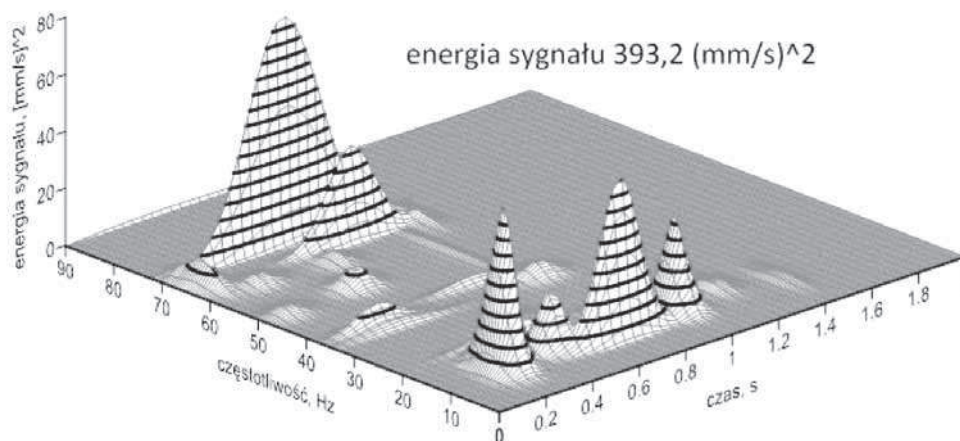
Rys. 4. Sejsmogram drgań

Fig. 4. Vibration seismogram

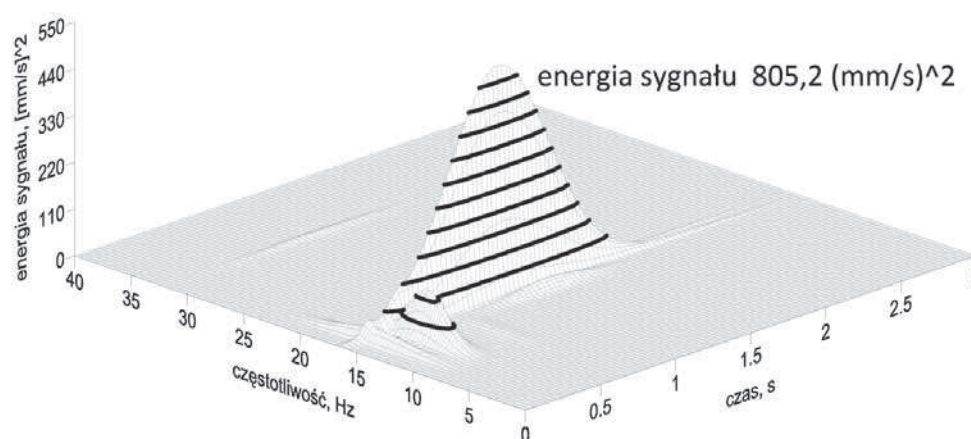


Rys. 5. Struktura drgań podłoża i fundamentu budynku (dla sejsmogramu z rys. 4)

Fig. 5. The structure of the vibration ground and foundation of the building (for seismogram from Fig. 4)



Rys. 6. Analiza czasowo-częstotliwościowa MP drgań podłoża (dla sejsmogramu z rys. 2)
Fig. 6. The analysis of time-frequency ground vibrations MP (for seismogram from Fig. 2)



Rys. 7. Analiza czasowo-częstotliwościowa MP drgań podłoża (dla sejsmogramu z rys. 4)
Fig. 7. The analysis of time-frequency ground vibrations MP (for seismogram from Fig. 4)

dzenie pomiarów intensywności drgań w czasie wykonywania robót strzałowych doświadczalnych. Szczególnie jest to ważne w przypadku wykonywania robót strzałowych w warunkach znacznej zmienności budowy geologicznej w miejscu wykonywania robót, jak i na drodze propagacji drgań od wyrobiska do obiektów chronionych.

Zdarza się, że tylko zmiana poziomu eksploatacyjnego, na którym wykonuje się roboty strzałowe diametralnie zmienia strukturę drgań rejestrowanych na tym samym stanowisku pomiarowym.

W jednej z kopalń odkrywkowych surowców skalnych przeprowadzono strzelania doświadczalne z zastosowaniem systemu elektronicznego. Pomiar wykonano na 3 stanowiskach pomiarowych w odległości od 300 m do 1400 m od miejsc wykonywania robót strzałowych. Na stanowisku 3 mierzono jednocześnie drgania podłoża i budynku. Roboty strzałowe wykonywano w poziomie I z zastosowaniem opóźnień 17 ms, 33 ms i 70 ms. Na rysunku 8 przedstawiono sejsmogramy drgań zarejestrowanych na stanowisku 3 (podłoże budynku) i 3' (fundament budynku), a na rysunkach 9, 10 i 11 wynik analizy struktury tych drgań.

Już wizualna ocena sejsmogramów pozwala stwierdzić istotne różnice w strukturze drgań. Zastosowanie analizy

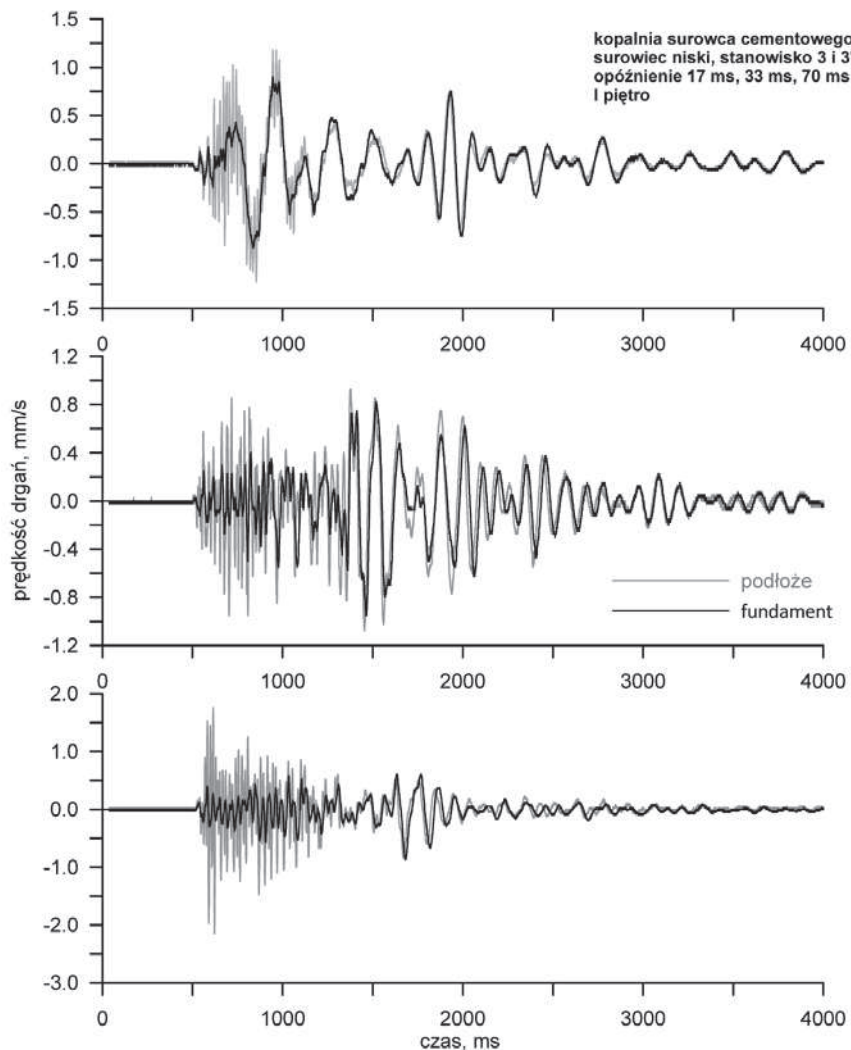
tercjowej do badania struktury drgań (rys. 9, 10 i 11) wnosi dużo informacji, z których wynika, że:

- struktura drgań jest silnie uzależniona od opóźnień milisekundowego,
- dla robót strzałowych prowadzonych w I poziomie eksploatacyjnym, za optymalne można przyjąć opóźnienia 70 ms,
- zwraca uwagę fakt, że we wszystkich przypadkach w drugiej fazie drgań praktycznie brak jest tłumienia drgań przy przejściu z podłoża do fundamentu budynku.

W drugiej fazie badań przeprowadzono również strzelania doświadczalne w poziomie II (niższym). Zastosowano do odpalania, między innymi, opóźnienie 70 ms (rys. 12).

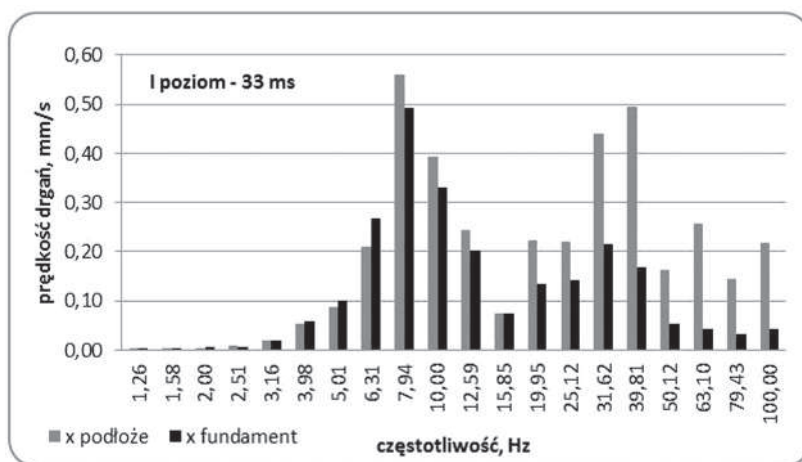
Analiza trójfazowa (rys. 13) wskazuje na całkowitą zmianę struktury drgań. Dominującymi stały się częstotliwości 12,59 Hz i 15,85 Hz, a jednocześnie w zakresie tych częstotliwości brak jest istotnego tłumienia drgań przy przejściu z podłoża do fundamentu budynku.

Dodatkowym argumentem jest fakt, że intensywność drgań fundamentu wzrosła prawie czterokrotnie. Wynika stąd, że opóźnienie, które było optymalne dla poziomu I jest bardzo niekorzystne dla robót prowadzonych w poziomie II.



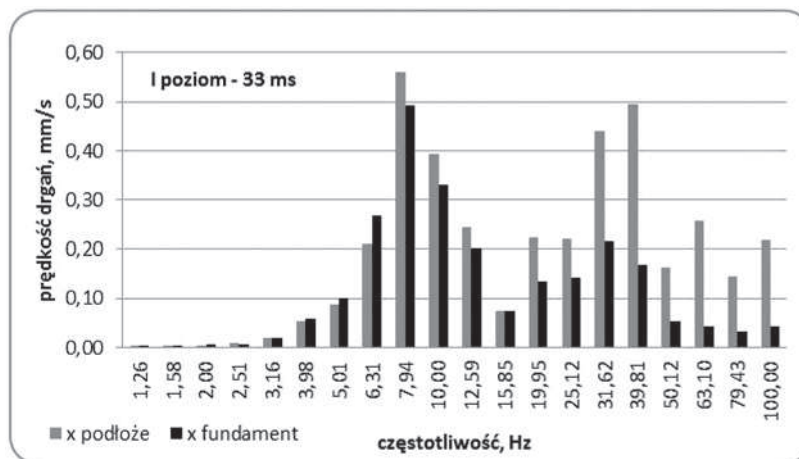
Rys. 8. Sejsmogramy drgań podłoża i fundamentu budynku – poziom I opóźnienia 17 ms, 33 ms i 70 ms

Fig. 8. The seismograms ground vibration and foundation of the building – level I delays 17 ms, 33 ms and 70 ms



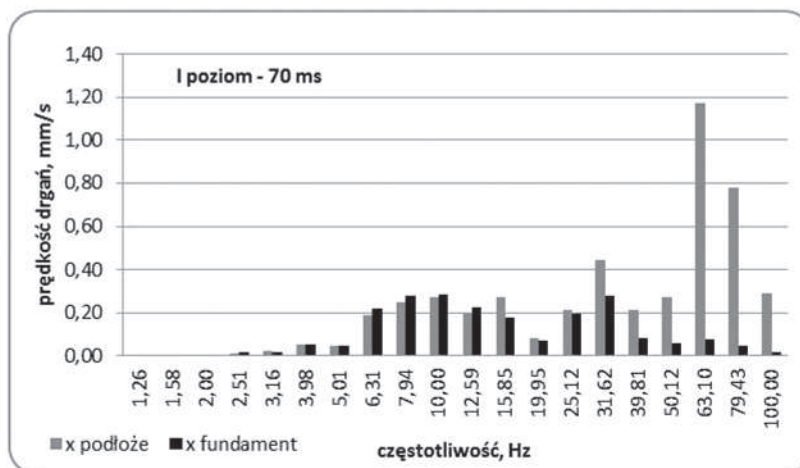
Rys. 9. Struktura drgań podłoża i fundamentu budynku – poziom I opóźnienie 17 ms

Fig. 9. The structure of the vibration ground and foundation of the building – level I delay 17 ms



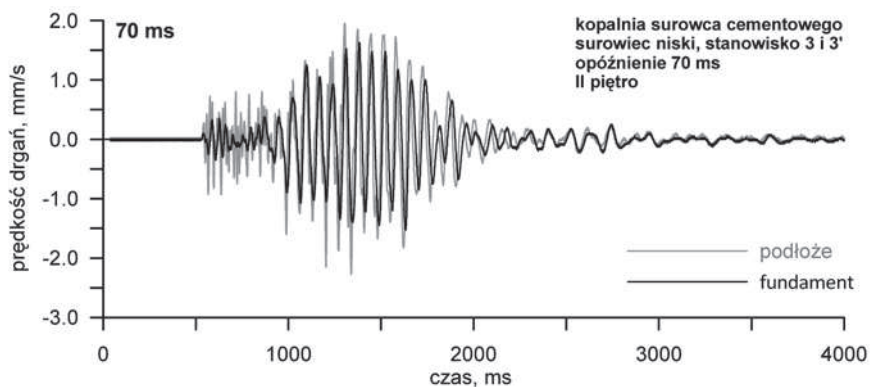
Rys. 10. Struktura drgań podłoża i fundamentu budynku – poziom I opóźnienie 33 ms

Fig. 10. The structure of the vibration ground and foundation of the building – level I delay 33 ms



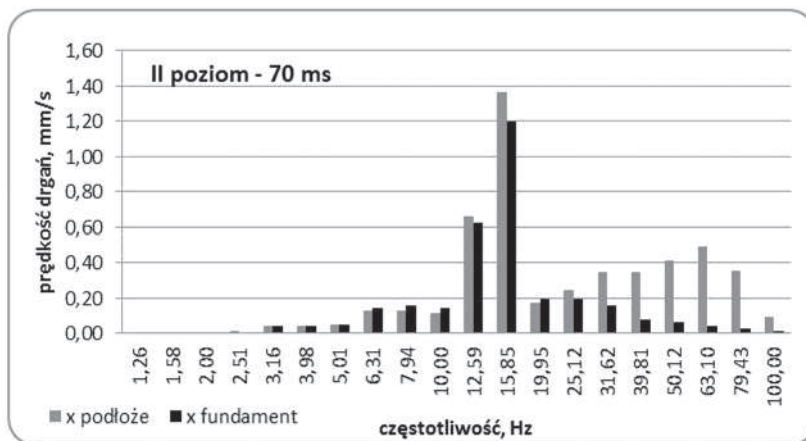
Rys. 11. Struktura drgań podłoża i fundamentu budynku – poziom I opóźnienie 70 ms

Fig. 11. The structure of the vibration ground and foundation of the building – level I delay 70 ms



Rys. 12. Sejsmogramy drgań podłoża i fundamentu budynku – poziom II opóźnienie 70 ms

Fig. 12. The seismograms ground vibration and foundation of the building – level II delay 70 ms



Rys. 13. Struktura drgań podłoża i fundamentu budynku – poziom II opóźnienie 70 ms

Fig. 13. The structure of the vibration ground and foundation of the building - level II delay 70 ms

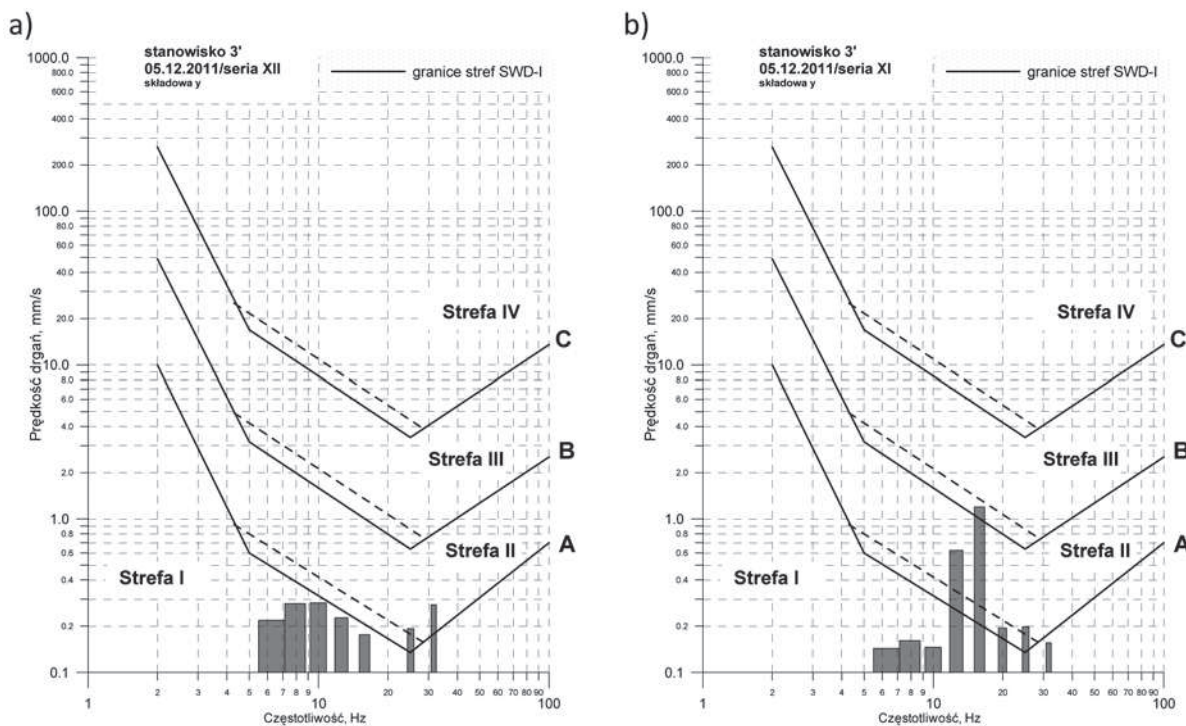
Jak już wspomniano wybór optymalnego opóźnienia milisekundowego jest związany z oceną oddziaływania drgań na obiekty budowlane w otoczeniu za pomocą skal SWD [2]. Na rysunku 14 przedstawiono wyniki analizy tercycznej naniesione na skalę SWD-I, dla opóźnienia 70 ms i robót strzałowych prowadzonych w I (rys. 14a) i II (rys. 14b) poziomie eksploatacyjnym.

Jak wynika z rysunku dla poziomu I drgania należy zakwalifikować do strefy II skali SWD, a dla poziomu II do strefy III. Rysunek 14 potwierdza bardzo niekorzystną ocenę opóźnienia 70 ms dla robót strzałowych prowadzonych w II poziomie eksploatacyjnym kopalni.

3. Wnioski

Podsumowując przedstawione rozważania, można stwierdzić że:

- Wprowadzenie do robót strzałowych w górnictwie odkrywkowym nowoczesnych systemów do odpalania ładunków MW stwarza szerokie możliwości sterowania efektem sejsmicznym.
- Minimalizacja oddziaływania na obiekty budowlane w otoczeniu może być realizowana nie tylko przez ograniczanie masy ładunków MW, ale również przez umiejętny dobór opóźnień milisekundowych. Pozwala to na modyfikowanie struktury częstotliwościowej drgań w kierunku zwiększe-



Rys. 14. Wyniki analizy tercycznej drgań fundamentu budynku na skali SWD I [2]

Fig. 14. The results of the third-octave analysis of vibration of the foundation of the building on a scale SWD I

nia stopnia tłumienia przy przejściu drgań z podłoża do fundamentu budynku.

- Systemy elektroniczne dają bardzo wysoką precyzję zadawanych opóźnień milisekundowych, dlatego też należy zwracać uwagę na możliwość osiągnięcia niepożądanych efektów w postaci wzrostu intensywności drgań lub zmiany struktury drgań w zakresie częstotliwości niekorzystnych dla chronionych obiektów. Wymaga to prowadzenia badań kontrolnych i szczegółowych analiz rejestrowanych sygnałów.
- Należy zwrócić uwagę na fakt, że nie zawsze i nie w każdych warunkach wprowadzenie nowoczesnych systemów odpalania przynosi pożądany efekt. Konieczna jest świadomość, że liczba czynników mających wpływ na oddziaływanie drgań na budynki wymaga rozwagi i wiedzy opartej na rzetelnie przeprowadzonych badaniach.

Praca zrealizowana w ramach badań statutowych nr 11.11.100.597

Literatura

1. *Maciąg E., Winzer J., Biessikirski R.*: Metodyka postępowania w ochronie otoczenia w przypadku robót strzałowych – Bezpieczeństwo Pracy i Ochrona Środowiska w Górnictwie – Miesięcznik WUG 9/I/2007. Katowice 2007.
2. PN-B-02170:1985
3. *Soltys A.*: Analiza oddziaływania na otoczenie drgań wzbudzanych przez roboty strzałowe z zastosowaniem metody MatchingPursuit. Wyd. AGH. Kraków 2015.
4. *Winzer J., Biessikirski R., Sieradzki J.*: Roboty strzałowe a ochrona otoczenia – uwagi krytyczne nie tylko o oddziaływaniu na obiekty. Prace Naukowe GIG. Katowice 2006.
5. *Winzer J.*: Przyczynek do dyskusji o sposobach minimalizacji oddziaływania robót strzałowych na zabudowania w otoczeniu. Technika Strzelnicza w Górnictwie i Budownictwie. Ustroń 2013 r.