

*Józef Pyra**

OPÓŹNIENIE MILISEKUNDOWE JAKO CZYNNIK WPŁYWAJĄCY NA SPEKTRUM ODPOWIEDZI DRGAŃ WZBUDZANYCH DETONACJĄ ŁADUNKÓW MATERIAŁU WYBUCHOWEGO W KOPALNIACH ODKRYWKOWYCH**

1. Wprowadzenie

Odpalanie ładunków materiału wybuchowego (MW), umieszczonych w otworach strzałowych, z opóźnieniem milisekundowym, stanowi podstawową metodę urabiania ośrodka skalnego w odkrywkowych zakładach górniczych. W wyniku detonacji MW, oprócz pozyskania urobku, powstają niepożądane zjawiska w postaci wzbudzonych drgań parasejsmicznych.

Na intensywność drgań ma wpływ szereg czynników, które można podzielić na dwie zasadnicze grupy:

- 1) niekontrolowaną, w której taki czynnik jak budowa geologiczna na drodze wzbudzenia sygnału (drgań) do obiektu chronionego i pod obiektem nie zależy od wykonywanych robót;
- 2) kontrolowaną, w którą można zaingerować poprzez masę użytego MW, jego rodzaj, parametry geometryczne siatki otworów, a także dobór opóźnienia milisekundowego.

Rozwój sposobu odpalania ładunków MW zmierzał i zmierza w kierunku zapewnienia coraz większej precyzji zadawania opóźnień, powiększenia możliwości wyboru opóźnień i zwiększenia bezpieczeństwa przez minimalizowanie zagrożenia powstawania niewypałów. Elektryczne odpalanie milisekundowe stopniowo zastępuje bardziej bezpieczny system nieelektryczny (coraz powszechniej stosowany w polskim górnictwie odkrywkowym), oraz elektroniczny, cechujący się bardzo dużą dokładnością opóźnień pomiędzy odpalonymi ładunkami MW.

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

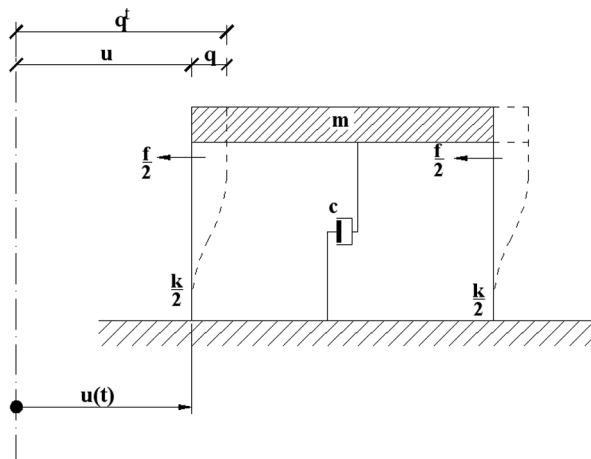
** Wykonano w ramach badań własnych WGiG AGH nr 10.10.100.493

Tematyką wpływu opóźnienia milisekundowego na poziom wzbudzanych drgań zajmowano się od dawna i zauważono wyraźny związek między zastosowanym opóźnieniem, a strukturą rejestrowanych drgań [19]. Wpływ ten staje się silniejszy ze wzrostem precyzji zadawania opóźnień [12]. Już przy odpalaniu nieelektrycznym obserwowano wyraźne zmiany częstotliwości wzbudzanych drgań, a zastosowanie zapalników elektronicznych uwypukla jeszcze bardziej zmiany strukturalne drgań. Można powiedzieć, że istnieje możliwość, przez zastosowanie odpalania milisekundowego z wysoką precyzją, na sterowanie nie tylko intensywnością ale i częstotliwością drgań, co ma bardzo duże znaczenie przy ocenie oddziaływania drgań na obiekty budowlane. Wprowadzenie na rynek polski zapalników elektronicznych, wymaga więc przeprowadzenia szczegółowych badań z wykorzystaniem nowoczesnych metod analizy sygnału. Analizy amplitudowe, częstotliwościowe (np. transformata Fouriera) czy terejowa dają zbyt mało informacji i każda z nich zawiera określone ograniczenia w dziedzinie czasu i częstotliwości, stąd konieczność zastosowania analiz czasowo — częstotliwościowych np.: analizy falkowej lub *Matching Pursuit* (pogoń za dopasowaniem) [17].

2. Ogólna charakterystyka metody spektrum odpowiedzi

Spektrum odpowiedzi jest od dawna znane i szeroko stosowane zwłaszcza przy analizie drgań wywołanych trzęsieniami ziemi, czy wstrząsami górniczymi. Stanowi podstawę do wyznaczania sił bezwładności generowanych ruchem podłoża.

Spektrum odpowiedzi to zależność maksymalnych amplitud drgań oscylatora o jednym stopniu swobody dynamicznej, poddanego wymuszeniu kinematycznemu w postaci drgań podłoża, od okresu drgań własnych i tłumienia tego oscylatora (rys. 1).



Rys. 1. Układ o jednym stopniu swobody poddany wymuszeniu kinematycznemu [2]

Równanie ruchu takiego układu można zapisać, jako (1):

$$mq'' + c\dot{q} + kq = 0 \quad (1)$$

gdzie:

q — przemieszczenie względne,

q' — przemieszczenie całkowite,

m — masa drgająca,

c — tłumienie oscylatora,

k — sztywność sprężyny oscylatora,

$u(t)$ — wymuszenie kinematyczne.

Oscylator o jednym stopniu swobody, o różnych częstotliwościach kołowych drgań własnych ω_0 , poddawany jest wymuszeniu w postaci pewnego akceleroqramu ruchu podłoża, przy tym samym współczynniku tłumienia ξ . Dla konkretnej częstotliwości kołowej na wykresie zamieszcza się bezwzględną wartość maksymalnego przemieszczenia względnej masy oscylatora $\max |q(t)|$. Częstotliwość kołowa ($\omega = 2\pi f$ lub $\omega = 2\pi/T$) może być przeliczona na częstotliwość f lub okres drgań własnych T . Wówczas wykres może być przedstawiany w zależności od jednego z tych parametrów. Taki wykres nazywany jest względnym przemieszczeniowym spektrum odpowiedzi (2).

$$S_d(\omega_0, \xi) = \max_t |q(t, \omega_0, \xi)| \quad (2)$$

W analogiczny sposób otrzymuje się względne prędkościowe spektrum odpowiedzi (3)

$$S_{vr}(\omega_0, \xi) = \max_t |\dot{q}(t, \omega_0, \xi)| \quad (3)$$

oraz względne przyspieszeniowe spektrum odpowiedzi (4)

$$S_{ar}(\omega_0, \xi) = \max_t |\ddot{q}(t, \omega_0, \xi)| \quad (4)$$

Sporządzone w ten sposób spektra można używać do określania maksymalnej odpowiedzi układu, o jednym stopniu swobody, dla zadanego zapisu ruchu podłoża [2]. W praktyce wzory na względne prędkościowe i przyspieszeniowe spektrum odpowiedzi nie są często używane, ponieważ istnieje prosty sposób ich oszacowania na podstawie względnego przemieszczeniowego spektrum odpowiedzi.

Otrzymane w ten sposób spektra odpowiedzi noszą nazwę pseudoprędkościowych i pseudoprzyspieszeniowych spektrów odpowiedzi i są powiązane między sobą zależnością (5)

$$S_a(\omega_0, \xi) = \omega_0 S_v(\omega_0, \xi) = \omega_0^2 S_d(\omega_0, \xi) \quad (5)$$

Różnica jaka występuje między pseudoprędkościowym i względnym prędkościowym spektrum odpowiedzi nie jest duża i występuje w zakresie poniżej 1 Hz [2].

3. Zastosowanie spektrum odpowiedzi

Metoda spektrum odpowiedzi znalazła szereg zastosowań, począwszy od drgań wzbudzanych przy trzęsieniach ziemi, następnie została zaadaptowana i wykorzystywana do określania sił bezwładności generowanych ruchem podłoża powstałym na skutek wstrząsów górniczych. Metoda znajduje również zastosowanie do analizy drgań powstałych na skutek ruchu komunikacyjnego.

3.1. Spektrum odpowiedzi drgań powstałych na skutek trzęsienia ziemi

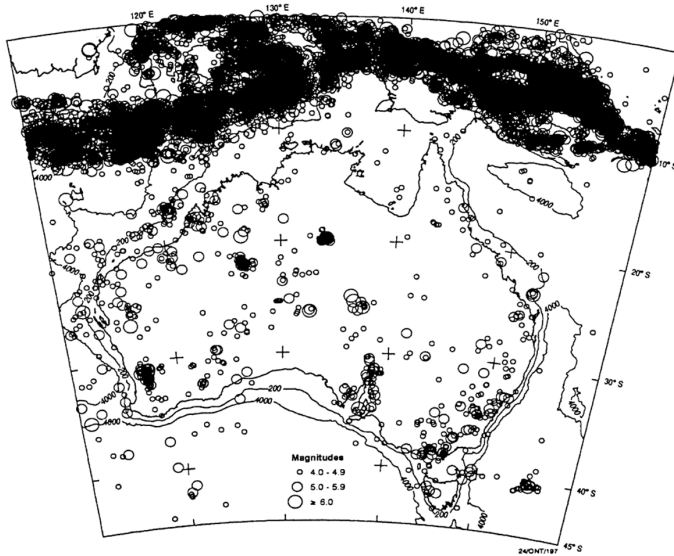
Trzęsienia ziemi powstają w skutek ruchów tektonicznych skorupy ziemskiej, co skutkuje uwalnianiem znacznej ilości energii, która powoduje powstawanie fal sejsmicznych propagujących od epicentrum we wszystkich kierunkach. Fale sejsmiczne powodują ruch podłoża, a w konsekwencji drgania obiektów.

Dla przykładu przedstawiono na rysunku 2 mapę Australii i jej okolic z naniesionymi miejscami wystąpienia trzęsień ziemi w latach 1850–1997 z magnitudą przekraczającą 4 w skali Richtera.

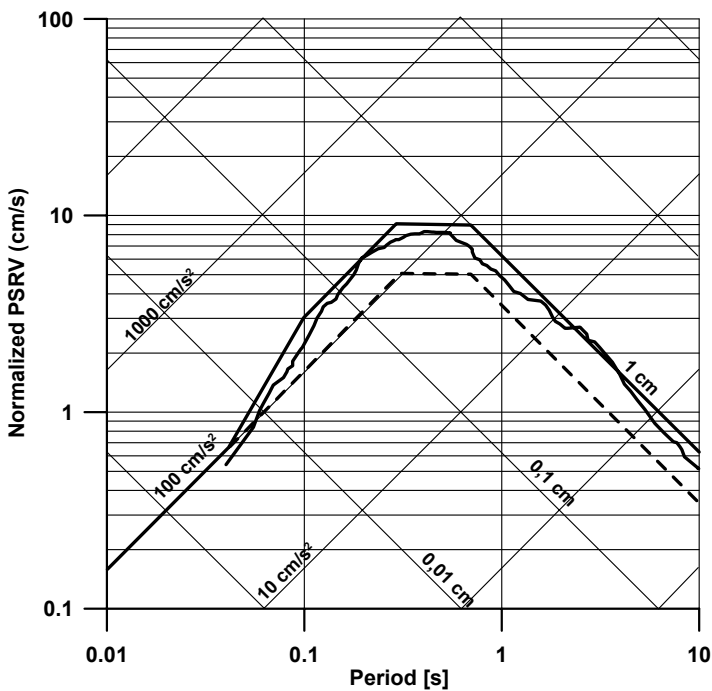
Spektra odpowiedzi (rys. 3) przedstawiono jako:

- znormalizowane spektrum odpowiedzi — łamana czarna linia,
- średnie spektrum odpowiedzi dla tego rejonu — linia przerywana,
- przykładowe spektrum odpowiedzi z jednego z trzęsień ziemi w tym rejonie — czarna linia ciągła.

Również dla Europy opracowane są normy — Eurokod 8 [8, 9], dotyczące trzęsień ziemi i wszelkich zagadnień związanych z projektowaniem obiektów odpornych na wstrząsy. Norma ta podaje bardzo szczegółowe wytyczne jeśli chodzi o projektowanie różnych rodzajów konstrukcji: żelbetowych, stalowych, murowych i zespolonych, a także niekonstrukcyjnych elementów budowli poddawanych wymuszeniom kinematycznym w postaci drgań podłoża.

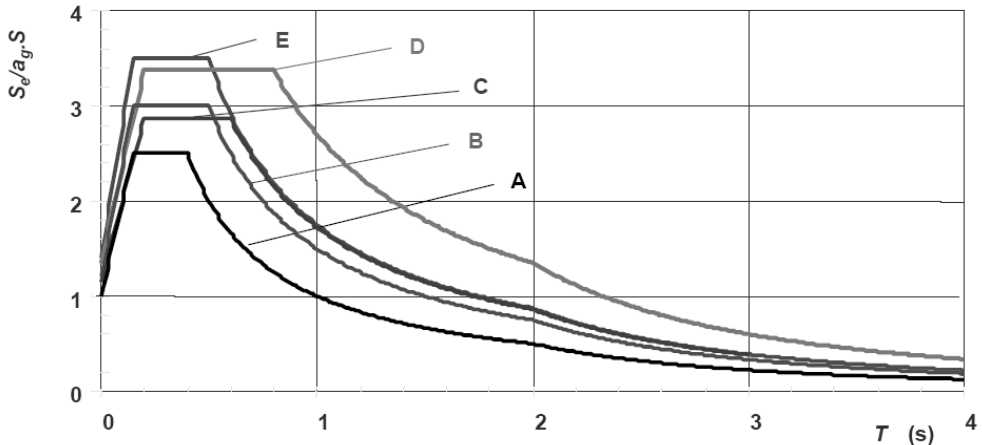


Rys. 2. Epicentra trzęsien ziemi w rejonie Australii w latach 1850–1997 [16]



Rys. 3. Rekomendowane dla Australii spektrum odpowiedzi i średnie spektrum odpowiedzi [16]

W Eurokodzie 8 zawarte są między innymi względne przyspieszeniowe spektra odpowiedzi ($S_e/a_g \cdot S$) dla różnego rodzaju podłoża, na którym ma być posadowiony projektowany obiekt (rys. 4).



Rys. 4. Spektrum odpowiedzi dla różnego rodzaju gruntu - Eurokod 8 [1, 8]:

A — skały; B — zagęszczony piasek; bardzo twarda glina; C — średnio zagęszczony piasek, twarda glina; D — luźny piasek, lekko zwięzła glina; E — warstwa gruntu o miąższości 5–20 m

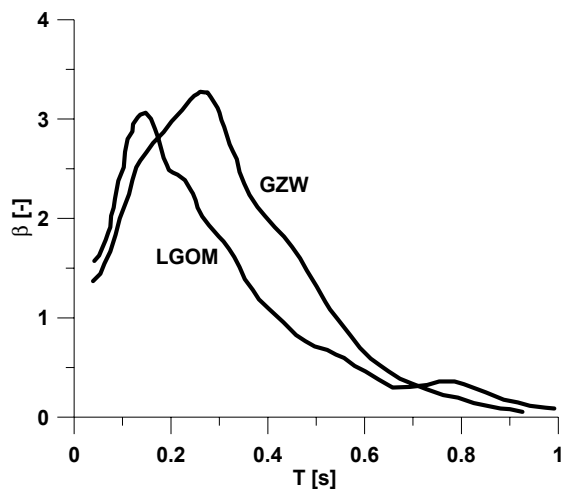
3.2. Spektrum odpowiedzi drgań wzbudzonych w czasie wstrząsów górniczych

Wstrząsy górnicze różnią się od trzęsień ziemi (m.in. czasem trwania, zakresem częstotliwości i intensywności) ale do ich analizy stosuje się z powodzeniem metody obliczeniowe używane w inżynierii sejsmicznej [20].

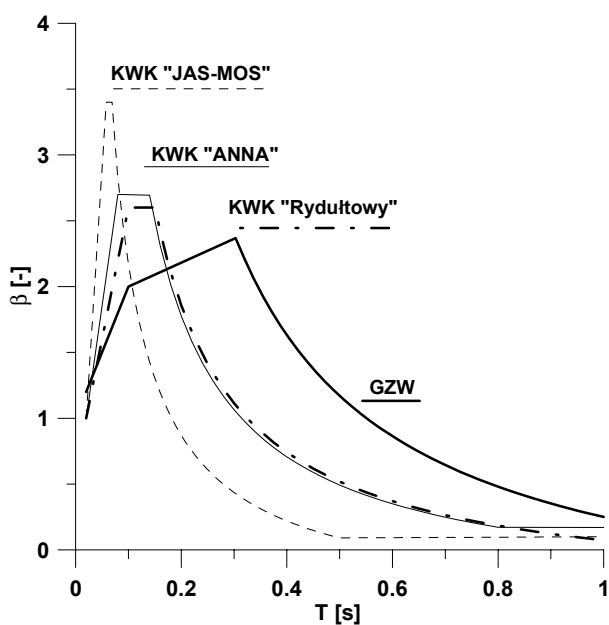
Również spektrum odpowiedzi znalazło w tym przypadku szerokie zastosowanie i jest z powodzeniem wykorzystywane do wyznaczania sił sejsmicznych w obiektach poddawanych oddziaływaniu wstrząsów górniczych.

W wyniku badań w rejonie Legnicko-Głogowskiego Zagłębia Miedziowego (LGOM) oraz Górnosląskiego Zagłębia Węglowego (GZW) wyznaczono względne przyspieszeniowe spektra odpowiedzi β [-] (rys. 5), które cały czas są udoskonalane i rozdzielane na poszczególne rejon (rys. 6) [6, 7].

Jak wynika z pracy [6], wyznaczone wcześniej wzorcowe spektra odpowiedzi nie były do końca adekwatne do sytuacji jaka panowała w rejonie GZW, dlatego zaistniała potrzeba wyznaczenia regionalnych wzorcowych spektrów odpowiedzi. Powodem było przede wszystkim zróżnicowanie podłoża w poszczególnych rejonach.



Rys. 5. Spektrum odpowiedzi dla LGOM i GZW [11]



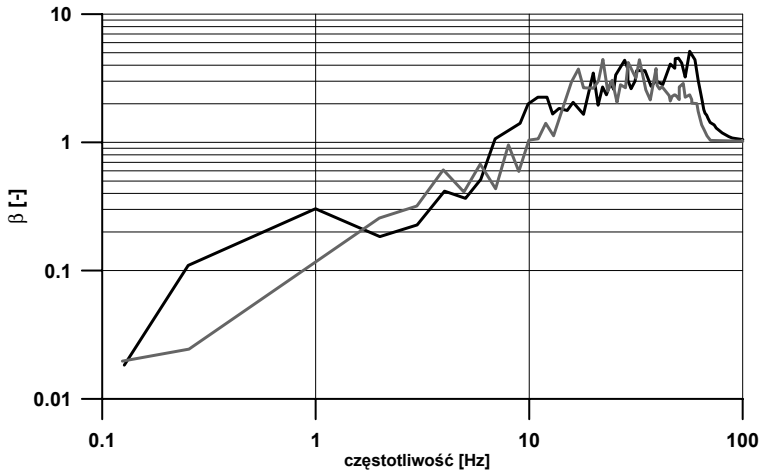
Rys. 6. Porównanie wzorcowych spektrów odpowiedzi z różnych obszarów z wzorcowym spektrum odpowiedzi dla GZW [6]

3.3. Spektrum odpowiedzi drgań wzbudzonych ruchem komunikacyjnym

W licznych pracach [3–5, 10] można znaleźć wykorzystanie metody spektrum odpowiedzi do analizy tych właśnie drgań wzbudzonych ruchem komunikacyjnym.

W pracy [10] poddano analizie spektrum odpowiedzi w zależności od różnych parametrów ruchowo-drogowych i podjęto próbę predykcji przyspieszeniowego spektrum odpowiedzi z wykorzystaniem sztucznych sieci neuronowych (SSN).

Na rysunku 7 przedstawiono przykładowe spektrum odpowiedzi drgań wzbudzonych przejazdem samochodu.



Rys. 7. Spektrum odpowiedzi drgań wzbudzonych ruchem drogowym [10]

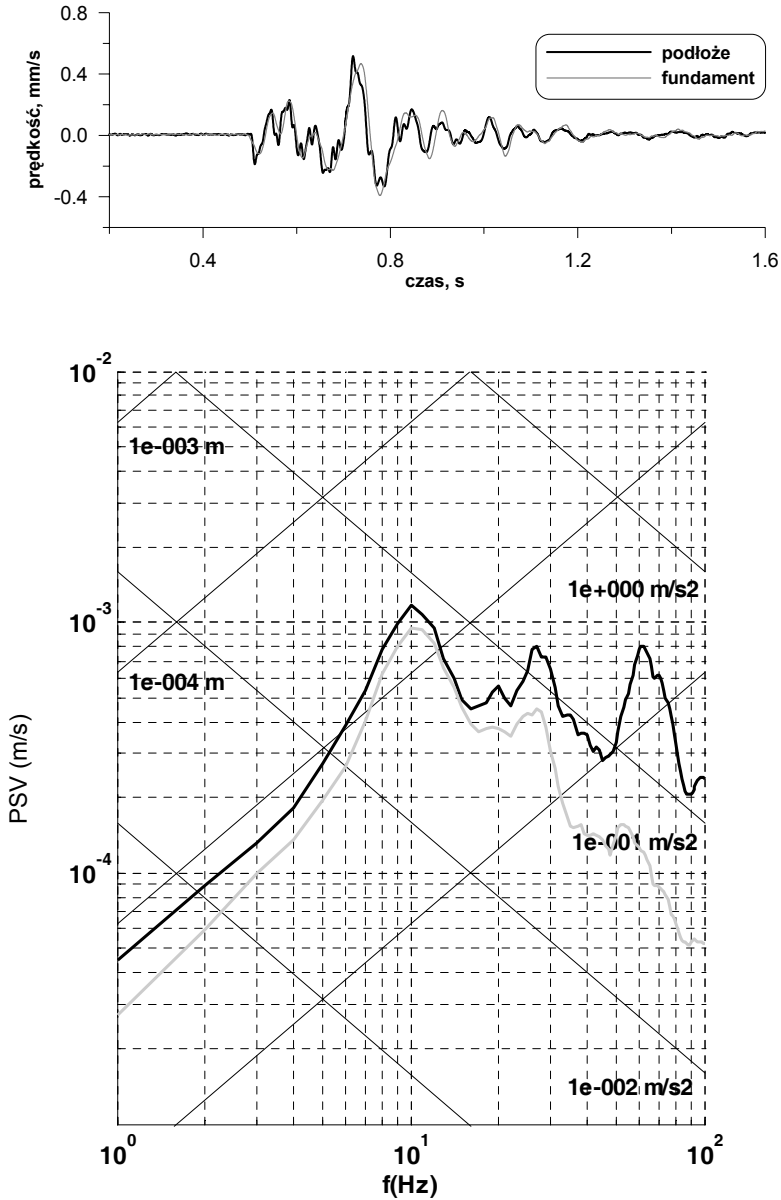
4. Spektrum odpowiedzi drgań powstałych na skutek robót strzałowych

W dotychczasowych pracach [12, 13] w niewielkim stopniu była poruszana problematyka wykorzystywania metody spektrum odpowiedzi do analizowania drgań wzbudzanych detonacją ładunków *MW* w kopalniach odkrywkowych. Autorzy tych prac zwracają jednak uwagę na możliwości jakie daje ta metoda. Z obecnie przeprowadzonych badań wynika, że charakterystyka drgań ma istotny wpływ na spektrum odpowiedzi obiektów, co powinno również występować w przypadku drgań wzbudzanych w czasie odpalania ładunków z różnym opóźnieniem milisekundowym [15, 18].

Na rysunkach 8–10 zaprezentowano wyniki badań własnych, wpływu opóźnienia milisekundowego na pseudoprędkościowe spektrum odpowiedzi drgań (*PSI*), przy ułamku tłumienia krytycznego zalecanym przez Eurokod 8 i wynoszącym 5%. Analizie poddano przebiegi drgań zarejestrowane na tym samym obiekcie i w jego pobliżu na gruncie (rys. 8).

W celu wyeliminowania wpływu pozostałych czynników na drgania parasejsmiczne, w miarę możliwości, parametry wykonywanych robót strzałowych były bardzo do siebie zbliżone, a więc: ten sam rejon prowadzenia robót strzałowych, zbliżone masy ładunków na stopień opóźnienia i ładunków całkowitych w seriach, takie same parametry siatki otworów

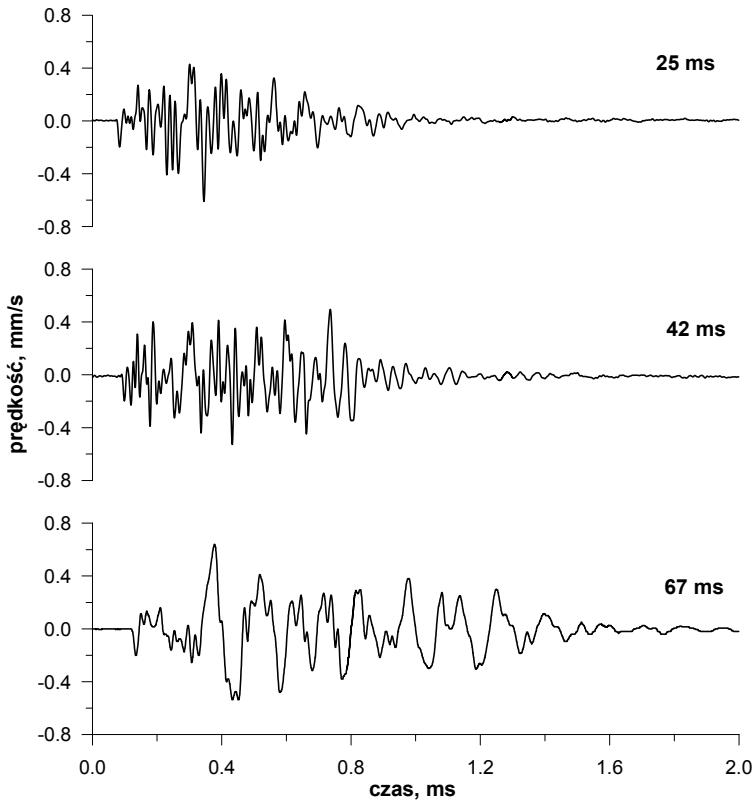
oraz takie same konstrukcje ładunków w otworach. W odpalanych seriach użyto opóźnień: 25ms, 42 ms i 67 ms. Dodatkowo odpalono pojedynczy ładunek w otworze o masie zbliżonej do masy ładunków odpalanych na opóźnienie w seriach.



Rys. 8. Przebieg drgań wzbudzonych detonacją pojedynczego ładunku i pseudoprędkościowe spektrum odpowiedzi drgań podłoża i fundamentu dla składowej poziomej

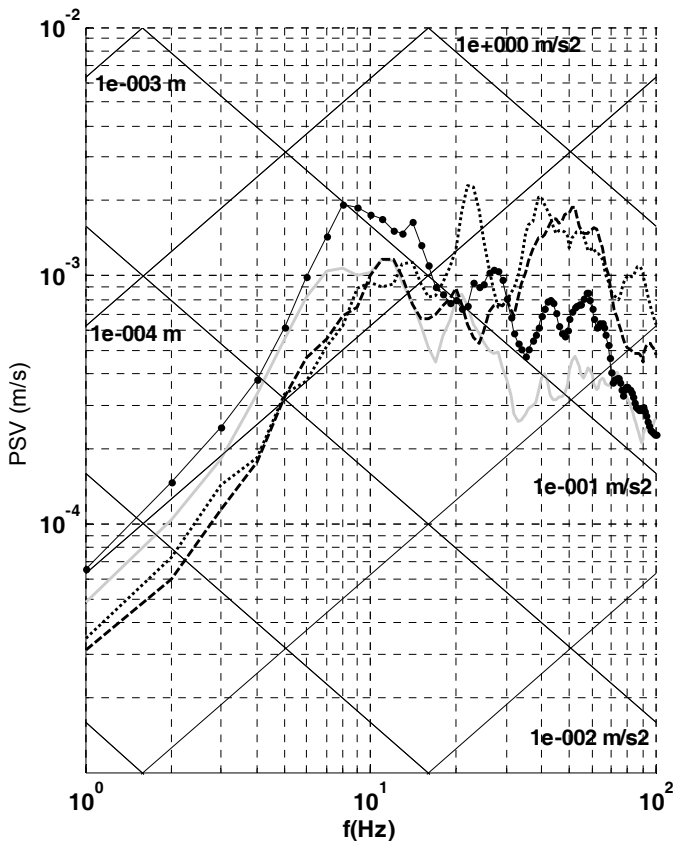
Z rysunku 8, który przedstawia spektra odpowiedzi drgań spowodowanych odpaleniem pojedynczego ładunku MW, i które można traktować jako bazowe dla danego obiektu i podłoża wynika, że częstotliwości charakterystyczne wynoszą 10–12 Hz i około 25 Hz. W podłożu również występują te częstotliwości oraz znacznie wyższe, dochodzące do 60 Hz.

Na rysunku 9 przedstawiono zapis odpalanych serii ładunków MW z opóźnieniami 25 ms, 42 ms i 67 ms. Można zauważyć jak ze wzrostem wielkości zastosowanego opóźnienia wydłuża się czas trwania drgań.



Rys. 9. Przebiegi drgań składowej poziomej dla różnych opóźnień

Rysunek 10 przedstawia jak zastosowanie opóźnienia milisekundowego wpłynęło na kształt krzywej spektrum odpowiedzi przyjętego jako bazowe (obliczone dla pojedynczego ładunku). Dla opóźnienia 67 ms częstotliwości zbliżone są do tych jakie wystąpiły w sygnale niezakłóconym. Opóźnienia 25 ms i 42 ms wyraźnie zmieniły kształt krzywej, przy czym opóźnienie 42 ms spowodowało pojawienie się niekorzystnych, z punktu widzenia polskiej normy, częstotliwości (25 Hz), natomiast opóźnienie 25 ms wzbudziło drgania o częstotliwości prawie 50 Hz.



Rys. 10. Pseudoprędkościowe spektrum odpowiedzi drgań podłoża składowej poziomej.
 Legenda: - pojedynczy ładunek, -- 25 ms, -.- 67 ms

5. Podsumowanie i wnioski

Przedstawione przykłady analiz wyraźnie pokazują wpływ opóźnienia na kształt krzywej spektrum odpowiedzi. Pozwala to przypuszczać, że dla danych warunków geologiczno-górnictwowych, przez zastosowanie precyzyjnego opóźnienia milisekundowego, a także opóźnienie może być zadawane dzięki wprowadzeniu na rynek krajowy elektronicznego systemu odpalania ładunków MW, będzie możliwe kontrolowanie częstotliwości drgań i możliwość ich ukierunkowania do zakresu częstotliwości bezpiecznych dla obiektów. Ma to istotne znaczenie dla bezpiecznego wykonywania robót strzałowych oraz ograniczenia ich wpływu na obiekty w najbliższym otoczeniu.

Dodatkową zaletą spektrum odpowiedzi jest możliwość wyznaczania sił sejsmicznych jakie będą oddziaływać na obiekt, a więc daje możliwość ochrony obiektów już na etapie projektowania.

LITERATURA

- [1] *Carvalho E.*: General requirements; ground condition and seismic action. Workshop Eurocodes: Background and application, European Commission, 18–20 February, Brussels 2008
- [2] *Chmielewski T., Zembaty Z.*: Podstawy dynamiki budowli. Wydawnictwo „Arkady”, Warszawa 1998
- [3] *Ciesielski R., Maciąg E., Pieronek M.*: Spektra odpowiedzi drgań wywołanych ruchem drogowym. Materiały XXVI Konferencji Naukowej KILiW PAN i KN PZITB, T.1, Teoria Konstrukcji, Wrocław — Krynica 1980
- [4] *Ciesielski R., Maciąg E.*: Spektra odpowiedzi drgań wywołanych ruchem drogowym. Mechanika. No. 12, Wyd. Krak. Oddział PAN, Kraków, 1986, s. 27–46
- [5] *Ciesielski R., Stypuła K.*: Symulacja nierówności nawierzchni drogowych przy badaniu efektów dynamicznych przejazdów. Materiały Seminarium Naukowo-Technicznej: Problemy Transportu Inżynierii Lądowej w Działalności Naukowej i Technicznej Krakowskiego Środowiska SITK; Zeszyt Nauk.-Techn. SITK, nr 2, z. 43, Kraków 1996
- [6] *Czerwionka L., Tatara T.*: Wzorcowe spektra odpowiedzi z wybranych obszarów GZW. Materiały XII Sympozjum „Wpływy Sejsmiczne i Parasejsmiczne na Budowle”, Politechnika Krakowska, Kraków 2009
- [7] *Dubiński J., Mutke G., Jaśkiewicz K., Lurka A.*: Górnicza Skala Intensywności GSI-2004 do oceny skutków drgań wywołanych wstrząsami górniczymi w obszarze LGOM — geneza, skala weryfikacja. Materiały XII Sympozjum „Wpływy Sejsmiczne i Parasejsmiczne na Budowle”, Politechnika Krakowska, Kraków 2009
- [8] EN 1998-1: Design of structures for earthquake resistance, Part 1: General rules, seismic action and rules for buildings — Eurocode 8
- [9] *Fardis M.N.*: Earthquake — resistant design of concrete buildings to EN1998-1 (EUROCODE 8), Workshop Eurocodes: Background and application, European Commission, 18–20 February, Brussels
- [10] *Kogut J.*: Analiza spektrum odpowiedzi drgań drogowych. (Rozprawa doktorska) Politechnika Krakowska, Instytut Mechaniki Budowli, Kraków, 1999
- [11] *Maciąg E.*: Wstrząsy górnicze i ich wpływy na budynki. Materiały VII Sympozjum „Wpływy sejsmiczne i parasejsmiczne na budowle”, Kraków 1994
- [12] *Müller B., Hausmann J., Niedzwiedz H.*: Comparison of different methods of measuring and calculating blast vibrations in rock masses. The 4th EFEE World Conference, Vienna 2007
- [13] *Onderka Zb., Sieradzki J.*: Efekt sejsmiczny strzelania w kopalniach odkrywkowych — aktualny stan i zalecane kierunki badań. Górnictwo i Geoinżynieria. Rok 28 Zeszyt 3/1, Kraków 2004
- [14] *Onderka Zb., Biessikirski R., Sieradzki J.*: Rola spektrum odpowiedzi w procesie oceny drgań w budynkach przy robotach strzałowych. Bezpieczeństwo Pracy i Ochrona Środowiska w Górnictwie, WUG nr 9(157)/1/2007
- [15] *Pyra J.*: Zastosowanie opóźnień milisekundowych do minimalizacji oddziaływania robót strzałowych na obiekty. Górnictwo i Geoinżynieria, r. 34, z. 2, Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne, Kraków, 2010
- [16] *Sinadinovski C., McCue K.F., Somerville M.*: Characteristics of strong ground motion for typical Australian intra-plate earthquakes and their relationship with the recommended response spectra. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Volume 20, Issues 1–4, 6 October 2000, p. 101–110
- [17] *Soltys A., Pyra J.*: Zastosowanie metod czasowo-częstotliwościowych do analizy drgań wzbudzanych robotami strzałowymi w górnictwie odkrywkowym. Bezpieczeństwo Pracy i Ochrona Środowiska w Górnictwie, WUG nr 5(189)/2010
- [18] *Winzer J.*: Wpływ opóźnień milisekundowych przy prowadzeniu strzelań eksploatacyjnych na częstotliwościowe charakterystyki drgań gruntu i budynków na przykładzie złoża gipsu. WGiG, AGH, Kraków 2003 (praca doktorska)
- [19] *Winzer J.*: Wpływ opóźnień milisekundowych przy prowadzeniu strzelań eksploatacyjnych na częstotliwościowe charakterystyki drgań gruntu i budynków. Górnictwo i Geoinżynieria. z. 3/1, Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne, Kraków 2004
- [20] *Zembaty Z.*: Zastosowanie normy sejsmicznej „Eurokod 8” w projektowaniu budowli narażonych na działanie wstrząsów sejsmicznych. Materiały XII Sympozjum „Wpływy Sejsmiczne i Parasejsmiczne na Budowle”, Politechnika Krakowska, Kraków 2009