

*Józef Pyra**

ZASTOSOWANIE OPÓŹNIEŃ MILISEKUNDOWYCH DO MINIMALIZACJI ODDZIAŁYWANIA ROBÓT STRZAŁOWYCH NA OBIEKTY BUDOWLANE**

1. Wprowadzenie

Roboty strzałowe prowadzone w kopalniach odkrywkowych surowców skalnych to odpalanie dużych mas materiału wybuchowego (MW), co wiąże się z propagowaniem do otaczającego górotworu znacznej ilości energii. Odpalanie ładunków w odstępach czasowych oznacza, że energia jest dostarczana do górotworu z określoną częstotliwością. Częstotliwość odpalania ładunków MW jako odwrotność opóźnienia (np. 25 ms → 40 Hz) i częstotliwość drgań charakterystyczna dla podłoża mogą być ze sobą skorelowane, co może skutkować wzbudzeniem rezonansu, a w efekcie wzmocnieniem intensywności drgań. Należy również wziąć pod uwagę, że elementem, na który oddziałują drgania parasejsmiczne jest najczęściej obiekt budowlany. Posiada on również charakterystyczne częstotliwości własne, a interakcja obiekt–podłoże, związana jest z korelacją częstotliwości drgań w podłożu i częstotliwości drgań przenoszonych do obiektu oraz częstotliwością drgań własnych obiektu [15, 19].

Całe zagadnienie można ująć systemowo w trzech blokach: źródło — propagacja — odbiornik. Ze źródłem związana jest jego lokalizacja i charakterystyka wzbudzanych drgań; propagacja to jakość podłoża, charakterystyka przewodzonych fal i dyssypacja energii; odbiornik to interakcja budynek–podłoże, cechy dynamiczne budynku i odpowiedź obiektu. Jak widać częstotliwość jest parametrem, którego rozpoznanie można postawić na pierwszym miejscu w procesie minimalizacji i ocenie oddziaływania robót strzałowych w otoczeniu.

Rozwój systemów odpalania i powiększająca się dostępność różnych opóźnień powoduje, że badania nad ich wpływem na intensywność drgań wzbudzanych robotami strzałowymi,

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

** Praca powstała w ramach badań statutowych AGH nr 11.11.100.953

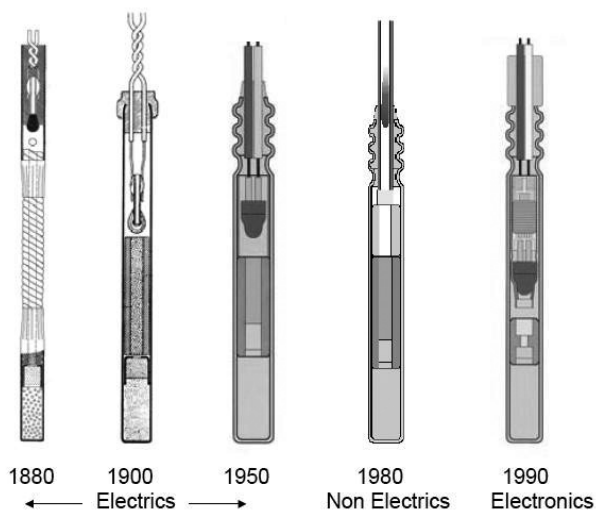
stały się bardzo ważnym elementem poszukiwań możliwości zmniejszenia oddziaływania tych robót na obiekty w otoczeniu.

W przeszłości system elektryczny dawał jedynie określone wielkości opóźnienia, ograniczone do 25 ms i jego krotności. Wprowadzenie systemów nieelektrycznych poszerzyło wachlarz dostępnych opóźnień (np. system *Nonel Unidet*: 0, 9, 17, 25, 42, 67, 109, 176, 285 ms), a stosowane już systemy elektroniczne dają nieograniczone możliwości doboru opóźnienia milisekundowego w zakresie do 15 sekund z interwałem co 1 ms.

Problem doboru odpowiedniego opóźnienia czasowego jest istotny zwłaszcza, gdy roboty strzałowe zbliżają się pod zabudowę mieszkalną w otoczeniu wyrobiska górniczego lub miejsc wykonywania robót inżynierskich z użyciem MW (np. roboty makroniwelacyjne, drażenie tuneli).

2. Systemy do odpalania milisekundowego

Precyzyjne zadanie opóźnienia międzystrzałowego stanowi kluczowe zagadnienie do minimalizacji intensywności drgań wzbudzanych robotami strzałowymi, dlatego na przełomie lat zmieniały się systemy inicjowania, zaczynając od elektrycznych zapalarek, które odpalały zapalniki elektryczne natychmiastowe [17] i zapalniki milisekundowe, zapalarki elektroniczne [1, 2], systemy nieelektryczne, a ostatnio wdrażane systemy elektroniczne (rys. 1). Wszystkie te udoskonalenia zmierzały w kierunku uzyskania precyzyjnego opóźnienia z jednoczesnym poszerzeniem opcji doboru opóźnienia w celu umożliwienia kontroli nad efektami robót strzałowych czyli rozdrobnieniem urobku i kształtem usypu oraz efektami niepożądanymi: drganiami parasejsmicznymi, powietrzną falą uderzeniową, rozrzutem odłamków skalnych.



Rys. 1. Rozwój zapalników [16]

2.1. System elektryczny

Najstarszy system do odpalania milisekundowego to system elektryczny. W skład systemu wchodzi: zapalnik elektryczny, przewody strzałowe i zapalarka. Prąd elektryczny, wytworzony przez zapalarkę i przepływający przez przewody strzałowe, dociera do cienkiego drucika żarowego, powoduje jego ogrzanie, a ten z kolei powoduje zapłon niewielkiej ilości specjalnej masy palnej. Masa ta spalając się wytwarza płomień inicjujący część spłonkową zapalnika, która następnie inicjuje ładunek MW, w którym umieszczony jest zapalnik. W przypadku zapalników elektrycznych zwłocznych między główką zapalczą, a częścią spłonkową wprowadzony jest opóźniacz, od długości którego zależy stopień opóźnienia.

2.2. System nieelektryczny

Pierwszy nieelektryczny system inicjowania został wprowadzony na rynek przez firmę Dyno Nobel i nosił nazwę NONEL [3, 12, 13]. Podstawowym elementem tego systemu jest przewód sygnałowy mający postać rurki plastikowej wypełnionej substancją reaktywną (napyłony pentryt) o prędkości transmisji fali udarowej wynoszącej około 2100 m/s. Firma wprowadziła trzy rodzaje systemów, a do prac w górnictwie odkrywkowym znalazł zastosowanie NONEL UNIDET w którym opóźnienia zadawane są przez powierzchniowe łączniki (konektory). Zasadniczą zaletą systemu nieelektrycznego, pod względem technologicznym, jest nieograniczona liczba możliwych do odpalenia pojedynczych ładunków stanowiących serię, gdyż każdy konektor stanowi nowy impuls dla następującego po nim — przyjmując za zerowy impuls zapalarki to każdy następny konektor zwiększa względem niego opóźnienie.

2.3. System elektroniczny

Coraz większą popularność zdobywają zapalniki elektroniczne, które powstały w wyniku współpracy firmy Orica i Dynamit-Nobel [11, 14]. W Polsce pierwszy raz system firmy Orica – *i-kon* został zaprezentowany w dniu 14 czerwca 2008 roku w Centralnym Laboratorium Techniki Strzelniczej i Materiałów Wybuchowych AGH w Regulicach.

Elementami składowymi systemu *i-kon* używanego na powierzchni są [4, 8]:

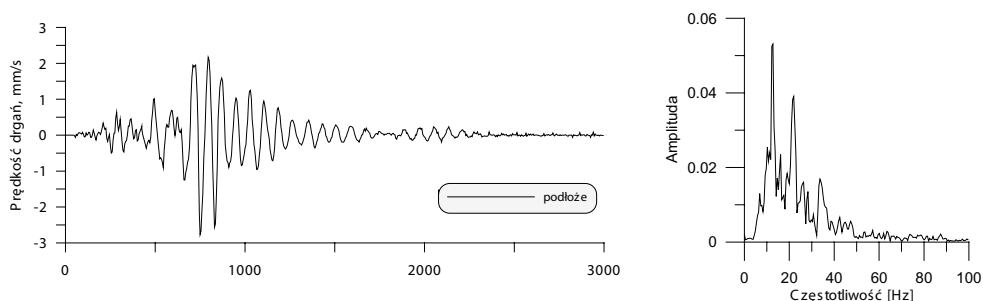
- zapalniki typu *i-kon* które posiadają wbudowany cyfrowy układ czasowy oraz przechowujący energię, umożliwiając im niezależne działanie w momencie, gdy zostanie przesłany sygnał inicjujący,
- urządzenie logujące *i-kon Logger* służące do zadawania zapalnikom opóźnień,
- zapalarka *Blaster* służąca do programowania zapalników za pośrednictwem *Loggera*. Zapalarka wysyłając kombinację sygnału cyfrowego (kodu aktywacyjnego) i prądu odpalającego aktywuje zapalniki.

Projektowanie robót strzałowych może odbywać się w biurze z wykorzystaniem programu *SHOTplus-i*, lub bezpośrednio na miejscu prowadzonych prac. Najważniejszą zaletą

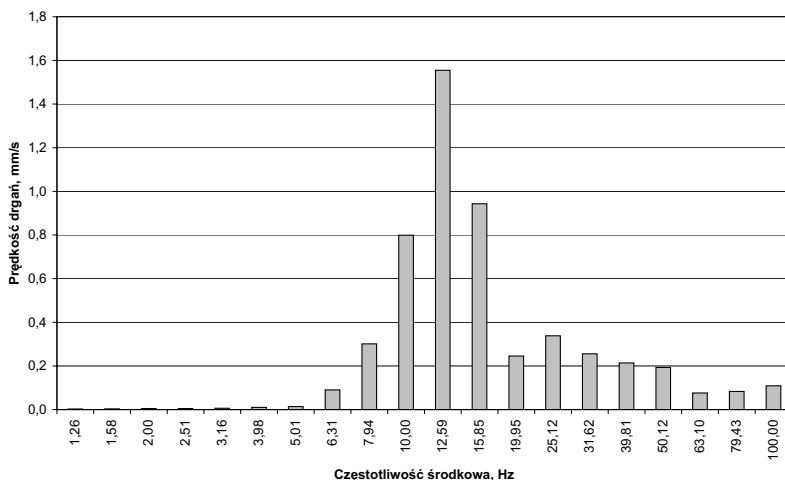
systemu jest możliwość zadawania opóźnień w przedziale od 1 do 15 000 ms z interwałem co 1 ms. Daje to praktycznie nieograniczone możliwości w doborze opóźnień.

3. Analiza intensywności drgań z zastosowaniem metody Matching Pursuit (MP)

Dotychczas w celu dokładniejszego poznania struktury drgań parasejsmicznych, zwłaszcza jej charakteru częstotliwościowego, stosowano analizę FFT (ang. *Fast Fourier Transform*). W wyniku tej analizy możliwe jest wyodrębnienie z sygnału czasowego częstotliwości dominującej, jednak tracone są informacje o czasie wystąpienia tej częstotliwości w sygnale (rys. 2). Metodą dającą szersze informacje o strukturze drgań zarówno w dziedzinie czasu jak i częstotliwości jest analiza tercjowa, która rozkłada sygnał w pasmach tercjowych i przypisuje ich wartościom środkowym odpowiednią amplitudę (rys. 3).

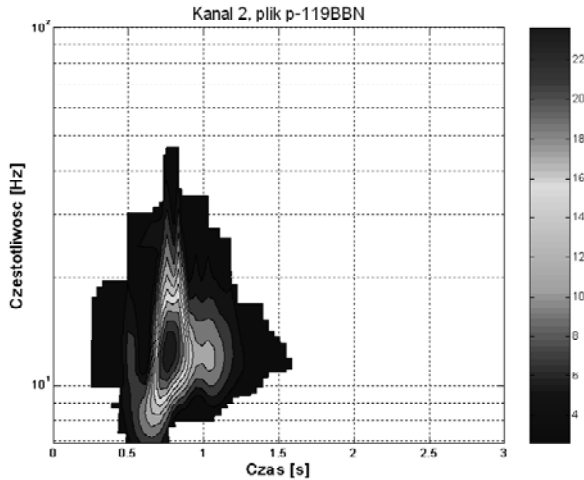


Rys. 2. Sejsmogram z wynikiem analizy FFT



Rys. 3. Wynik analizy tercjowej dla sygnału z rysunku 2

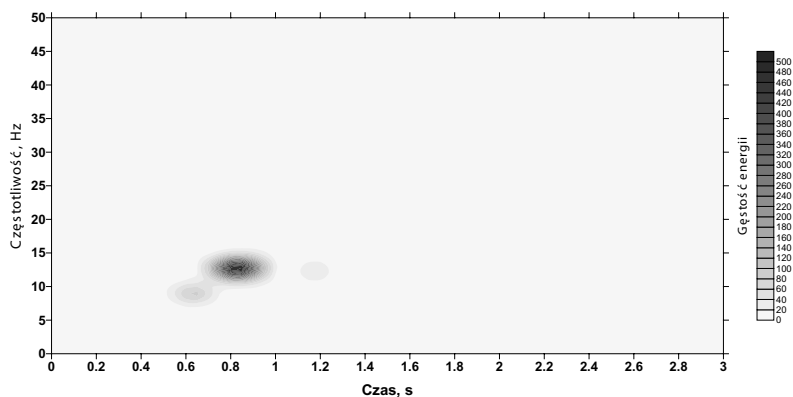
Kolejną, dokładniejszą od filtracji tercjowej, metodą analizy drgań w dziedzinie czasu i częstotliwości jest transformacja falkowa, opierająca się na dopasowywaniu do zarejestrowanego sygnału stałej funkcji bazowej zwanej falką, która jest skalowana i przesuwana wzdłuż sygnału. Przykład zastosowania analizy falkowej przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 4. Wynik analizy falkowej dla sygnału z rysunku 2

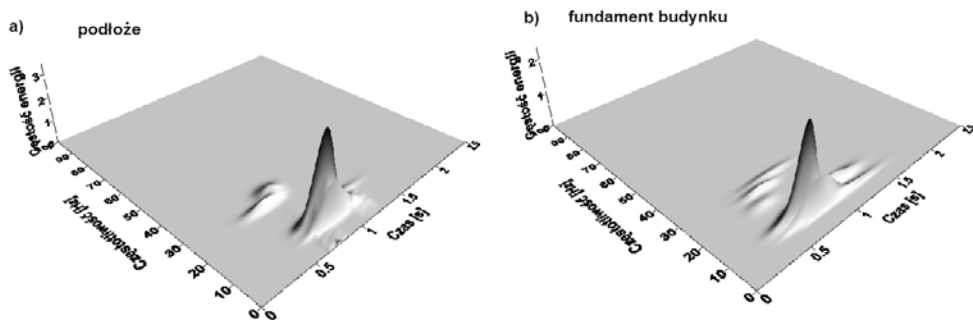
Najnowszą analizą czasowo–częstotliwościową drgań jest metoda pogoni za dopasowaniem (ang. *Matching Pursuit*) [6, 10]. Istotą tego algorytmu jest dekompozycja sygnału za pomocą funkcji określanych atomami czasowo–częstotliwościowymi, wybieranymi z obszernego zbioru zwanego słownikiem Gabora, stąd w praktyce używane jest pojęcie atomów Gabora. Proces dekompozycji ma charakter iteracyjny i polega na jak najlepszym dopasowaniu atomów Gabora do poszczególnych fragmentów sygnału i tym samym na precyzyjnym odzwierciedleniu jego cech. Zaletą metody MP, wyróżniającą ją spośród innych dotychczas stosowanych jest to, że fragment sygnału do którego dopasowany został dany atom zostaje odjęty od całości, a kolejne atomy dopasowują się do reszty sygnału pozostałej po odjęciu wyniku poprzedniej iteracji. Dzięki temu unika się zbędnego, wielokrotnego opisywania tych samych fragmentów sygnału. Proces dekompozycji algorytmem MP zostaje zakończony gdy wyjaśnione jest ok. 95% energii sygnału. W wyniku analizy MP uzyskuje się rozkład gęstości energii sygnału za pomocą mapy Wignera, na której zobrazowane są atomy Gabora w postaci kolorowych plamek oznaczających gęstość energii reprezentowaną przez atomy w różnych pasmach częstotliwości (rys. 5).

W wyniku zastosowania tej metody, do analizy sygnału drgań wzbudzanych użyciem MW można dokonać szczegółowej identyfikacji parametrów opisujących drgania, a mianowicie częstotliwości, czasu jej trwania i odpowiadającej jej amplitudzie (prędkości drgań). W przypadku analiz stosowanych do tej pory nie było możliwe tak dokładne i jednoczesne określenie wszystkich parametrów.

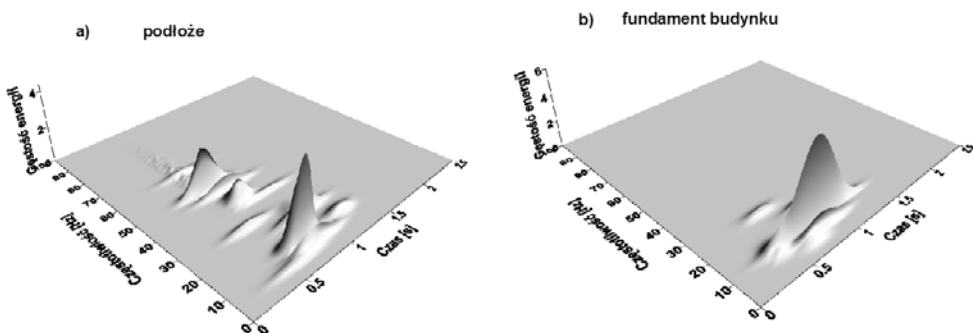


Rys. 5. Wynik analizy MP — mapa Wignera dla sygnału z rysunku 2

Dla przykładu pokazano wynik zastosowania tej analizy do interpretacji drgań, pomierzonych na tym samym obiekcie i w jego podłożu, wzbudzonych odpaleniem pojedynczego ładunku — rysunek 6, serii takich samych ładunków z opóźnieniem 25 ms (system nieelektryczny) — rysunek 7 i z opóźnieniem 20 ms (system elektroniczny) — rysunek 8.



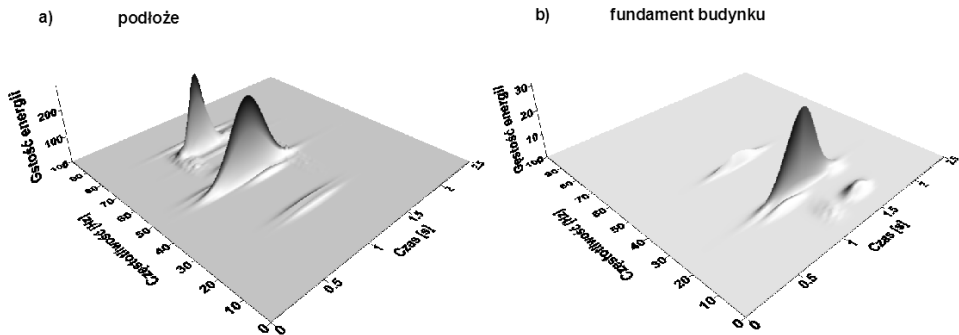
Rys. 6. Wynik analizy drgań dla pojedynczego ładunku



Rys. 7. Wynik analizy drgań dla serii otworów odpalanych milisekundowo z opóźnieniem 25 ms

Drgania rejestrowane w podłożu (rys. 6a) wnikają prawie całkowicie do fundamentu obiektu (rys. 6b) w niewielkim stopniu ulegając tłumieniu, natomiast charakterystyka częstotliwościowa pozostaje bez zmian.

Drgania o wyższych częstotliwościach (50 Hz) rejestrowane w podłożu (rys. 7a) zostają wytłumione podczas przejścia do fundamentu obiektu, natomiast drgania o niższych częstotliwościach (10–12 Hz) ulegają lekkiemu wzmocnieniu.



Rys. 8. Wynik analizy drgań dla serii otworów odpalanych milisekundowo z opóźnieniem 20 ms

Drgania o wyższych częstotliwościach (50 i 75 Hz) rejestrowane w podłożu (rys. 8a) zostają całkowicie wytłumione podczas przejścia do fundamentu obiektu, natomiast drgania o niższych częstotliwościach (25 Hz), biorąc pod uwagę rozkład gęstości energii, nie ulegają zmianie.

Podsumowując można stwierdzić, że charakterystyki drgań podłoża i fundamentu obiektu zostały dobrze opisane przez odpalenie pojedynczego ładunku MW — częstotliwość rzędu 12 Hz dominuje zarówno w podłożu jak i na fundamencie. Wprowadzenie odpalania z opóźnieniem 20 ms i 25 ms spowodowało istotne przesunięcie częstotliwości w zakres wyższych wartości, które jednakże przy przejściu z podłoża do fundamentu są tłumione. Przy opóźnieniu 25 ms drgania fundamentu zostały zredukowane do częstotliwości 10 Hz, natomiast przy opóźnieniu 20 ms, tylko do częstotliwości 25 Hz. Częstotliwość 25 Hz, w świetle polskiej normy jest bardzo niekorzystna, gdyż przesuwa drgania w zakres, w którym ograniczenia prędkości są największe. Oznacza to, że opóźnienie 20 ms w tym przypadku nie powinno być stosowane w prowadzonych robotach strzałowych.

4. Spektrum odpowiedzi

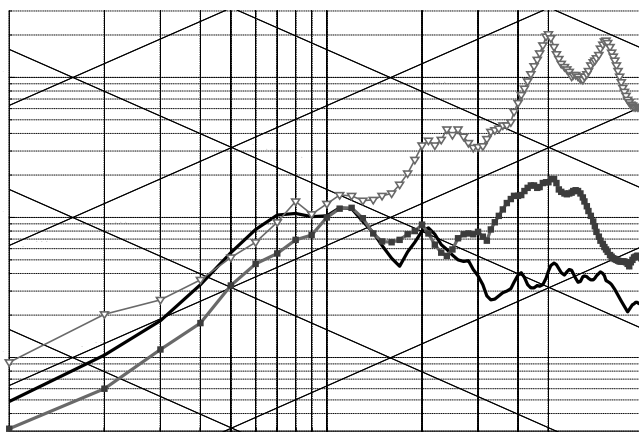
Z powyższych rozważań wynika jednoznacznie, że wielkość opóźnienia, zastosowanego przy odpalaniu milisekundowym ładunków MW, może wpływać na charakterystyki częstotliwościowe drgań wzbudzanych w podłożu [19].

Drgania przekazywane są do fundamentu obiektu powodując jego określone reakcje. Często spotykanym w literaturze pojęciem pozwalającym na szacowanie tego zjawiska jest

spektrum odpowiedzi. Współczesne normy sejsmiczne wielu krajów, wykorzystują spektra odpowiedzi, podają wzory do obliczania sił sejsmicznych oddziałujących na obiekty na skutek ruchu podłoża (wymuszenia kinematyczne) [5, 9, 18].

Przykładowo dla rejonów Górnego Śląska i Zagłębia Miedziowego, gdzie występują wstrząsy górnicze, wyznaczane są osobne spektra odpowiedzi. Konieczność ta wynika z faktu, że drgania rejestrowane w czasie wstrząsów w tych rejonach istotnie się różnią częstotliwościami, co wynika z jakości nadkładu (podłoża) i głębokości eksploatacji. Oznacza to, 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.

Dla przykładu pokazano prędkościowe spektrum odpowiedzi (PSV), model oscylatora o jednym stopniu swobody i ułamku tłumienia krytycznego 5% [7], dla drgań zarejestrowanych w podłożu (rys. 9) i fundamencie obiektu (rys. 10) podczas odpalania milisekundowego.

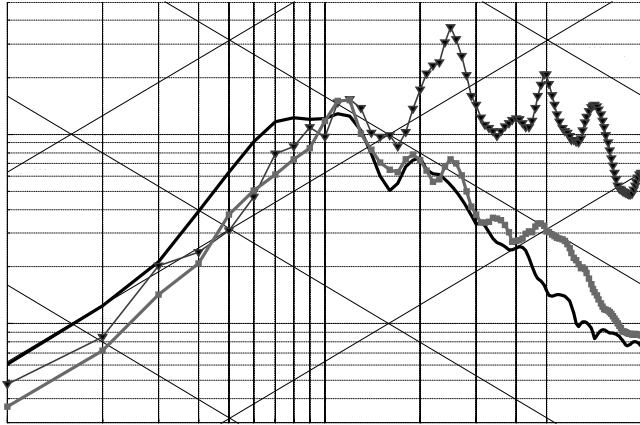


Legenda: — pojedynczy ładunek, —□— 25 ms, —▽— 20 ms

Rys. 9. Spektrum odpowiedzi dla drgań pomierzonych w podłożu

Przebieg ciągłej linii czarnej, czyli spektrum odpowiedzi dla pojedynczego ładunku MW można przyjąć jako wzorcowe dla podłoża rejonu wykonywania badań — częstotliwość charakterystyczna dla drgań podłoża i fundamentu obiektu 12 Hz. Natomiast spektra dla serii ładunków z opóźnieniem 20 ms i 25 ms wskazują, że zastosowany sposób odpalania zmodyfikował spektra wzorcowe. W przypadku opóźnienia 20 ms są to częstotliwości 50 i 75 Hz dla podłoża i 25 i 50 Hz dla fundamentu, natomiast dla 25 ms odpowiednio 50 Hz dla podłoża i 12 Hz dla fundamentu.

Analiza rysunków 9 i 10 pozwala przypuszczać, że opóźnienia milisekundowe stosowane przy odpalaniu ładunków MW mogą zdecydowanie zmieniać charakter spektrum odpowiedzi i to obliczonego zarówno na podstawie drgań rejestrowanych w podłożu jak i na fundamentach obiektów.



Legenda: — pojedynczy ładunek, □— 25 ms, ▽— 20 ms

Rys. 10. Spektrum odpowiedzi dla drgań pomierzonych na fundamencie

5. Podsumowanie

W niniejszym artykule przedstawiono przykłady zastosowania całkiem nowego podejścia do zagadnienia wpływu drgań wzbudzonych odpaleniem milisekundowym na obiekty budowlane. Pozwala to na wstępne potwierdzenie możliwości lepszego rozpoznania problematyki oddziaływania drgań i skuteczniejszej ochrony już istniejących obiektów. Powinno także podnieść wiarygodność prognozy na obszarach przewidywanych zagrożeń.

Postęp techniczny w dziedzinie techniki strzelniczej i pojawiające się nowe możliwości sterowania odpaleniem ładunków MW, wymagają szczegółowych analiz oddziaływania wzbudzanych drgań na obiekty z zastosowaniem nowoczesnych metod analizy sygnałów.

Ważnym elementem badań jest rozpoznanie stopnia w jakim opóźnienia milisekundowe mogą wpływać na spektrum odpowiedzi. Ma to istotne znaczenie dla bezpiecznego wykonywania robót strzałowych oraz ograniczenia ich wpływu na obiekty w najbliższym otoczeniu.

LITERATURA

- [1] *Biessikirski R.*: Wybrane informacje na temat konstrukcji i testowania zapalarki milisekundowej. Konferencja: Problemy techniki strzelniczej w górnictwie — perspektywy rozwoju. ZG AGH, Kraków 1991, s. 61–64
- [2] *Biessikirski R.*: Zapalarka milisekundowa Expo 201. Konferencja: Technika strzelnicza w górnictwie. PPGSMiE PAN, Jaszowiec 1996, s. 47–66
- [3] *Biessikirski R., Sieradzki J., Winzer J.*: Uwagi praktyczne do nieelektrycznego odpalania długich otworów na przykładzie systemu Nonel Unidet. Konferencja: Technika strzelnicza w górnictwie — Problemy urabiania skał. Jaszowiec 2001, Art.-Tekst, Kraków, s. 241–252
- [4] *Cichoń M., Janusz M., Ostiadel W., Pietkiewicz K., Szumny M.*: System zapalników elektronicznych „i-kon” firmy Orica. Bezpieczeństwo Pracy i Ochrona Środowiska w Górnictwie 09/2007, s. 23–25

- [5] *Czerwionka L., Tatara T.*: Wzorcowe spektra odpowiedzi z wybranych obszarów GZW, Czasopismo techniczne. Budownictwo zeszyt 2B/2007, s. 11–18
- [6] *Durka P.J., Matysiak A., Martinez Montes E., Valdes Sosa P., Blinowska K.J.*: Multichannel Matching Pursuit and EEG Inverse Solutions. *Journal of Neuroscience Methods*, vol. 148/1, 2005, pp 49–59
- [7] EC-8: Design of Structures for Earthquake Resistance, Draft No 6, CEN, January 2003
- [8] *Lovitt M.B., Degay B. Jr.*: Single Shot Drawbell with Orica's i-kon Detonators at Freeport. *Explosives and Blasting Technique*, Holmberg (ed.), Swets & Zeitlinger, Lisse 2003, p. 225–235
- [9] *Maciąg E.*: Interakcja układu budynek — podłoże podlegającego działaniom sejsmicznym i parasejsmicznym. *Mechanika teoretyczna i stosowana*, Tom 17 zeszyt 4 PWN Warszawa 1979, s. 497–536
- [10] *Mallat S., Zhang Z.*: Matching Pursuit with Time-frequency Dictionaries. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 41, 1993, p. 3397–3415
- [11] *Müncner E. i inni.*: Priručka pre strelmajstrov a technických veducich odstrelöv. SSTVP Banská Bystrica 2000
- [12] Nonel — poradnik użytkownika. Dyno Nobel Swede AB, 2003
- [13] *Oloffson S. O.*: Applied Explosives Technology for Construction and Mining. Nora Boktryckeri AB, 1990
- [14] *Pietkiewicz K., Dusza R., Janusz E.*: Orica Mining Service — Polska, Europa, Świat — komunikat. *Bezpieczeństwo Pracy i Ochrona Środowiska w Górnictwie* 09/2007, s. 81–82
- [15] *Pyra J.*: Ocena oddziaływania górniczych robót strzałowych na obiekty budowlane. *WUG Bezpieczeństwo Pracy i Ochrony Środowiska w Górnictwie* nr 3/2008 Katowice, s. 41–47
- [16] *Reinders, P. Hammelmann, F.*: Electronic Blasting & Blast Management — Past, Present & Future. *Proceeding of the annual conference on explosives and blasting techniques*, 2004, 30TH; VOL 1, p. 229–238
- [17] *Sulima Samujłło J.*: Roboty strzelnicze w górnictwie odkrywkowym. Wydawnictwo „Śląsk”, Katowice 1968
- [18] *Tatara T.*: Działanie drgań powierzchniowych wywołanych wstrząsami górniczymi na niską tradycyjną zabudowę mieszkalną. *Zeszyty naukowe Politechniki Krakowskiej, seria Inżynieria Lądowa* nr 74, Kraków 2002
- [19] *Winzer J.*: Wpływ opóźnień milisekundowych przy prowadzeniu strzelań eksploatacyjnych na częstotliwościowe charakterystyki drgań gruntu i budynków na przykładzie złoża gipsu. *Praca doktorska AGH, Kraków* 2003