

Anna Sołtys*

SKALE SWD — ZASTOSOWANIE WYNIKÓW ANALIZY *MATCHING PURSUIT* DO OCENY ODDZIAŁYWANIA DRGAŃ NA OBIEKTY**

1. Wprowadzenie

Urabianie kopaliny z wykorzystaniem materiałów wybuchowych (MW) nierozdzielnie wiąże się z możliwością wystąpienia określonego zagrożenia w otoczeniu kopalni. W szczególności dotyczy to obiektów budowlanych podatnych na dynamiczne oddziaływanie drgań parasejsmicznych (generowanych w wyniku działalności człowieka). Drgania parasejsmiczne zalicza się do niestacjonarnych procesów losowych o charakterze transjentowym. Należy przez to rozumieć, że charakter sygnałów generowanych w wyniku detonacji MW jest zmienny, co oznacza, że drgania te wymagają bardzo indywidualnego podejścia i szczegółowych analiz w celu uzyskania jak największej ilości informacji.

Intensywność i charakterystykę częstotliwościową drgań można określać przez:

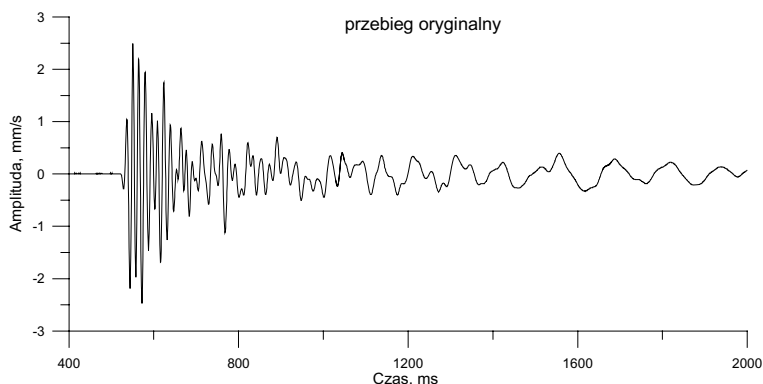
- a) analizę w dziedzinie czasu,
- b) analizę w dziedzinie częstotliwości — transformacja Fouriera (*Fourier Transform*),
- c) filtrację sygnału czasowego — analiza tercjowa,
- d) krótkoczasową transformatę Fouriera (STFT) — *Short-Time Fourier Transform*,
- e) analizę w dziedzinie czasu i częstotliwości — transformata falkowa (*Wavelet Transform*),
- f) analizę w dziedzinie czasu i częstotliwości — algorytm dopasowania krokowego (*Matching Pursuit*).

Pojęcie analizy wiąże się z rozkładem pewnej całości na składowe elementarne. W odniesieniu do sygnałów dziedzina wiedzy dotycząca tego typu działań nazywana jest przetwarzaniem sygnałów.

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

** Praca realizowana w ramach projektu badawczego finansowanego przez MNiSW nr 18.18.100.289

Przebieg różnych sposobów analizy omówiono poniżej, dla sygnału czasowego przedstawionego na rysunku 1.



Rys. 1. Oryginalny zarejestrowany sygnał

2. Analiza w dziedzinie czasu

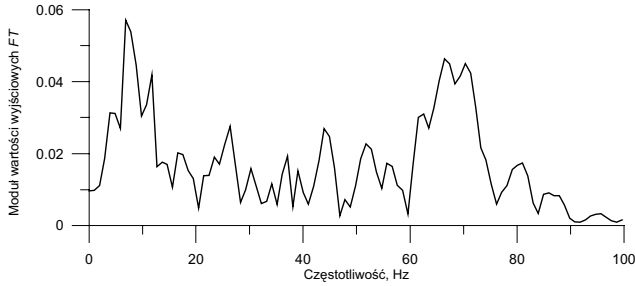
Analiza tylko w dziedzinie czasu daje zbyt mało informacji o charakterystyce drgań. Każdy złożony sygnał w rzeczywistości składa się z wielu podstawowych przebiegów harmonicznym, czyli prostszych drgań opisanych przykładowo częstotliwościami. Takich informacji nie można uzyskać opisując sygnał tylko na podstawie jego przebiegu w czasie. Czego zatem można się dowiedzieć? Z tego typu analizy otrzymuje się informacje o wartości maksymalnej mierzonego parametru np. prędkości drgań, tzw. *Particle Peak Velocity* (PPV). Wartość PPV jest najczęściej brana pod uwagę przy opisywaniu intensywności drgań parasejsmicznych.

3. Transformacja Fouriera (FT) — Fourier Transform

Analiza w dziedzinie częstotliwości (tzw. analiza widmowa) pozwala głębiej poznać strukturę drgań [6]. Polega ona na dekompozycji oryginalnego szeregu czasowego (sygnału) na podstawowe funkcje sinus i cosinus o różnych częstotliwościach i określeniu, które z nich są najbardziej istotne w budowaniu obrazu drgań. Jedną z metod analizy sygnałów czasowych w dziedzinie częstotliwości jest transformacja Fouriera a jej wynikiem jest całka Fouriera przedstawiająca widmo amplitudowe funkcji $s(t)$, czyli ilustrująca zależność amplitud poszczególnych składowych sygnału określonego funkcją $s(t)$ od częstotliwości (rys. 2).

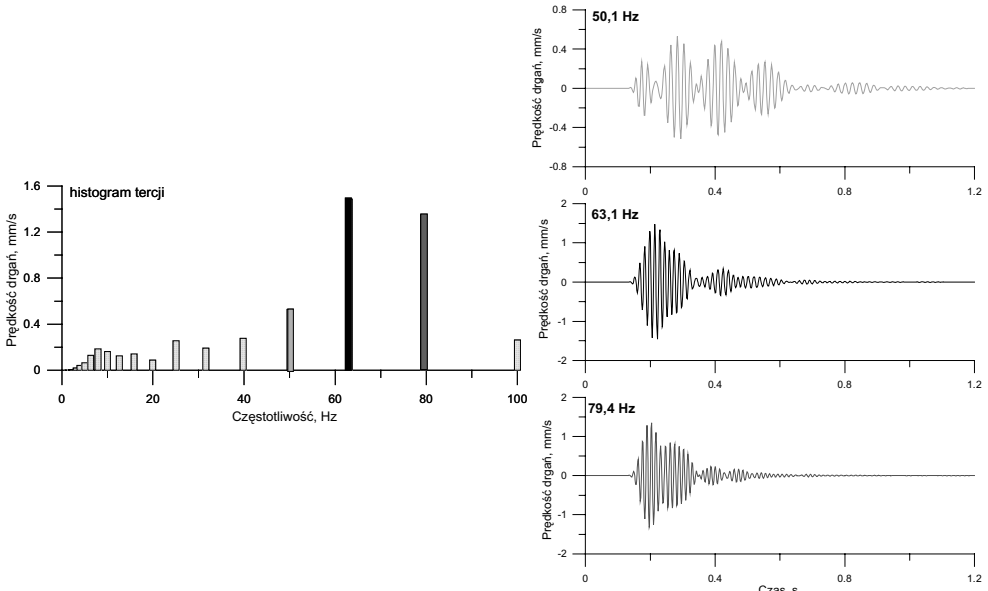
4. Filtracja sygnału czasowego — analiza tercjowa

Jedną z analiz czasowo-częstotliwościowych jest analiza filtracyjna, wykonywana między innymi z wykorzystaniem filtrów tercjowych.



Rys. 2. Widmo amplitudowe przebiegu czasowego przedstawionego na rysunku 1

W wyniku filtracji trójowej z jednego przebiegu czasowego otrzymuje się cały zestaw przebiegów umożliwiającą czasową analizę w wybranych częstotliwościach, na co nie pozwala transformata Fouriera (rys. 3).



Rys. 3. Przykład efektu filtrowania trójowego przebiegu czasowego przedstawionego na rysunku 1

5. Krótkoczasowa transformata Fouriera (STFT) — Short-Time Fourier Transform

Kolejną metodą opisywania struktury sygnałów w dziedzinie czasu i częstotliwości, znacznie dokładniejszą od analizy filtracyjnej jest krótkoczasowa transformata Fouriera (STFT), która polega na wycinaniu kolejnych odcinków sygnału za pomocą funkcji okna i obliczaniu ich transformat Fouriera.

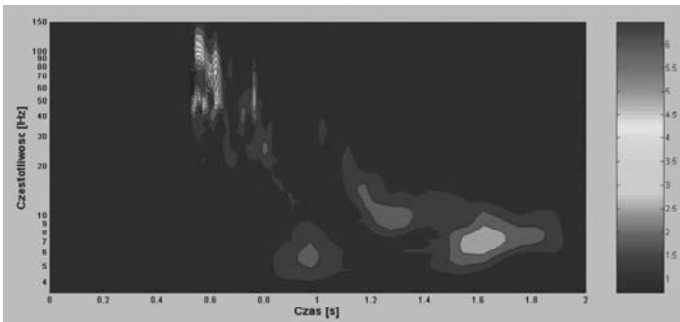
Sygnaly niestacjonarne mają bardzo zróżnicowany charakter w związku z czym wymagają bardziej elastycznego podejścia w celu uzyskania dokładniejszych informacji w dziedzinie albo czasu albo częstotliwości. Umożliwia to kolejna metoda przetwarzania sygnałów, transformata falkowa.

6. Transformacja falkowa — Wavelet Transform

Transformacja falkowa to następny krok w analizie sygnałów, wykorzystująca również technikę okienkowania (*windowing*), ale okna analizy są różnej długości i częstotliwości [5].

Analiza falkowa pozwala na stosowanie długich interwałów czasowych, kiedy zachodzi potrzeba wychwycenia dokładniejszych informacji o niskich częstotliwościach i krótszych obszarów, kiedy potrzebne są informacje wysokoczęstotliwościowe.

W wyniku dopasowywania falki do sygnału otrzymuje się szereg współczynników falkowych C , które określają stopień korelacji zastosowanej falki z sygnałem. Po ukończeniu wyznaczania ciągłej transformaty falkowej uzyskuje się współczynniki dla różnych skal i różnych części sygnału (rys. 4). Im większa wartość współczynnika falkowego C tym lepsze dopasowanie falki do sygnału.



Rys. 4. Mapa współczynników falkowych C dla sygnału czasowego przedstawionego na rysunku 1

7. Algorytm *Matching Pursuit* (MP) — algorytm dopasowania krokowego

Sygnaly niestacjonarne charakteryzują się bardzo dużą zmiennością i związłą reprezentacją dla nich, można osiągnąć opisując je przez wybór funkcji z bardzo dużego redundantnego zestawu zwanego słownikiem [2]. Najbardziej optymalne rozwiązanie uzyskuje się wtedy, gdy elementy słownika funkcji wyjaśniają największy procent energii sygnału. Wybór takiej reprezentacji daje algorytm *Matching Pursuit* (MP) [3]. Algorytm ten zakłada dekompozycję sygnału za pomocą funkcji, zwanych atomami czasowo-częstotliwościowymi, wybranych z słownika $G = \{g_1(t), g_2(t), \dots, g_n(t)\}$. Pojęcie atomu należy definiować jako elementarną część sygnału, której zadaniem jest jak najlepsze odzwierciedlenie cech sygnału. Atom ten

można wyrazić jako pojedynczą funkcję okna $g(t)$ poprzez skalowanie a , translację b oraz modulację częstotliwościową $\zeta(1)$.

$$g_I(t) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} g\left(\frac{t-b}{a}\right) e^{i\zeta t} \quad (1)$$

gdzie:

- I — indeks określający zestaw parametrów danego atomu, $I = (a, b, \zeta)$,
- a — współczynnik skali,
- b — współczynnik przesunięcia (translacji),
- ζ — modulacja częstotliwościowa,
- $e^{i\zeta t}$ — zespolona funkcja wykładnicza.

W praktyce stosuje się słownik Gabora, zawierający atomy Gabora, czyli funkcje Gaussa modulowane sinusem.

W pierwszym etapie dekompozycji wybierana jest funkcja g_{I_0} najlepiej dopasowana do sygnału s i dająca z nim największy iloczyn skalarny. W każdym następnym kroku iteracji funkcja g_{I_n} jest dopasowywana do reszty (residuum) sygnału R^n_s , pozostałej po odjęciu wyniku poprzedniej iteracji. Po m iteracjach algorytmu MP sygnał s można wyrazić jako sumę residuów (2):

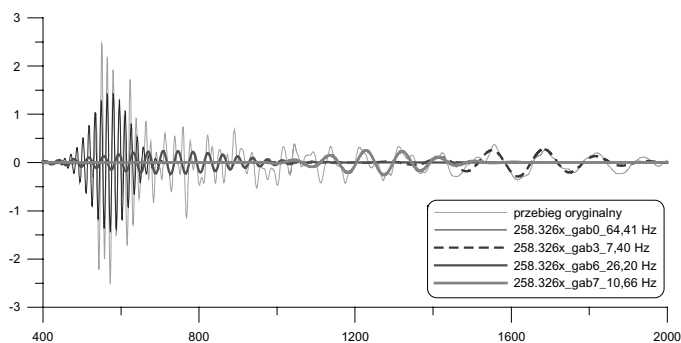
$$s = \sum_{n=0}^{m-1} \langle R^n s, g_{I_n} \rangle g_{I_n} + R^m s \quad (2)$$

W miarę dekompozycji sygnału liczba dopasowujących się atomów jest wyczerpywana a residua zawierają coraz mniej energii. Proces aproksymacji atomów do sygnału nie trwa w nieskończoność. Algorytm MP jest zatrzymywany, gdy zostanie wyjaśnionych 95% energii sygnału, pozostała reszta nazywana jest błędem aproksymacji (np. szum występujący w sygnale).

Bardziej wnikliwa analiza energetycznego charakteru sygnałów jest niezwykle istotna w odniesieniu do drgań wzbudzanych robotami strzałowymi prowadzonymi w odkrywkowych zakładach górniczych. Często dochodzi do zjawiska nagłego wzmocnienia drgań w większej odległości od miejsca wykonywania robót strzałowych, co nasuwa konieczność identyfikacji przyczyn takiego wzrostu intensywności drgań.

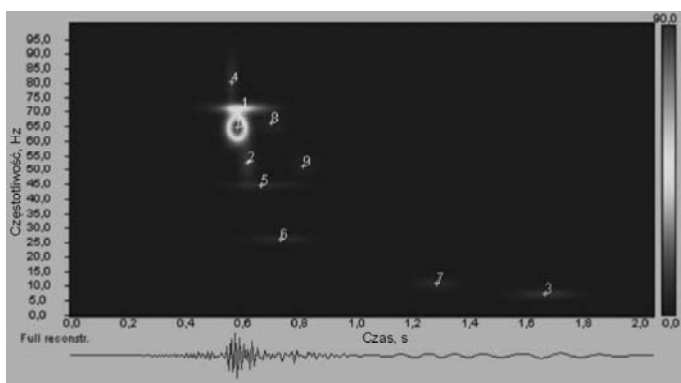
W przypadku (STFT) nie ma możliwości doboru dowolnego rozmiaru okna analizy, co daje słabą rozdzielczość czasowo-częstotliwościową. W transformacie falkowej dopasowanie funkcji, jaką jest falka, do rzeczywistego sygnału jest lepsze aczkolwiek w odniesieniu do krótkich struktur, a ponadto falki dopasowywane są zawsze do tego samego sygnału przez co niektóre jego fragmenty mogą być opisywane wielokrotnie. Stosując natomiast do analizy drgań algorytm MP unikamy zbędnego wielokrotnego charakteryzowania tych samych fragmentów sygnału. Daje to bardziej precyzyjny obraz energetyczny struktury drgań w dziedzinie czasu i częstotliwości.

Dla przykładu na rysunku 5 przedstawiono cztery atomy Gabora, które dopasowały się do poszczególnych fragmentów zarejestrowanego sygnału. Widoczne na rysunku atomy o numerach 0, 3, 6 i 7 wyjaśniły kolejno 36,6%, 4,61%, 3,20% i 2,93% energii sygnału. Pozostałe, dopasowane do sygnału, atomy (nr 1, 2, 4, 5, 8 i 9) zostały pominięte aby nie zaciemniać rysunku.



Rys. 5. Atomy Gabora dopasowywane do przebiegu przedstawionego na rysunku 1

Wyniki analizy metodą dopasowania krokowego przedstawiane są jako rozkład energii uzyskany za pomocą dystrybucji Wignera, zwany również mapą Wignera (rys. 6).

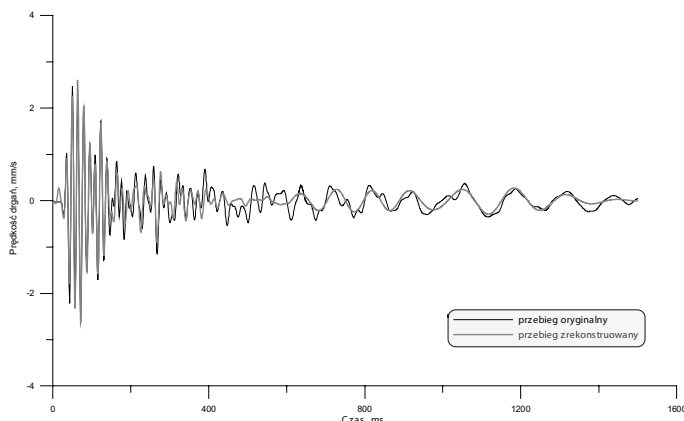


Rys. 6. Mapa Wignera dla przebiegu czasowego z rysunku 1

Na mapie Wignera prezentowane są atomy Gabora (w postaci kolorowych plamek — *blobs*), które dopasowując się do sygnału rzeczywistego zrekonstruowały go i wyjaśniły ok. 95% jego energii. Jak widać z rysunku 6, atomy Gabora dają możliwość zlokalizowania w czasie charakterystycznych częstotliwości mających istotne znaczenie w budowie danego sygnału. Intensywność kolorów poszczególnych atomów oznacza gęstość energii jaką reprezentują w różnych pasmach częstotliwości. Suma energii dopasowanych atomów czasowo-częstotliwościowych daje energię sygnału, zgodnie z zasadą zachowania energii (3):

$$\|s\|^2 = \sum_{n=0}^{m-1} |\langle R^n s, g_n \rangle|^2 + \|R^m s\|^2 \quad (3)$$

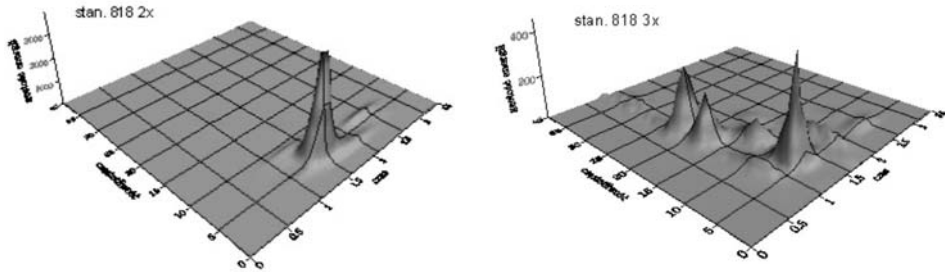
W celu wykazania stopnia dokładności rekonstrukcji rzeczywistego sygnału przez atomy Gabora, na rysunku 7 przedstawiono rzeczywisty przebieg drgań z rysunku 1 (kolor ciemniejszy) i naniesiony na niego sygnał zrekonstruowany (kolor jaśniejszy). Jak widać występujące różnice są niewielkie, zwłaszcza w początkowej fazie po wzbudzeniu sygnału, co świadczy o bardzo precyzyjnym dopasowaniu się atomów czasowo-częstotliwościowych do sygnału i dokładnym odtworzeniu jego cech. Należy pamiętać, że w rejestrowanych sygnałach mogą pojawiać się zakłócenia (np. szum), powodujące powstawanie pewnych różnic między sygnałem rzeczywistym a zrekonstruowanym. Jak już wcześniej wspomniano, w procesie aproksymacji atomów Gabora do oryginalnego przebiegu drgań, reszta pozostała po m iteracjach, przy której następuje zatrzymanie algorytmu MP zwana jest błędem aproksymacji, którym może być właśnie szum.



Rys. 7. Porównanie rzeczywistego przebiegu czasowego z rysunku 1 i jego rekonstrukcji za pomocą atomów Gabora

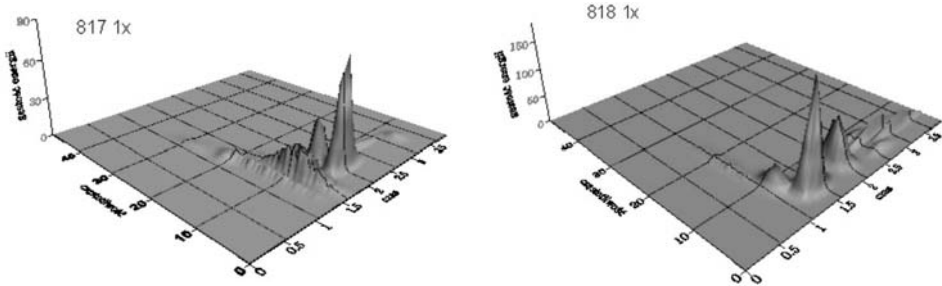
W odniesieniu do drgań rejestrowanych w czasie wykonywania robót strzałowych wybór algorytmu *Matching Pursuit* dającego dobrą rozdzielczość czasowo-częstotliwościową i jednocześnie charakteryzującego obraz energetyczny sygnałów jest bardzo istotny. Przykładowo, na podstawie uzyskanych wyników można wykonać analizy pozwalające identyfikować różnice jakości podłoża pod budynkami, w źródle drgań czy jakość ośrodka, w którym wykonywane są roboty strzałowe.

Na rysunku 8 przedstawiono wyniki analizy *Matching Pursuit* dla drgań parasejsmicznych wzbudzonych w czasie strzelania jednoonorowego (pojedynczy ładunek MW) i zarejestrowanych na dwóch stanowiskach pomiarowych zlokalizowanych w różnych podłożach.



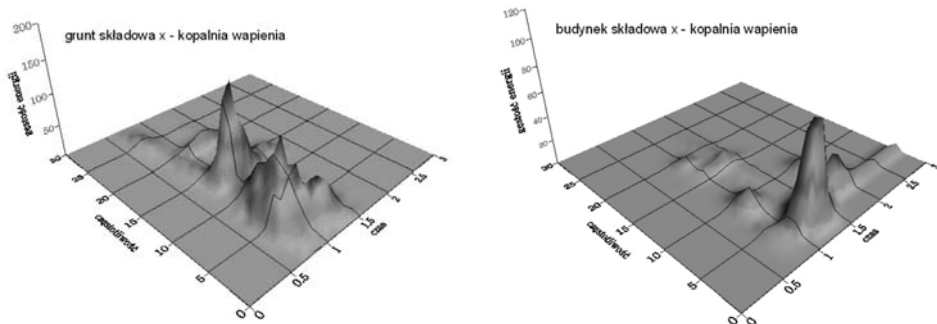
Rys. 8. Efekt sejsmiczny strzelania jednotworowego — drgania mierzone na dwóch stanowiskach w różnych podłożach

Innym przykładem może być, przedstawiony na rysunku 9, efekt sejsmiczny, mierzony na tym samym stanowisku, przy odpalaniu pojedynczego ładunku MW w różnych surowcach (wapień i margiel).



Rys. 9. Efekt sejsmiczny strzelania jednotworowego w różnych surowcach — drgania mierzone na tym samym stanowisku

Algorytm dopasowania krokowego pozwala również na analizę zjawiska jakim jest tłumienie drgań w momencie ich przejścia z podłoża (gruntu) do fundamentu budynku. Na rysunku 10 wyraźnie widać, że dominująca częstotliwość 14 Hz została w bardzo dużym stopniu wytłumiona, zaś częstotliwość 5 Hz uległa wzmocnieniu.



Rys. 10. Zjawisko tłumienia drgań

8. Skale SWD a metoda Matching Pursuit

Analiza *Matching Pursuit* może być również bardzo użyteczna do oceny szkodliwości drgań dla obiektów budowlanych.

Aktualnie zalecaną metodą oceny jest zastosowanie skal SWD zawartych w normie [4], przez nanoszenie wartości amplitud określających intensywność drgań korelowanych częstotliwością. Stosuje się dwie metody: metodę bezpośrednią — wartość szczytowa (PPV), oraz metodę pośrednią — histogram drgań otrzymany w wyniku filtrowania tercjowego.

Zwolennicy ocen prowadzonych z zastosowaniem skal SWD preferują metodę pośrednią jako lepiej oddającą impulsowy charakter drgań, pozostawiając metodę bezpośrednią jako przydatną w przypadku obciążeń o charakterze ciągłym. Przeciwnicy skal SWD podkreślają brak uwzględnienia czynnika czasu oddziaływania, proponując posługiwanie się skalami GSI [1], które intensywność drgań, w postaci wartości wektora płaskiego, charakteryzują dodatkowo czasem trwania drgań, obliczanym na podstawie całki Ariasa. Skale GSI pozbawione są jednak charakterystyki częstotliwościowej drgań, co w przypadku drgań wzbudzanych robotami strzałowymi jest poważnym mankamentem.

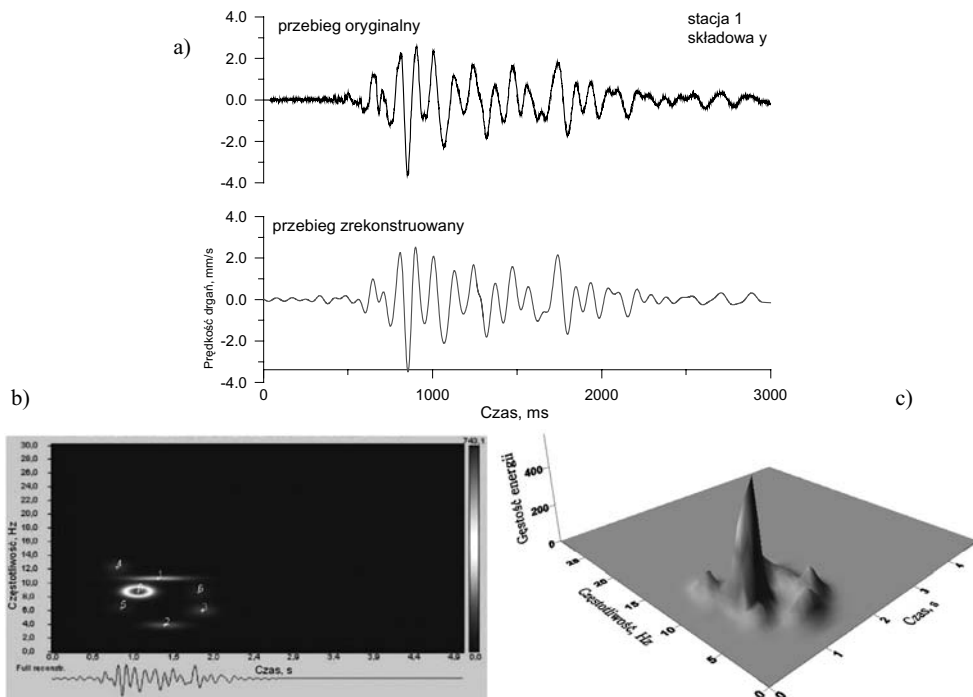
Wpływ czasu trwania drgań jest nie do zakwestionowania, dlatego też zastosowanie do oceny oddziaływania metody MP uwzględniającej jednocześnie intensywność, czas, częstotliwość a dodatkowo również energię drgań wydaje się rozwiązaniem optymalnym.

Na rysunku 11 przedstawiono wynik analizy metodą MP drgań zarejestrowanych, przez Kopalnianą Stację Monitoringu Drgań, w czasie robót strzałowych prowadzonych w jednej z kopalń odkrywkowych [7]. Rysunek 11a przedstawia przebiegi drgań na składowej poziomej jako oryginalny, zrekonstruowany przez dopasowanie określonej liczby atomów Gabora oraz porównanie przebiegu zrekonstruowanego z oryginalnym. Jak widać wyjaśnienie, za pomocą 10 atomów Gabora, 95% energii drgań odwzorowuje oryginalny przebieg bardzo dokładnie.

Na rysunkach 11b i 11c przedstawiono wynik analizy MP w postaci mapy Wignera i jako energetyczny obraz przestrzenny w dziedzinie czasu i częstotliwości. Jak widać dominacja drgań o określonej częstotliwości (10 Hz) jest bardzo istotna.

Jak można przenieść wynik analizy MP na skale SWD? W efekcie obliczeń otrzymuje się elementarne atomy Gabora opisane częstotliwością, amplitudą i dodatkowo zawartą w nich energią. Należy pamiętać, że stopień dopasowania jest oceniany przez wyjaśnienie określonej ilości energii zawartej w sygnale. Przedstawienie na skali SWD poszczególnych atomów Gabora (amplituda–częstotliwość) jest analogiczne jak w przypadku histogramu filtracji tercjowej (metoda pośrednia). Każdy atom Gabora ma przypisaną jednocześnie energię, którą można przedstawić jako informację dodatkową (rys. 12). Na rysunku 12 przedstawiono porównanie oceny z zastosowaniem obydwu analiz czasowo-częstotliwościowych (filtracji tercjowej i MP). Pozornie wynik oceny oddziaływania jest zbliżony, ale metoda MP wskazuje jednoznacznie dominującą rolę częstotliwości 6,5 Hz, która niesie 88% energii sygnału, a jednocześnie amplituda tego

atomu jest prawie dwa razy większa od wynikającej z analizy tercjowej. Analiza tercjo-
wa wskazuje również na udział innych częstotliwości, co praktycznie wyklucza metoda
MP — inne częstotliwości to tylko 12 procent energii sygnału, co przy tak zdecydowanej
dominacji jednej częstotliwości pozwala na pominięcie pozostałych.

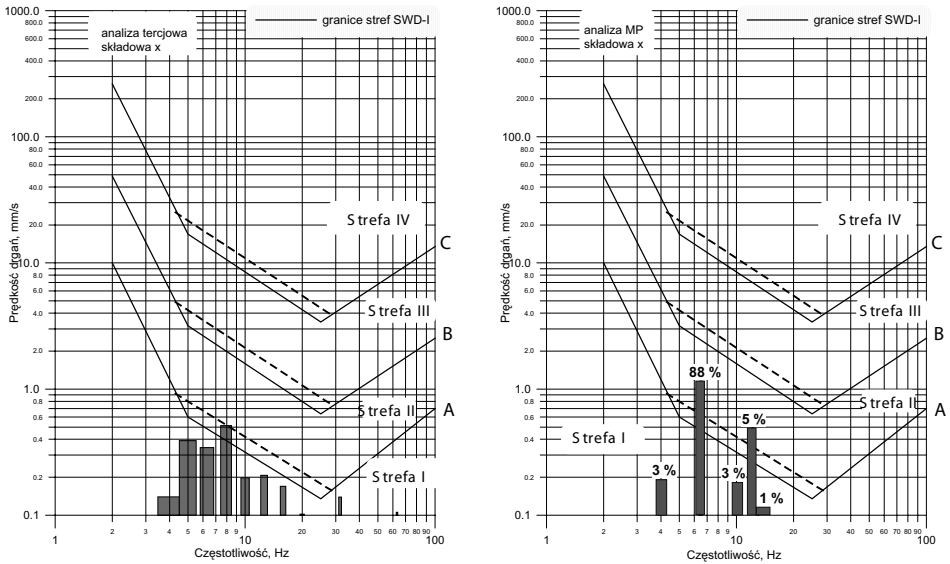


Rys. 11. Wynik analizy MP. a) przebiegi drgań oryginalny i zrekonstruowany;
b) wynik analizy czasowo-częstotliwościowej przebiegu drgań — mapa Wignera,
c) wynik analizy czasowo-częstotliwościowej przebiegu drgań — obraz przestrzenny

Dla przykładu na rysunku 13 pokazano ocenę oddziaływania drgań przedstawionych na
rysunku 11, z zastosowaniem metody bezpośredniej (rys. 13a), metody pośredniej (rys. 13b)
i metody z wykorzystaniem algorytmu MP (rys. 13c).

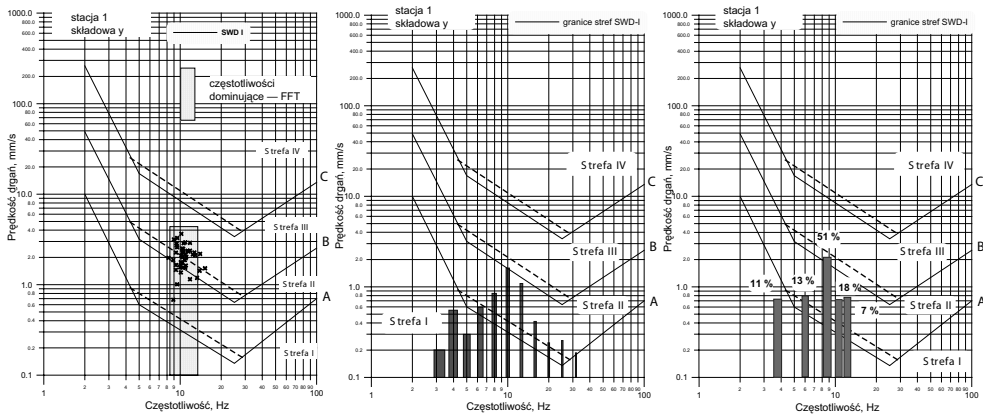
Z rysunku 13 wynika, że metoda bezpośrednia zdecydowanie zawyża ocenę oddzia-
łania drgań, natomiast metoda pośrednia i MP wykazują duże podobieństwo, ale jednocze-
śnie wyraźnie widać, że metoda MP ogranicza częstotliwości składowe drgań do zakresu
od 4 do 12 Hz, a metoda pośrednia od 3 do 30 Hz. Metoda MP wskazuje 50% procentowy
udział drgań o częstotliwości 9 Hz, a metoda pośrednia nie wykazuje takiej informacji
w ogóle, wskazując szereg innych częstotliwości o zbliżonym oddziaływaniu. Informacja
o energetycznym udziale poszczególnych częstotliwości w całym sygnale jest bardzo waż-
ną zaletą metody MP, a wynika to z faktu, że algorytm ten zawsze analizuje i dopasowuje
kolejne atomy Gabora umniejszając przebieg oryginalny o energię już wyjaśnioną. W prze-

ciwieństwie do MP filtracji tercjowej poddawany jest ten sam przebieg, czyli obliczenie energii drgań o częstotliwości w konkretnych paśmie tercjowym było by kilkakrotnym liczeniem energii tego samego sygnału.



Rys. 12. Porównanie analizy tercjowej i algorytmu dopasowania krokowego

Zastosowanie analizy tercjowej do oceny oddziaływania drgań na obiekty nie uwzględnia energetycznego udziału poszczególnych częstotliwości składowych. Natomiast analiza *Matching Pursuit* uwzględnia zarówno czas oddziaływania jak i energetyczny udział poszczególnych atomów w budowie obrazu drgań.



Rys. 13. Ocena oddziaływania drgań na obiekt budowlany z zastosowaniem różnych metod analizy drgań: a) metoda bezpośrednia, b) metoda pośrednia, c) metoda z wykorzystaniem algorytmu MP

9. Podsumowanie

Identyfikacja (rozpoznanie) struktury drgań wzbudzanych robotami strzałowymi w górnictwie odkrywkowym jest podstawą do oceny ich oddziaływania na otoczenie, jak również pozwala na skuteczne poszukiwanie rozwiązań minimalizujących możliwe zagrożenia. Wiele dotychczasowych metod prowadzenia analizy w istotnym stopniu były ograniczane przez jednowymiarowe traktowanie zjawiska — badanie drgań albo w dziedzinie czasu albo w dziedzinie częstotliwości. Zastosowanie do obliczeń metod czasowo-częstotliwościowych wyraźnie poprawia opis drgań — zarówno analiza falkowa jak i *Matching Pursuit* identyfikują złożoną strukturę sygnałów impulsowych z uwzględnieniem czasu trwania i energii poszczególnych składników.

Należy podkreślić szczególną przydatność metody MP, a możliwość zastosowania wyników tej analizy do oceny stopnia oddziaływania robót strzałowych na otoczenie powinna być przedmiotem szczegółowych badań, które pozwolą na podniesienie precyzji i wiarygodności ocen.

LITERATURA

- [1] *Dubiński J., Mutke G., Jaśkiewicz K., Lurka A.*: Weryfikacja skali GSI-2004 do oceny skutków drgań wywołanych wstrząsami górnictwymi w obszarze LGOM. Warsztaty Górnicze 2006 z cyklu „Zagrożenia naturalne w górnictwie”. Kraków 2006
- [2] *Durka P.J.*: Między czasem a częstością: elementy współczesnej analizy sygnałów. 1999
- [3] *Mallat S., Zhang Z.*: Matching Pursuit with Time-frequency Dictionaries. IEEE Transactions on Signal Processing. 1993
- [4] PN-B-02170:1985 — Ocena szkodliwości drgań przekazywanych przez podłoże na budynki.
- [5] *Tarlov A.*: Systemy przetwarzania sygnałów. Analiza falkowa. Materiały dydaktyczne. Politechnika Szczecińska 2007
- [6] *Winzer J.*: Wpływ opóźnień milisekundowych przy prowadzeniu strzelań eksploatacyjnych na częstotliwościowe charakterystyki drgań gruntu i budynków na przykładzie złoża gipsu. Praca doktorska, Wydział Górnictwa i Geoinżynierii AGH, Kraków 2003
- [7] *Winzer J., Sieradzki J., Soltys A.*: Dokumentowanie oddziaływania robót strzałowych na otoczenie kopalń odkrywkowych. Bezpieczeństwo Pracy i Ochrona Środowiska w Górnictwie 4/2008. Katowice 2008