

dr inż. ALEKSANDER CIANCIARA
Akademia Górniczo-Hutnicza
Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska
dr inż. ZBIGNIEW ISAKOW
Centrum Elektryfikacji i Automatykacji Górnictwa EMAG

Modele sygnałów drgań rejestrowanych na powierzchni ziemi

W artykule przedstawiono modele opisujące rejestrowane na powierzchni ziemi sygnały drgań, wywołane wstrząsami górniczymi. Modele opracowano w dziedzinie czasu oraz w dziedzinie widmowej. Umożliwiają one estymację parametrów opisujących drgania w ogólnym przypadku, nawet wówczas, gdy drgania mają skomplikowaną budowę i probabilistyczny charakter. Parametry opisujące drgania są wykorzystywane do oceny szkodliwego oddziaływania drgań na powierzchni ziemi.

1. WPROWADZENIE

Rejestrowane na powierzchni ziemi drgania, wywołane wstrząsami górniczymi, mają strukturę stochastyczną, co wykazano między innymi w publikacji (Cianciara 1998). Interpretacja tego typu danych pomiarowych może być prowadzona jedynie wówczas, gdy znane są modele, które opisują te dane. Bardzo często interpretacja sprowadza się do oceny określonych parametrów. Wtedy modele powinny precyzować charakterystykę statystyczną danych pomiarowych, oraz opisywać ich powiązanie z tymi parametrami. Modele takie powinny być opracowywane na podstawie parametrów, które spełniają określone zadania w rozwiązywanym zagadnieniu. Rozwiązując zagadnienie oceny oddziaływania wstrząsów górniczych na obiekty budowlane i infrastrukturę powinno się dobrać takie parametry, które we właściwy sposób charakteryzują szkodliwość, wywołanych tymi wstrząsami drgań. Ich wartości mogą stanowić wskaźniki odnoszone do odpowiednich norm czy też skal, celem oceny stopnia szkodliwości drgań. Parametry te wykorzystywane są również do opracowania zależności statystycznej wiążącej je z parametrami wstrząsów. Zależność taka umożliwia ocenę szkodliwości drgań w dowolnym miejscu obszaru górniczego, gdy znana jest energia i współ-

rzędne źródeł wstrząsów. Stanowi ona również podstawę do opracowywania wszelkiego typu prognoz oddziaływania drgań wywołanych wstrząsami na powierzchnię ziemi.

W artykule zaproponowano koncepcję określania parametrów opisujących drgania, opartą na teoretycznej analizie sposobu oddziaływania drgań na dowolne obiekty. Oddziaływanie takie można wyrazić analitycznie w formie liniowego układu dynamicznego, w którym drgania powierzchni, wywołane wstrząsami, stanowią element wymuszający, (Dowding 1985). Wyniki analizy wskazują, że podstawowymi parametrami wykorzystywanymi do oceny szkodliwości drgań są: wartości maksymalnych amplitud drgań A_M , współczynniki tłumienia amplitud α , oraz częstotliwości rezonansowe f_0 , (Cianciara i inni, 2005, a). Czasy trwania drgań τ mogą być wyznaczone na podstawie współczynnika tłumienia α , ponieważ są one z nim powiązane zależnością $\tau = k/\alpha$, gdzie: k jest liczbą zależną od przyjętego poziomu progowego detekcji czasu zakończenia sygnału (Cianciara i inni 2005, b). Należy nadmienić, że sygnały drgań mogą zawierać kilka częstotliwości rezonansowych. Przykład takiego sygnału został zamieszczony w tekście, a jego widmo zilustrowano na rys (3.2). Podstawowe parametry opisujące drgania wyznaczone są na drodze analizy statystycznej zarejestrowanych na powierzchni ziemi

sygnałów drgań. Zwykle rejestrowane drgania zawierają wysoki poziom szumu i zakłóceń losowych. Z tego powodu kluczowym zagadnieniem jest opracowanie modeli opisujących rejestrowane na powierzchni ziemi sygnały drgań. Modele te opisują powiązanie przedstawionych wyżej parametrów, charakteryzujących szkodliwość drgań, z danymi pomiarowymi. Z wykorzystaniem opracowanych modeli prowadzona jest estymacja omawianych parametrów. Modele te zostały opracowane na podstawie długoletnich badań prowadzonych w różnych warunkach geologiczno-górnictwa. W artykule przedstawiono ich wersję, która opisuje sygnały drgań w dziedzinie czasu oraz w dziedzinie widmowej. Dzięki temu, estymacja parametrów może być realizowana niezależnie w obu dziedzinach, a jej wyniki są porównywalne wówczas, gdy analizowane drgania są proste, czyli mają jedną częstotliwość rezonansową. Natomiast, gdy drgania posiadają kilka częstotliwości rezonansowych (np. dwie lub więcej), wtedy poprawna ocena parametrów może być prowadzona jedynie w dziedzinie widmowej, ponieważ w dziedzinie czasu jest ona niemożliwa. Do uzyskiwania efektywnych ocen omawianych estymatorów niezbędna jest również znajomość charakterystyki statystycznej szumu i zakłóceń. Przyjmuje się zazwyczaj, że zakłócenia nie są skorelowane z sygnałami, a szumy i ewentualne odchyłki mają rozkład statystyczny normalny. Można wówczas, do uzyskiwania estymatorów parametrów A_M oraz α , stosować powszechnie znaną uogólnioną metodę najmniejszych kwadratów, która minimalizuje wariancję czynnika losowego. Należy podkreślić, że wartości parametru A_M nie powinno się pobierać bezpośrednio z danych pomiarowych, czyli przyjmować maksymalną amplitudę zarejestrowaną A_{MAX} , co jest powszechnie praktykowane, lecz wyznaczać jego wartość na drodze estymacji w dziedzinie czasu lub w dziedzinie widmowej, wykorzystując odpowiednie modele i kryteria. Podobnie należy oceniać parametr α .

W trakcie prowadzonych badań zaobserwowano, że sygnały drgań rejestrowane w strefie epicentralnej zawierają składnik o wysokiej amplitudzie maksymalnej (w warunkach kopalń rud miedzi przekraczającej nawet 1000 mm/s^2) i bardzo krótkim czasie trwania, rzędu kilkudziesięciu milisekund. Czynniki ten bardzo szybko zanika wraz z oddalaniem się od strefy epicentralnej. Analizując znaczenie tego czynnika okazuje się, że jego wpływ na szkodliwość drgań stanowi mały udział w ogólnej ocenie skutków. Zastosowanie analizy, a konkretnie estymacji oceny szkodliwości, opartej na wykorzystaniu opracowanego modelu, w praktyce znacznie zmniejsza udział tego czynnika w ocenie maksymalnej wartości ampli-

tudy drgań A_M . Stwierdzenie to zostało uzasadnione w tekście, a wynik zilustrowano na zamieszczonych rysunkach (2.1) oraz (2.2).

Ze względów praktycznych istnieje konieczność oceny wpływu drgań wywołanych wstrząsami, oraz ich prognozowania w dowolnym miejscu obszarów górniczych. Rejestracje drgań z konieczności mogą być prowadzone w nielicznych, odpowiednio wybranych punktach tych obszarów. W celu oceny wpływu drgań na całym obszarze górniczym i opracowania prognozy niezbędne jest opracowanie zależności pomiędzy parametrami drgań a parametrami opisującymi wstrząsy górnicze, takimi jak: energia lub moment sejsmiczny, promień epicentralny lub hipocentralny. Ze względu na znaczny udział czynnika losowego zależności mają charakter statystyczny. Parametry drgań, których wartości oceniane są na podstawie przedstawionych w artykule sposobów estymacji, umożliwiają opracowanie zależności charakteryzujących się minimalną dyspersją.

2. MODEL OPISUJĄCY SYGNAŁY DRGAŃ W DZIEDZINIE CZASU

Analiza sygnałów prowadzona jest na podstawie reprezentacji dyskretnych, przedstawianych w formie skończonych ciągów liczbowych. Rozważane tutaj sygnały i dane pomiarowe próbkowane są z krokiem Δ , a kolejne wartości próbek indeksowane są liczbami naturalnymi t , natomiast odpowiadające im chwile $t = t \cdot \Delta$, (Oppenheim, Schaffer, 1979).

Na wstępie przyjęto upraszczające założenie, że drgania wywołane wstrząsami górniczymi charakteryzują się jedną częstotliwością rezonansową f_0 . Rejestrowane na powierzchni ziemi ciągi pomiarowe o długości N , $\{x_t\}$ ($t = 0, 1, \dots, N-1$), zawierają sygnał użyteczny $\{s_t\}$, oraz określony poziom czynnika losowego w postaci szumu nieskorelowanego. Przyjęto, co jest zgodne z zasadami teorii sygnałów (Franks 1975), że każdy przebieg, a w szczególności sygnał użyteczny $\{s_t\}$, można przedstawić w formie iloczynu obwiedni $\{\rho_t\}$ i czynnika oscylacyjnego $\{\zeta_t\}$, a mianowicie:

$$s_t = \rho_t \cdot \zeta_t \quad (2.1)$$

Podobnemu przekształceniu można poddać sygnał $\{x_t\}$ reprezentujący dane pomiarowe, przy czym jego obwiednia $\{r_t\}$ jest powiązana z obwiednią sygnału użytecznego $\{\rho_t\}$ następującą zależnością:

$$r_t = \rho_t \cdot e^{\varepsilon_t}, \quad (2.2)$$

gdzie: ε_t są odchyłkami losowymi.

Obwiednia jest definiowana jako moduł sygnału analitycznego, czyli:

$$r_t = |x_t^A|, \quad (2.3)$$

gdzie: x_t^A jest wartością zespoloną $x_t^A = x_t + ix_t^H$, której część urojona x_t^H stanowi transformatę Hilberta części rzeczywistej x_t , (Franks 1975). W ogólnym przypadku obwiednia przyjmuje wartości rzeczywiste nieujemne $r_t \geq 0$, co wynika z jej definicji w formie (2.3). Poddając ją odpowiedniej filtracji wygładzającej uzyskujemy jej ocenę \hat{r}_t , która spełnia warunek $\hat{r}_t > 0$. Pozwala to na wyznaczenie składnika oscylacyjnego ζ_t w formie ilorazu $\zeta_t = x_t / \hat{r}_t$. W omawianym tutaj sposobie przetwarzania wykorzystywana jest jedynie obwiednia, natomiast analiza składnika oscylacyjnego wybiega poza zakres tej pracy.

Prowadząc długoletnie badania oddziaływań wstrząsów rejestrowanych na powierzchni ziemi w różnych warunkach geologiczno-górnictwowych stwierdzono, że obwiednię $\{\rho_t\}$ sygnału $\{s_t\}$ można przedstawić następująco:

$$\rho_t = A_M \cdot e^{-\alpha(t-t_0)} \quad \text{dla } t > t_0, \quad (2.4)$$

gdzie: t_0 jest momentem początku sygnału s_t , natomiast α stanowi parametr opisujący tłumienie amplitud.

Po uwzględnieniu zależności (2.2), model wygładzonej obwiedni rejestrowanych drgań $\{\hat{r}_t\}$ przyjmuje postać:

$$\hat{r}_t = A_M \cdot e^{-\alpha(t-t_0)} \cdot e^{\varepsilon_t} \quad (2.5)$$

Ponieważ $\hat{r}_t > 0$, dlatego model (2.5) może być sprowadzony do formy liniowej przez logarytmowanie.

$$\ln \hat{r}_t = \ln A_M - \alpha \cdot (t - t_0) + \varepsilon_t \quad (t=0,1,\dots,N-1) \quad (2.6)$$

Zakładając, że odchyłki ε_t posiadają rozkład normalny $N(0, \sigma_\varepsilon)$ wówczas model powyższy umożliwia estymację parametrów A_M i α , stosując powszechnie znaną zasadę najmniejszych kwadratów, która minimalizuje wariancję czynnika losowego $\sigma_\varepsilon^2 = E[\varepsilon_t^2]$ (Lehmann, 1991).

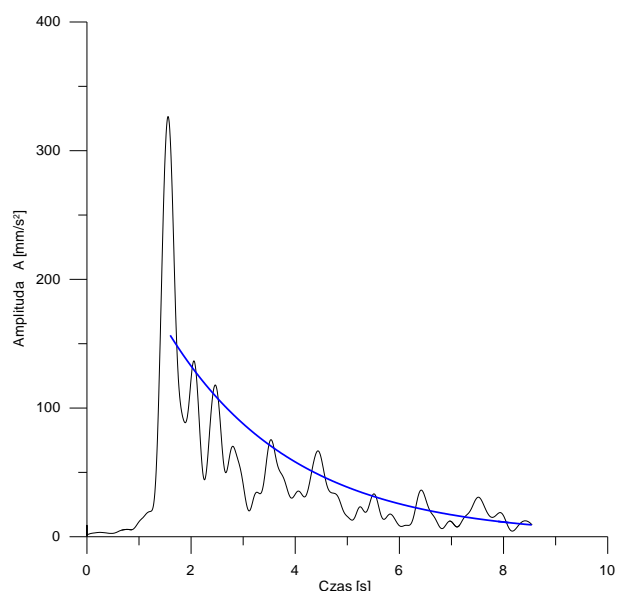
Estymatory parametrów \hat{A}_M oraz $\hat{\alpha}$ wyznacza się rozwiązując odpowiedni układ równań normalnych. Estymowane tym sposobem parametry stanowią właściwą ocenę wartości maksymalnej amplitudy sygnału drgań oraz współczynnika tłumienia amplitud.

Na rysunku (2.1) przedstawiono przykład ilustrujący porównanie obwiedni empirycznej z przebiegiem estymowanym metodą NK, natomiast na rysunku (2.2) zilustrowano przykłady obrazujące przebiegi obwiedni estymowanych metodą NK na tle sygnałów drgań. Przyjęcie powyższego sposobu modelowania daje możliwość oceny czasu trwania drgań $\hat{\tau}$ na podstawie estymatora $\hat{\alpha}$, czyli:

$$\hat{\tau} = \frac{k}{\hat{\alpha}}, \quad (2.7)$$

gdzie: k jest współczynnikiem zależnym od przyjętego poziomu dyskryminacji.

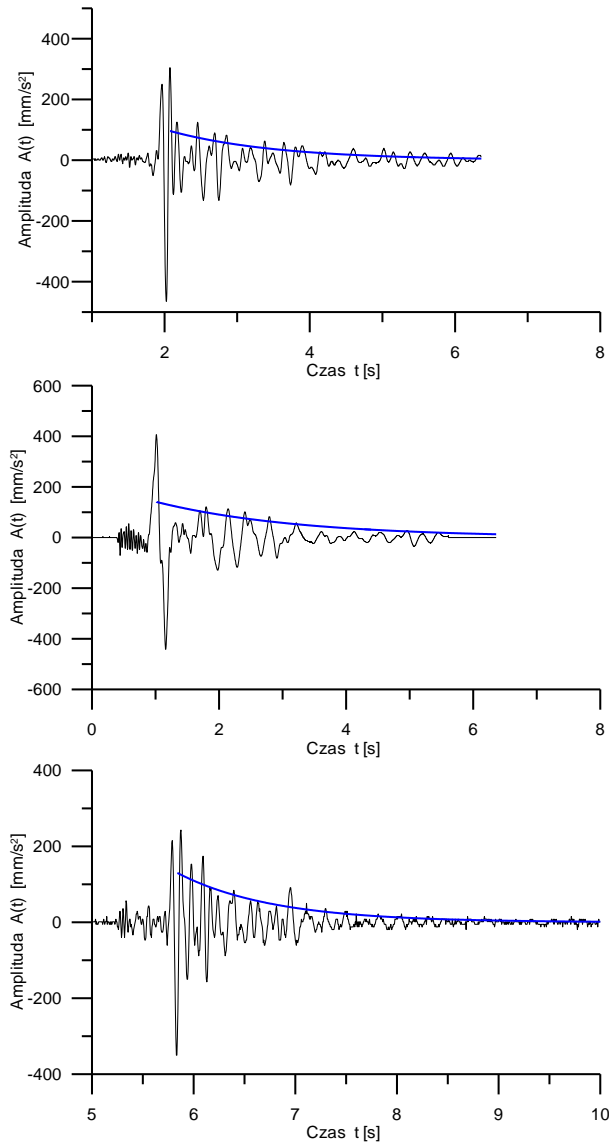
Wynika stąd, że z punktu widzenia oceny stopnia szkodliwości drgań obydwa te parametry, tzn. czas trwania drgań τ oraz współczynnik tłumienia amplitud α są równoważne.



Rys. 2.1. Przykład ilustrujący porównanie przebiegu obwiedni empirycznej z modelem estymowanym metodą NK

Również bardzo istotnym parametrem opisującym szkodliwość drgań jest częstotliwość rezonansowa f_0 . Z reguły estymacja tego parametru prowadzona jest na podstawie modelu sygnału drgań w dziedzinie widmowej. W przypadku, gdy drgania posiadają tylko jedną częstotliwość rezonansową, wówczas parametr ten można oceniać w dziedzinie czasu, na drodze analizy statystycznej przejść przez zero składowej oscylacyjnej ζ_t , $t > t_0$. Wówczas estymator tego parametru przyjmuje wartość $\hat{f}_0 = \frac{1}{2\hat{d}}$, gdzie:

\hat{d} jest wartością oczekiwaną odstępów czasu pomiędzy kolejnymi przejściami przez poziom zerowy składowej ζ_t .



Rys. 2.2. Przykłady ilustrujące przebiegi obwiedni sygnałów drgań estymowanych metodą NK

3. MODEL SYGNAŁÓW DRGAŃ W DZIEDZINIE WIDMOWEJ

Dla przejrzystości zapisu, zgodnie z zasadą, że analiza prowadzona jest w układzie dyskretnym, kolejne próbki reprezentacji widmowej sygnałów indeksowane są wskaźnikiem f . Należy nadmienić, że wartości częstotliwości f dla poszczególnych próbek wynoszą

$$f = \frac{f}{N \cdot \Delta_f}, \text{ gdzie: } \Delta \text{ krok próbkowania w dziedzinie}$$

czasu, N długość ciągu danych pomiarowych.

Z uwagi na to, że przejście do dziedziny widmowej dokonuje się za pomocą „dyskretnej transformacji Fouriera” (DTF), stosując procedurę tzw. „szybkiej transformacji Fouriera” (FFT), dlatego długość ciągu

danych pomiarowych powinna wynosić $N = 2^K$ (K liczba naturalna), np. $N = 2048$, (Gold, Rader 1969). Ogólny model sygnału drgań w dziedzinie widmowej otrzymujemy poddając transformacji DTF zależność (2.1). Wówczas, widmo drgań $\{X_f\}$ wyraża się w formie splotu cyklicznego widma obwiedni $\{R_f\}$ z widmem czynnika oscylacyjnego $\{\Lambda_f\}$, co można zapisać następująco:

$$\{X_f\} = \{R_f\} * \{\Lambda_f\} \quad (3.1)$$

Formuła (3.1) jest symbolicznym zapisem splotu cyklicznego, w którym:

$$X_f = \sum_{l=0}^{N-1} R_l \cdot \Lambda_{((f-l))^N} \quad (3.2)$$

Symbol $((s))^N$ oznacza „ s modulo N ”, czyli reszta z dzielenia całkowitego liczby s przez N , (Gold, Rader 1969). Można wykazać, że w przypadku omawianych drgań o jednej częstotliwości rezonansowej f_0 widmo amplitudowe $|X_f|$ wyraża się następująco:

$$|X_f| = |R_{f-f_0}| \cdot e^{\epsilon_f} \quad (3.3)$$

Ponieważ omawiane drgania posiadają strukturę stochastyczną, dlatego ich reprezentacja widmowa powinna być wyrażana w formie gęstości spektralnej G_f , (Wong, 1976). Zależność opisująca omawianą gęstość spektralną G_f wyraża się następująco, (Bendat, Piersol, 1976):

$$G_f = |R_{f-f_0}|^2 \quad (3.4)$$

Przyjmując, iż słuszna jest zależność (2.4) opisująca obwiednie sygnałów drgań, wówczas model gęstości widmowej można przedstawić następująco (Wentzell, 1980):

$$G_f = \frac{A_M}{\alpha^2 + 4\pi^2(f - f_0)^2} \quad (3.5)$$

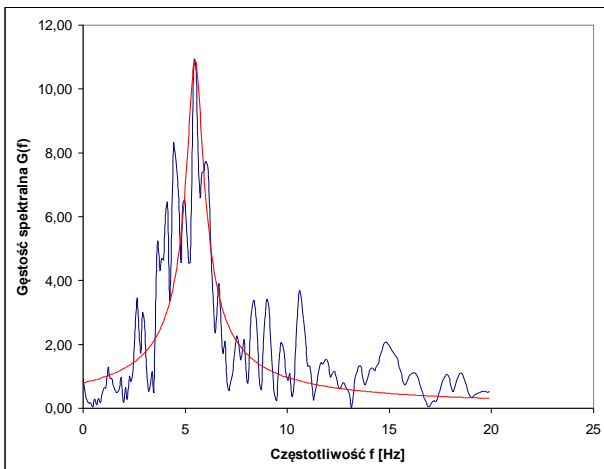
gdzie: parametry A_M , α , f_0 , opisują odpowiednio amplitudę maksymalną, współczynnik tłumienia, oraz częstotliwość rezonansową.

Jej estymator można uzyskiwać na podstawie zależności (3.2) minimalizując sumę kwadratów odchylek pomiędzy logarytmem widma mocy sygnałów drgań $|X_f|$ a logarytmem kwadratu widma obwiedni

$|R_f|^2$. W praktyce, bardzo często estymator gęstości spektralnej \hat{G}_f uzyskuje się na drodze odpowiedniego wygładzania (filtracji) widma mocy ciągu pomiarowego. Estymacja parametrów opisujących drgania może być prowadzona w dziedzinie widmowej. W przypadku, gdy drgania posiadają jedną częstotliwość rezonansową, wówczas wyestymowane wartości parametrów w jednej i w drugiej dziedzinie pokrywają się. Wartości omawianych parametrów ocenia się na podstawie estymatora gęstości spektralnej \hat{G}_f . I tak \hat{f}_0 jako współrzędną jej maksimum, czyli: $\hat{f}_0 := \{f : \hat{G}_f = \hat{G}_{MAX}\}$. Estymator parametru $\hat{\alpha}$ wyznacza się na podstawie pola P_G pod krzywą \hat{G}_f , następująco: $\hat{\alpha} = \frac{P_G}{\hat{G}_{f_0}}$. Natomiast wartość estymatora

parametru \hat{A}_M wynosi: $\hat{A}_M^2 = \frac{\hat{G}_{f_0}}{\hat{\alpha}}$

Na rysunku (3.1) zamieszczono przykład ilustrujący przebieg estymatora gęstości spektralnej, o jednej częstotliwości rezonansowej f_0 , na tle kwadratu widma amplitudowego, czyli widma mocy zarejestrowanego sygnału drgań.



Rys. 3.1. Przykład ilustrujący przebieg gęstości spektralnej o jednej częstotliwości rezonansowej, na tle widma mocy sygnału drgań

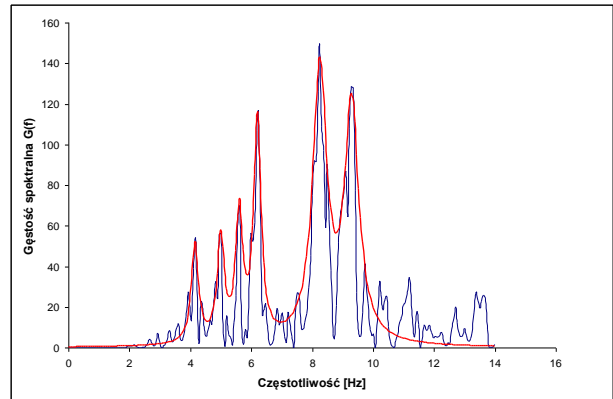
W praktyce często występują przypadki, w których ma miejsce interferencja drgań o kilku różnych częstotliwościach rezonansowych, wówczas model gęstości spektralnej jest następujący (Franks, 1975):

$$G_f = \sum_{k=1}^K \frac{A_{M,k}}{\alpha_k^2 + 4\pi^2(f - f_{0,k})^2} \quad (3.6)$$

gdzie: $A_{M,k}$, α_k , $f_{0,k}$ ($k = 1, \dots, K$) odpowiednio amplitudy maksymalne, współczynniki tłumienia, oraz

częstotliwości rezonansowe poszczególnych składników sygnału drgań, K liczba składników.

Na rysunku (3.2) przedstawiono przykład ilustrujący przebieg gęstości spektralnej drgań, w skład których wchodzi kilka składników o różnych częstotliwościach rezonansowych.



Rys. 3.2. Przykład ilustrujący przebieg gęstości spektralnej o kilku częstotliwościach rezonansowych, na tle widma mocy sygnału drgań

W przypadku, gdy drgania zawierają kilka częstotliwości rezonansowych, wówczas estymacja parametrów w dziedzinie czasu jest właściwie niemożliwa. W tym przypadku powinno się głównie bazować na ocenach parametrów w dziedzinie widmowej. W pierwszej kolejności estymowane są częstotliwości rezonansowe $f_{0,k}$, dalej współczynniki tłumienia α_k , a następnie maksymalne amplitudy $A_{M,k}$, gdzie: $k = 1, \dots, K$. Częstotliwości $f_{0,k}$ oceniane są jako współrzędne f , dla których lokalnie gęstość spektralna sygnałów drgań \hat{G}_f przyjmuje wartości maksymalne $\hat{G}_{MAX,k}$, czyli: $f_{0,k} := \{f : \hat{G}_f = \hat{G}_{MAX,k}\}$. Estymatory parametru opisującego współczynniki tłumienia $\hat{\alpha}_k$ wyznacza się na podstawie pola $P_{G,k}$ pod krzywą \hat{G}_f w poszczególnych zakresach widmowych $\Delta f_k = [f_{k-1}, f_k]$, następująco: $\hat{\alpha}_k = \frac{P_{G,k}}{\hat{G}_{f_{0,k}}}$.

Natomiast estymatory parametrów $\hat{A}_{M,k}$ wynoszą:

$$\hat{A}_{M,k}^2 = \frac{\hat{G}_{f_{0,k}}}{\hat{\alpha}_k}$$

Należy dodać, że częstotliwości rezonansowe $f_{0,k}$ mogą być również oceniane jako środki ciężkości estymatora gęstości spektralnej w poszczególnych zakresach częstotliwości, jednak estymator ten w niektórych przypadkach może posiadać nieznaczące obciążenie (Bartoszewicz, 1989).

PODSUMOWANIE

W artykule przedstawiono proponowane rozwiązania w zakresie sposobów oceny parametrów drgań rejestrowanych na powierzchni ziemi, które są wywołane wstrząsami górnictwymi. Rozważane tutaj parametry charakteryzują drgania pod względem ich szkodliwego oddziaływania na obiekty budowlane oraz infrastrukturę. Dobór tych parametrów ustalany jest na podstawie analizy sposobu oddziaływania drgań na te obiekty (Cianciara i inni 2005, a). Rejestrowane drgania zawierają znaczny poziom czynnika losowego, dlatego ich wartości liczbowe oceniane są na drodze analizy statystycznej ciągów pomiarowych, wykorzystując model wiążący te parametry z danymi pomiarowymi. Opracowane modele mają kluczowe znaczenie w procesie estymacji omawianych parametrów. Opisują sygnały drgań w dziedzinie czasu oraz w dziedzinie widmowej. Umożliwiają opracowanie sposobów estymacji omawianych parametrów w ogólnym przypadku, nawet wówczas, gdy drgania mają skomplikowaną budowę. Jeżeli drgania posiadają jedną częstotliwość rezonansową, wówczas estymacja może być prowadzona na podstawie modeli niezależnie w obu dziedzinach, a jej wyniki są porównywalne. Natomiast, gdy drgania zawierają kilka częstotliwości rezonansowych, co w praktyce często występuje, wtedy estymacja parametrów w dziedzinie czasu jest niemożliwa i wówczas trzeba ją prowadzić w dziedzinie widmowej. Opracowane modele umożliwiają eliminację wielu czynników niekorzystnych zawartych w rejestrowanych ciągach pomiarowych. Jako przykład mogą posłużyć rejestracje wykonane w strefach epicentralnych wstrząsów, wówczas w ciągach pomiarowych występują składniki o bardzo wysokich amplitudach, niekiedy osiągających nawet wartości powyżej 1000 mm/s^2 , oraz o bardzo krótkich czasach trwania rzędu kilkunastu ms. Ich amplituda szybko zanika wraz z oddalaniem się od strefy epicentralnej. Składowe takie, ze względu na ocenę prowadzoną na podstawie maksymalnej amplitudy A_{MAX} zafałszowują sumaryczny obraz, ponieważ, jak wynika ze sposobu ich oddziaływania, mają one znikomy wpływ na szkodliwość drgań. Omawiane w artykule sposoby estymacji parametrów w znacznym stopniu eliminują wpływy tego czynnika, jak to przedstawiono na rysunku (2.2). Wartości przedstawionych w artykule parametrów odnoszone do odpowiednich norm, czy też skal, umożliwiają ocenę stopnia szkodliwości drgań. Jednak ocena ta odnosi się do miejsc, w których prowadzona była rejestracja drgań. W praktyce zachodzi jednak potrzeba oceny stopnia szkodliwości drgań, wywołanych wstrząsami, w dowolnych miejscach obszarów górnictwowych. W tym celu konieczna jest ekstrapolacja ocenianych wartości parametrów poza punkty pomiarowe. Zagadnienie to rozwiązuje się, opracowując

zależności statystyczne łączące omawiane parametry z parametrami wstrząsów, czyli energią oraz promieniem epicentralnym czy też, hipocentralnym. Zależności takie są również konieczne w zagadnieniu prognozowania oddziaływania drgań, wywołanych wstrząsami, na powierzchnię obszarów górnictwowych. Aby opracować te zależności, należy dysponować odpowiednio liczebnymi zbiorami parametrów obydwu typów. Przedstawione w tej pracy estymatory parametrów drgań zapewniają wysoką efektywność omawianych zależności, czyli ich minimalną dyspersję.

Praca została wykonana w ramach:

- *badań statutowych Zakładu Informatyki w Naukach o Ziemi, Wydziału Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska AGH nr 11.11.140.144,*
- *projektu dofinansowywanego ze środków fundacji europejskiej Coal & Steel PRESIDENCE Prognozowanie i monitorowanie zagrożeń spowodowanych osiadaniem na obszarach kopalń węgla. (PREdiction and monitoring of SUBSIDENCE Hazards above Coal Mines).*

Literatura

1. *Bartoszewicz J.*, 1989: Wykłady ze statystyki matematycznej. PWN, Warszawa.
2. *Bendat, Julius S., Piersol, Allan G.*, 1976: Metody analizy i pomiaru sygnałów losowych. PWN Warszawa.
3. *Cianciara B.*, 1998: Wybrane zagadnienia oddziaływania wstrząsów górnictwowych na powierzchnię ziemi, Sympozja i Konferencje nr 32, Warsztaty 98, Kraków PAN.
4. *Cianciara, A., Cianciara, B., Isakow, Z.*, 2005, a: Problematyka opisu oddziaływania drgań, wywołanych wstrząsami, na powierzchnię Ziemi. Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa 2005, nr 2, s.15–38.
5. *Cianciara, A., Cianciara, B., Isakow, Z.*, 2005: Sposób oceny parametrów drgań gruntu w aspekcie ich oddziaływania na obiekty Warsztaty Górnictwa 2005: zagrożenia naturalne w górnictwie: [IX edycja]: Wyższy Urząd Górniczy. – Katowice: WUG, – (Bezpieczeństwo Pracy i Ochrona Środowiska w Górnictwie; nr 6). s. 41–43.
6. *Dowding Ch., H.*, 1985 Blast Vibration Monitoring and Control. PRENTICE-HALL, INC., Englewood Cliffs, NJ 07632.
7. *Franks L. E.*, 1975: Teoria sygnałów. PWN, Warszawa.
8. *Gold, B., Rader, C., M.*, 1969: Digital Processing of Signals. McGraw-Hill Book Company, Now York.
9. *Lehmann, E. L.*, 1991: Theory of Point Estimation. PWN Warszawa. (in Polish)
10. *Oppenheim, A. V., Schafer, R., W.*, 1979: Cyfrowe przetwarzanie sygnałów. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa.
11. *Wentzell, A., D.*, 1980: Wykłady z teorii procesów stochastycznych. PWN, Warszawa.
12. *Wong E.*, 1976: Procesy stochastyczne w teorii informacji i układach dynamicznych. WNT, Warszawa.

Recenzent: prof. dr hab. inż. Bogdan Cianciara