

Jan Walaszczyk, Stanisław Hachaj*, Andrzej Barnat**

ANALIZA SPEKTRALNA DRGAŃ BUDYNKU WYWOŁANYCH WSTRZĄSAMI GÓRNICZYMI

1. Wstęp

Proces podziemnej eksploatacji złóż (węgla kamiennego lub miedzi) związany jest z zaburzeniem równowagi górotworu. W szczególności prowadzenie eksploatacji w pobliżu uskoków prowadzi do naruszenia ciągłości górotworu i wiąże się z wyzwoleniem nagromadzonej w górotworze energii. Wywołana utratą stateczności fala sejsmiczna ma destrukcyjny wpływ na podziemne budowle górnicze i posadowione w pobliżu miejsca wystąpienia wstrząsu zabudowania na powierzchni. Prowadzone są rejestracje drgań budynkach usytuowanych w pobliżu kopalń (m.in. Mutke, Maciąg [7, 9]). Rejestrowane są zwykle wartości prędkości lub przyspieszeń elementów konstrukcji. Celowym staje się pytanie o wiarygodność rejestracji oraz o to czy ten sam wstrząs zarejestrowany na tym samym obiekcie jako prędkość (za pomocą geofonu) i jako przyspieszenie (za pomocą akceleratora) niesie tę samą informację. (Problem ten jest ciągle dyskutowany w środowisku inżynierów budownictwa i górnictwa zajmujących się problematyką szkód górniczych. Artykuł niniejszy traktujemy jako fragment tej dyskusji).

2. Analiza spektralna drgań budynku

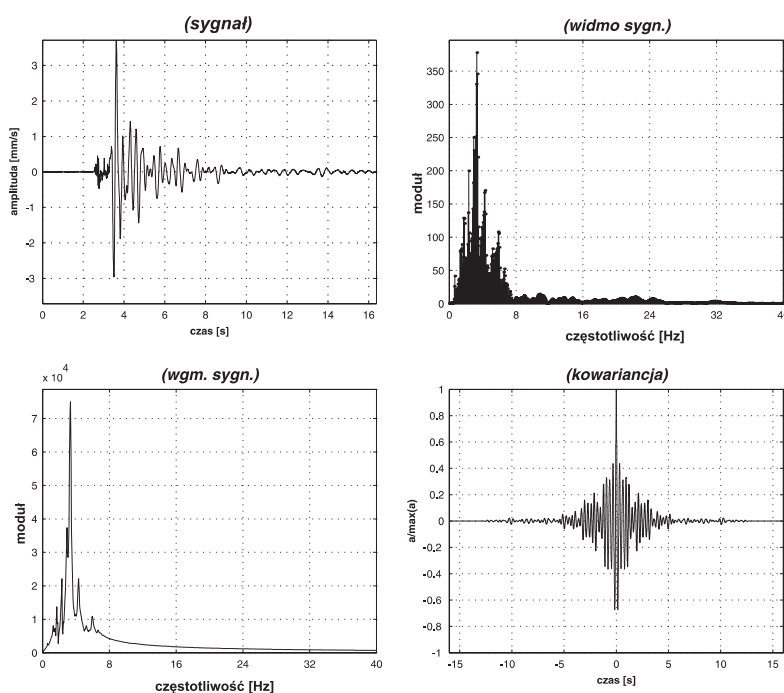
Na sformułowane we wstępie pytanie udzielono odpowiedzi dzięki udostępnionym przez Mutkego zapisom wstrząsów górotworu zarejestrowanych na akcelerometrze i geofonie umieszczonych na ścianie budynku obok siebie: wstrząs nr 1 z dnia 2003 maja 11 $E = 4,4E+06$ J, $X = 30\ 713$ $Y = 6426$ oraz wstrząs nr 2 z dnia 2004 stycznia 27 $E = 1,2E+08$ J, $X = 32\ 598$

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

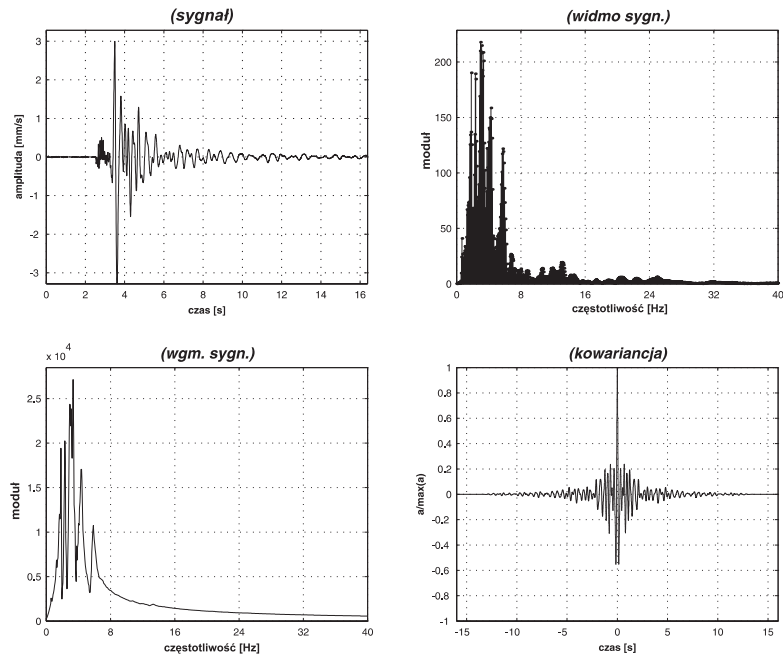
$Y = 5100$, próbkowanie w obydwu przypadkach $0,004 \text{ pr/s}$ (250 Hz). Przeprowadzono porównanie przyspieszeń rejestrowanych z wartościami przyspieszeń obliczonych z zarejestrowanych prędkości (różniczkowanie numeryczne z krokiem równym krokowi próbkowania). W tym celu wykonano analizę widma częstotliwościowego składowych kierunkowych (x y z) sygnałów; obliczono współczynnik gęstości mocy dla poszczególnych przebiegów oraz znormalizowaną autokowariancję [6]. Wyznaczono wartości przyspieszenia wypadkowego (pierwiastek z sumy kwadratów poszczególnych składowych kierunkowych). Dla wydzielonych z przyspieszeń pomierzonych i obliczonych (za pomocą dekompozycji falkowej [1–4, 6, 8]) pasm niskoczęstotliwościowych (aproksymacje) oraz pasm wysokoczęstotliwościowych (detale), obliczono statystyki podstawowe.

Wyniki przeprowadzonej analizy zarejestrowanych sygnałów obydwu wstrząsów są zamieszczone w pracy [10]. Tutaj ograniczymy się do pełnej analizy wstrząsu nr 1 (ograniczenie to wynika z wymogów redakcyjnych co do objętości artykułu, jakkolwiek we wnioskach końcowych braliśmy pod uwagę wyniki analizy wstrząsu numer 2).

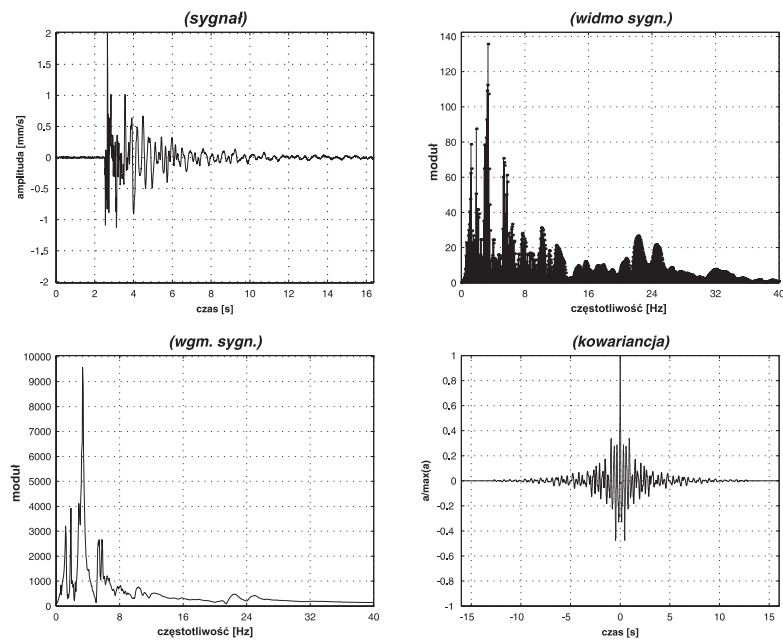
Rysunki 1–3 zawierają po cztery wykresy będące analizą spektralną kierunkowych składowych prędkości tego zarejestrowanego wstrząsu. Pierwszy wykres przedstawia zmienność amplitudy w czasie, wykres drugi widmo (spektrum) tego przebiegu. Zakres częstotliwości został ograniczony do przedziału $0\div 40 \text{ Hz}$. Wykres trzeci przedstawia współczynnik mocy dla podanego zakresu częstotliwości. Wykres czwarty jest obrazem autokowariancji sygnału.



Rys. 1. Prędkość pozioma w kierunku x (wstrząs nr 1)

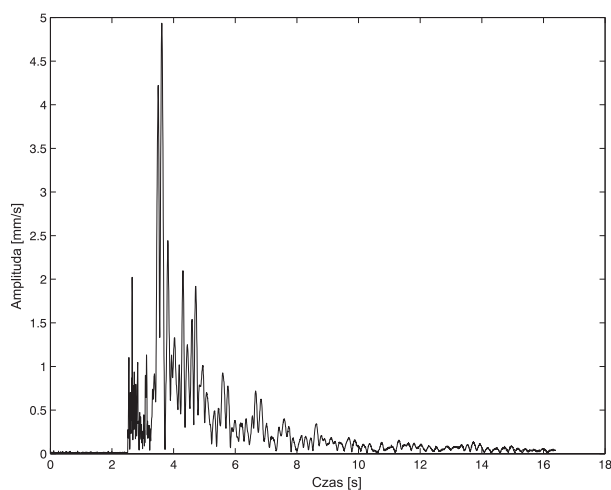


Rys. 2. Prędkość pozioma w kierunku y (wstrząs nr 1)

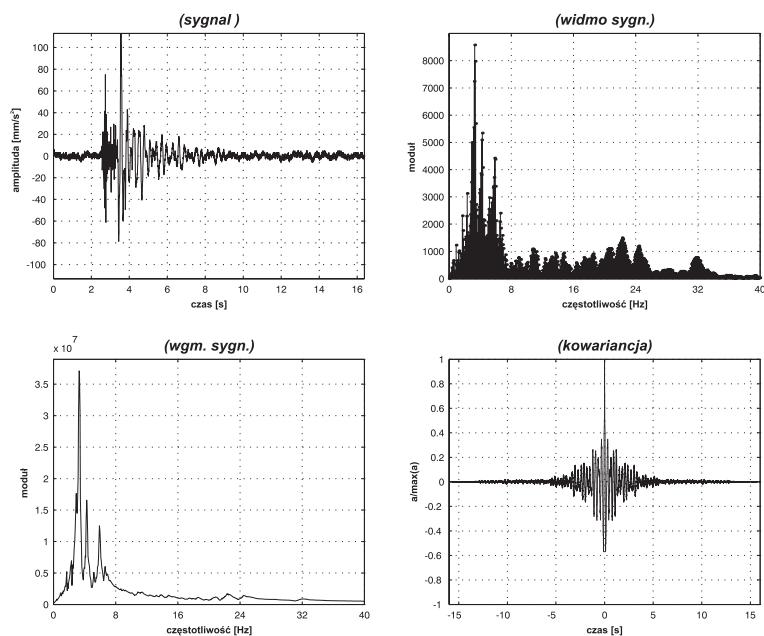


Rys. 3. Prędkość pionowa w kierunku z (wstrząs nr 1)

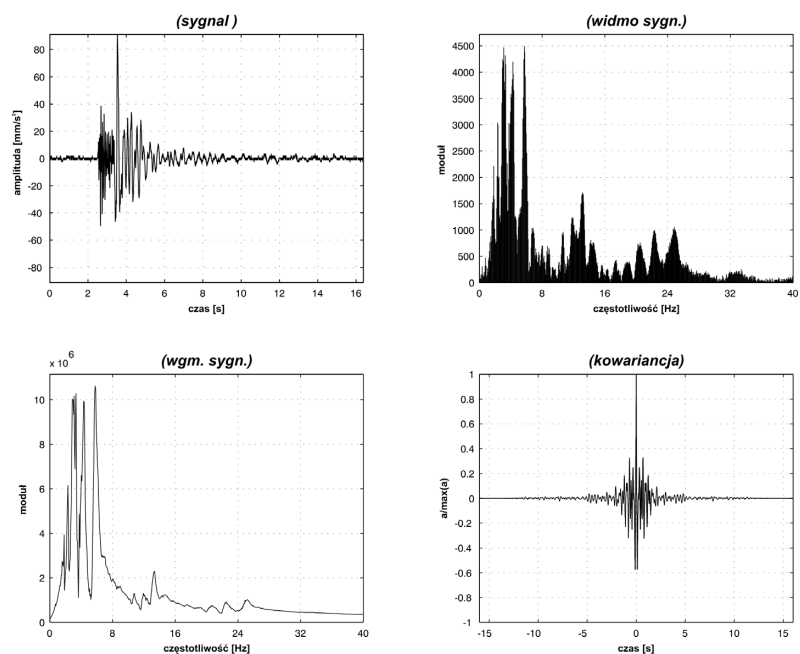
Rysunek 4 przedstawia amplitudę wypadkową dla zarejestrowanej prędkości wstrząsu nr 1. Rysunki 5–7 mają układ identyczny jak rysunki 1–2 i przedstawiają analizę spektralną zarejestrowanego przyspieszenia dla wstrząsu nr 1.



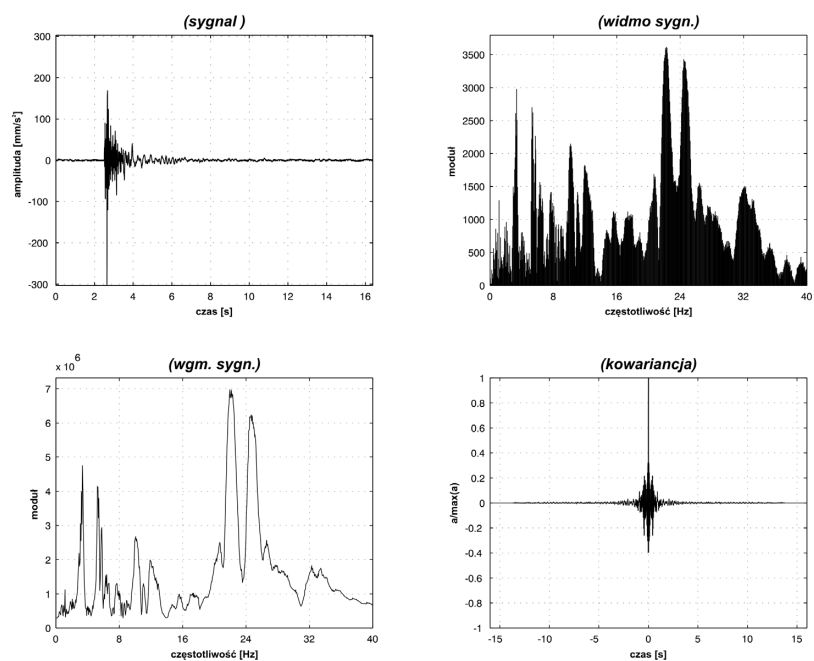
Rys. 4. Prędkość wypadkowa (wstrząs nr 1)



Rys. 5. Przyspieszenie poziome w kierunku x (wstrząs nr 1)

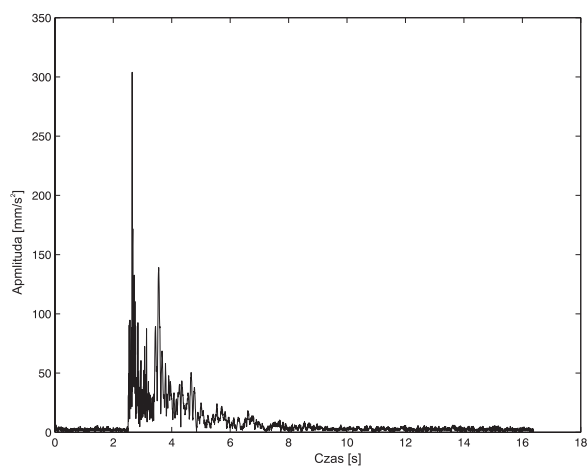


Rys. 6. Przyspieszenie poziome w kierunku y (wstrząs nr 1)

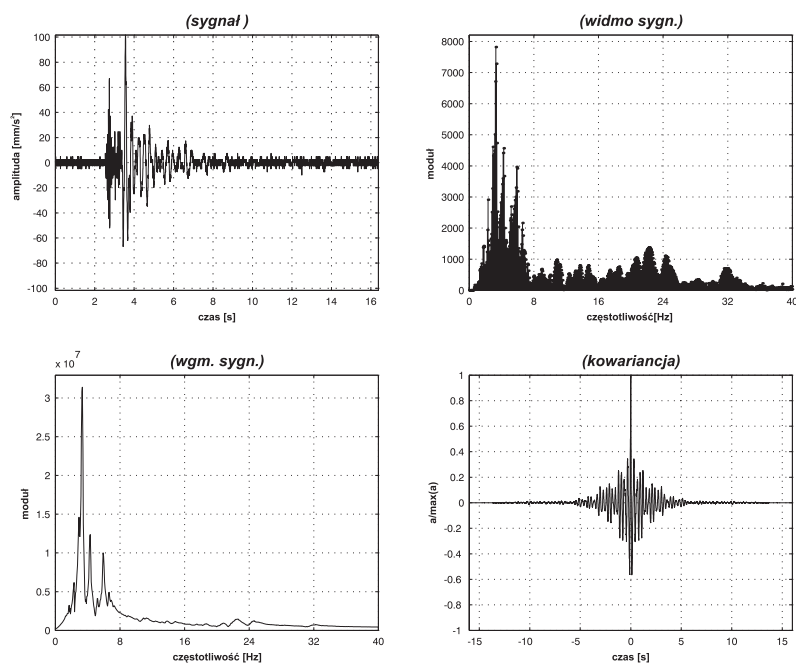


Rys. 7. Przyspieszenie pionowe w kierunku z (wstrząs nr 1)

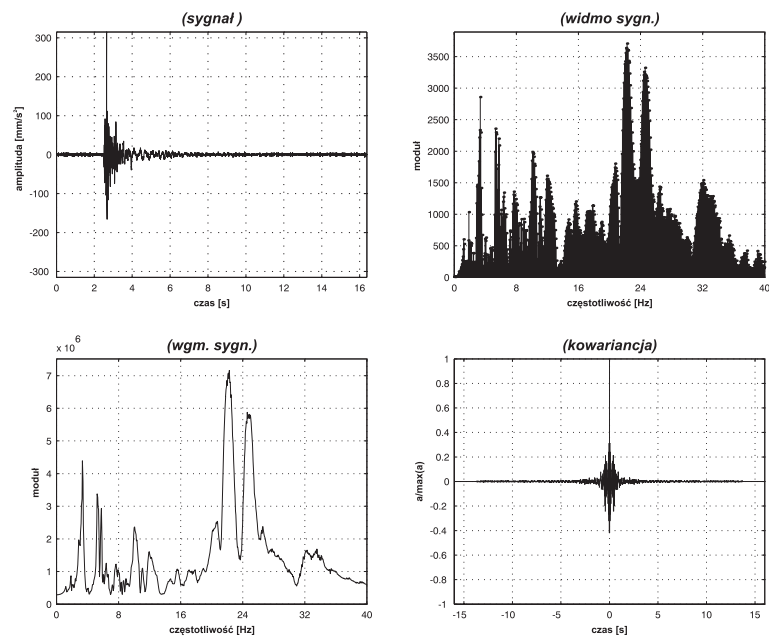
Rysunek 8 jest wykresem przyspieszenia wypadkowego tego wstrząsu. Rysunki 9–11 przedstawiają analizę spektralną przyspieszeń kierunkowych obliczonych przez zróżniczkowanie (numeryczne) zarejestrowanych wartości prędkości dla wstrząsu nr 1.



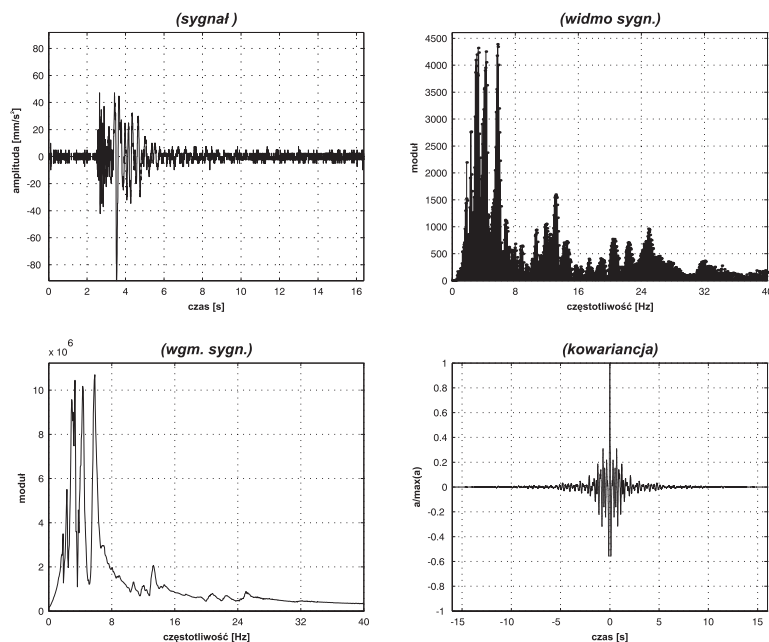
Rys. 8. Przyspieszenie wypadkowe (wstrząs nr 1)



Rys. 9. Przyspieszenie poziome (pochodna obl. numerycznie) w kierunku x (wstrząs nr 1)

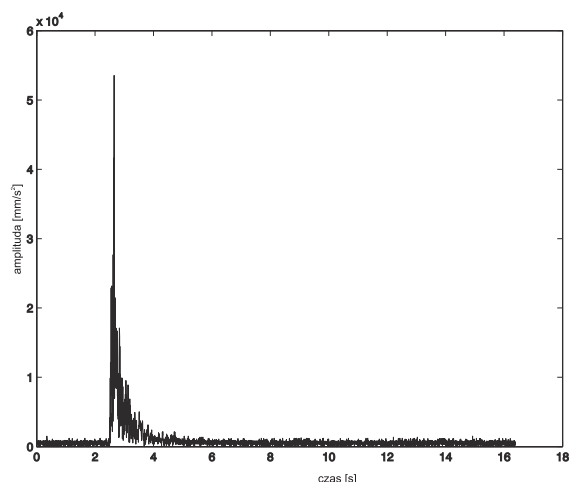


Rys. 10. Przyspieszenie poziome (pochodna obl. numerycznie) w kierunku y (wstrząs nr 1)



Rys. 11. Przyspieszenie pionowe (pochodna obl. numerycznie) w kierunku z (wstrząs nr 1)

Rysunek 12 przedstawia przyspieszenie wypadkowe tego sygnału.



Rys. 12. Przyspieszenie wypadkowe (pochodna obl. numerycznie) (wstrząs nr 1)

Z uzyskanych analiz wynika, że dla wstrząsu nr 1 i wstrząsu nr 2 [10] największe amplitudy prędkości (dla wszystkich trzech kierunków) skupiają się w zakresie $0\div 8$ Hz., przy czym maksymalna amplituda występuje dla częstotliwości ok. 3 Hz. W widmach przyspieszeń nie ma tej regularności. Dla niektórych składowych dominujące moduły składowych widma mieszczą się w podanym poprzednio przedziale, dla innych maksima występują w zakresie $20\div 26$ Hz. Przyspieszenia obliczone jako pochodne prędkości mają widma odbiegające od widm przyspieszeń rejestrowanych (rys. 6 i rys. 10, rys. 7 i rys. 11 oraz rys. 17). Celem pełnego zobrazowania różnic pomiędzy wartościami przyspieszeń mierzonych i obliczonych wykonano dekompozycje falkową sygnałów do poziomu trzeciego, używając falki analizującej sym8. Dla otrzymanej aproksymacji i trzech detali obliczono statystyki podstawowe zamieszczone w tabelach 2, 3 i 4 [4, 6]. Składowe widma dla sygnału wstrząsów nr 1 i nr 2 są zawarte w przedziale 0,125 do 125 Hz. Zakresy częstotliwości dla aproksymacji i detali zestawiono w tabeli 1.

TABELA 1
Zakresy częstotliwości dla aproksymacji i detali

	Zakres, [Hz]
Sygnał	0,125÷125
Aproksymacja	0,125÷7,8125
Detal 1	7,8125÷15,625
Detal 2	15,625÷31,25
Detal 3	31,25÷125

TABELA 2

x-sowa składowa sygnału 2003

Składowa	Średnia	Mediana	Moda	Max	Min	Zakres	Odchyl. stand.
sygnał rej.	0	0,2338	3,601	168,6	-302,8	471,4	11,89
sygnał_poch.	-0,00006	0	-2,315	101,7	-66,96	168,6	9,982
a	-0,01582	-0,3102	-1,518	82,37	-104	186,4	16,71
a_p	-0,00061	0,04157	-5,315	246,3	-161,7	408	25,87
d_1	0,02486	0	-1,658	70,21	-60,46	130,7	4,291
d_1p	0,05903	0,02261	-0,3356	15,56	-11,69	27,25	2,394
d_2	0,159	0,0137	-0,9207	258,2	-87,29	345,5	10,73
d_2p	0,0653	0,05213	1,137	37,32	-49,52	86,85	3,072
d_3	0,489	-0,0099	3,269	173,6	-364,3	537,8	23,45
d_3p	-0,0493	0,04552	0,8781	138,6	-62,93	201,5	9,356

TABELA 3

y-kowa składowa sygnału 2003

Składowa	Średnia	Mediana	Moda	Max	Min	Zakres	Odchyl. stand.
sygnał rej.	0	0,302	1,156	113	-78,75	191,8	11
sygnał_poch.	-0,001816	0	2,232	315	-166,2	481,1	11,82
a	0,1151	-0,05248	-1,189	264,5	-191	455,5	28,89
a_p	-0,004361	0,03086	-0,1608	96,99	-79,64	176,64	15,23
d_1	-0,02386	0,01022	0,182	11,35	-13,47	24,81	1,136
d_1p	-0,058	-0,04045	0,1232	70,54	-85,94	156,5	5,621
d_2	-0,04209	0,4866	-2,355	27,38	-57,58	84,96	4,063
d_2p	-0,1225	-0,0366	-0,8489	106,3	-232,2	338,5	10,11
d_3	-0,3118	0,03739	-1,195	125,3	-104,7	230	9,836
d_3p	-0,2006	0,01442	8,279	402,7	-147,7	550,4	23,61

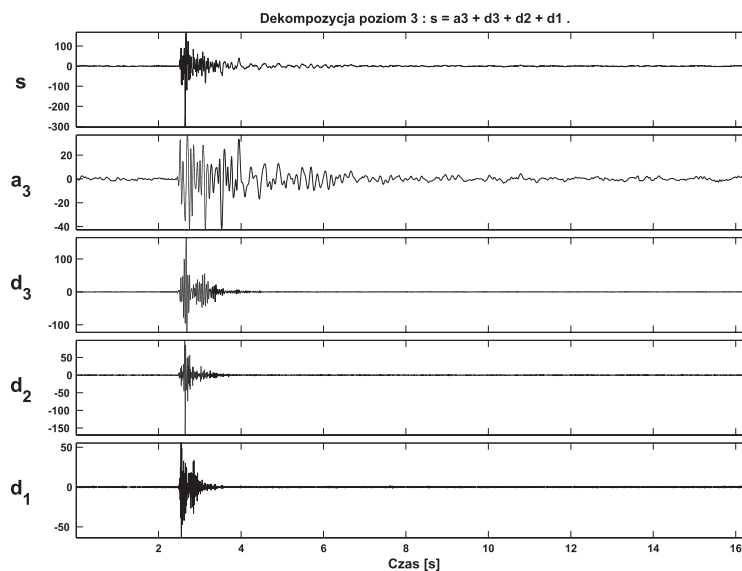
TABELA 4

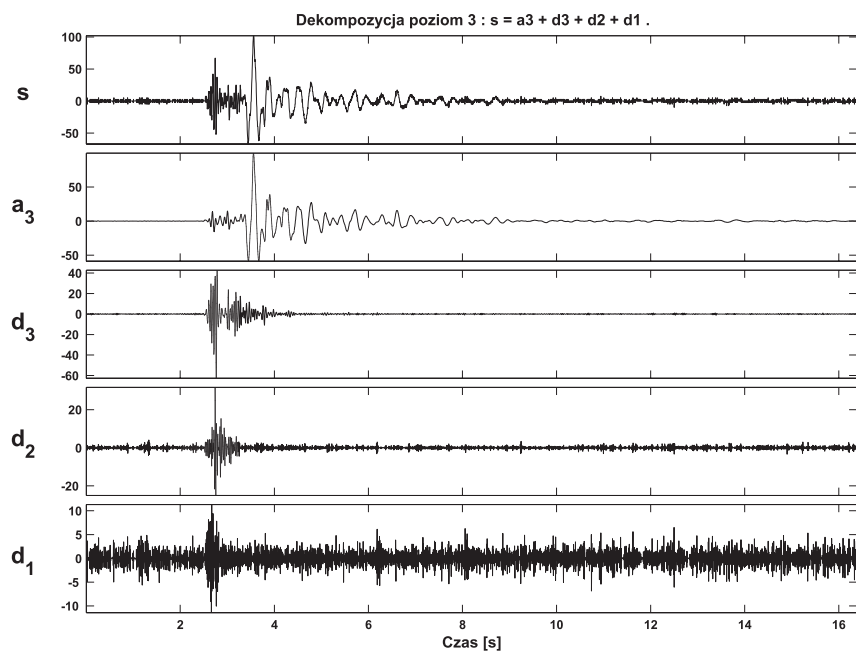
z-towa składowa sygnału 2003

Składowa	Średnia	Mediana	Moda	Max	Min	Zakres	Odchyl. stand.
sygnał rej.	0	0,2338	3,601	168,6	-302,8	471,4	11,89
sygnał_poch.	0,00121	0	-1,488	44,12	-91,76	138,9	8,905
a	-0,01582	-0,3102	-1,518	82,37	-104	186,4	16,71
a_p	0,00496	0,01597	-2,917	108,4	-243,2	351	23,68
d_1	0,02484	0	-1,658	70,21	-60,46	130,7	4,291
d_1p	-0,05414	0	0,06254	17,1	-15,88	32,99	2,403
d_2	0,159	0,01373	-0,9207	258,2	-87,29	345,5	10,73
d_2p	0,005174	0,0292	-0,3237	26,78	-25,68	52,46	2,538
d_3	0,489	-0,0098	3,269	173,6	-364,3	537,8	23,45
d_3p	-0,02946	0,0235	0,4837	36,94	-67,22	104,2	6,22

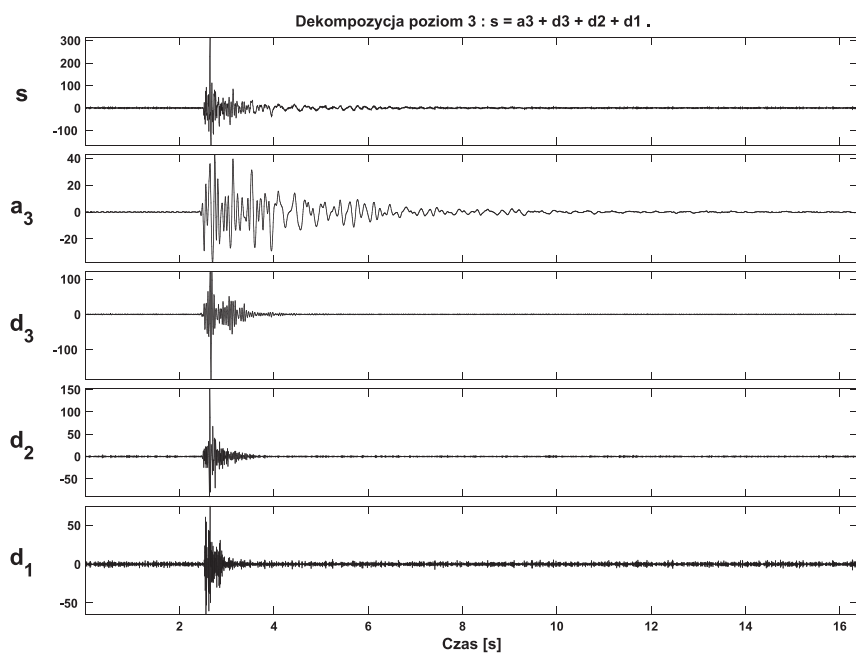
Oznaczenia do tabel 2-4: *a* — aproksymacja sygnału; *a_p* — aproksymacja pochodnej; *d_i* — detal sygnału *i*; *d_ip* — detal pochodnej *i*.

Rysunki 13–18 zawierające wykresy dekompozycji falkowej umieszczono parami: pomiar — wartość obliczona. Z zamieszczonych rysunków widać zasadnicze różnice pomiędzy sygnałami. Dodatkowo różnice uwypuklają wartości statystyk podstawowych.

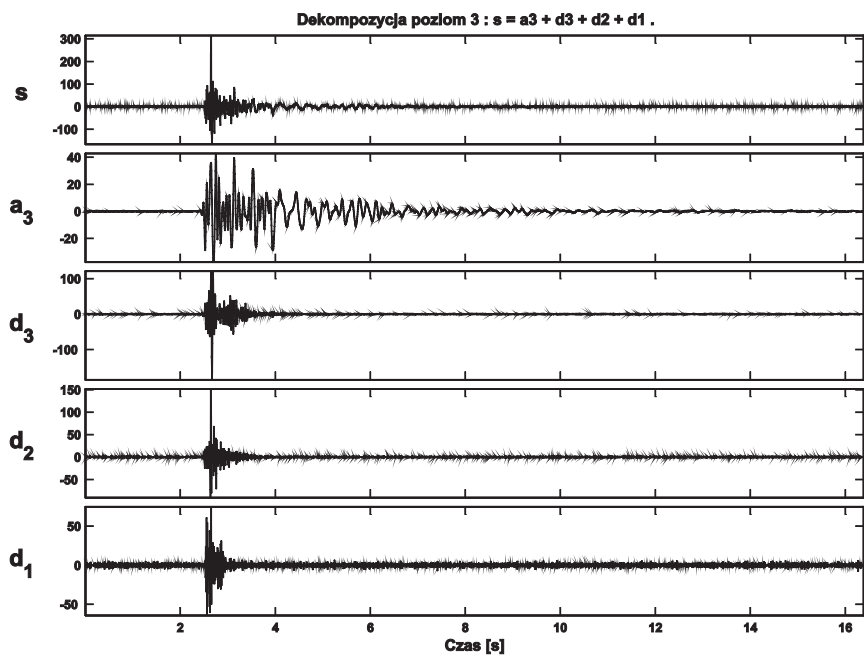
Rys. 13. Przyspieszenie poziome w kierunku *x* (wstrząs nr 1)



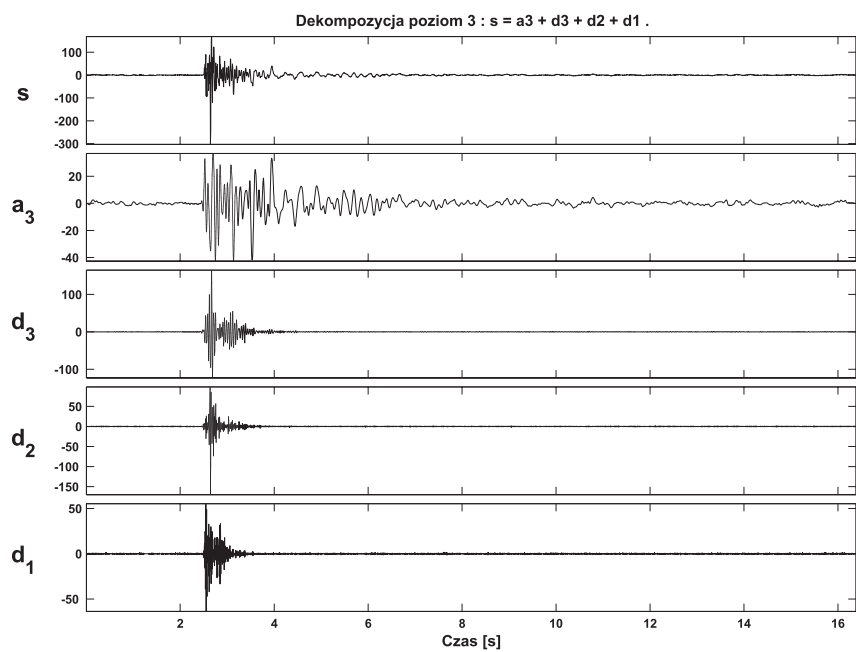
Rys. 14. Przyspieszenie poziome w kierunku x (pochodna obl. numerycznie) (wstrząs nr 1)



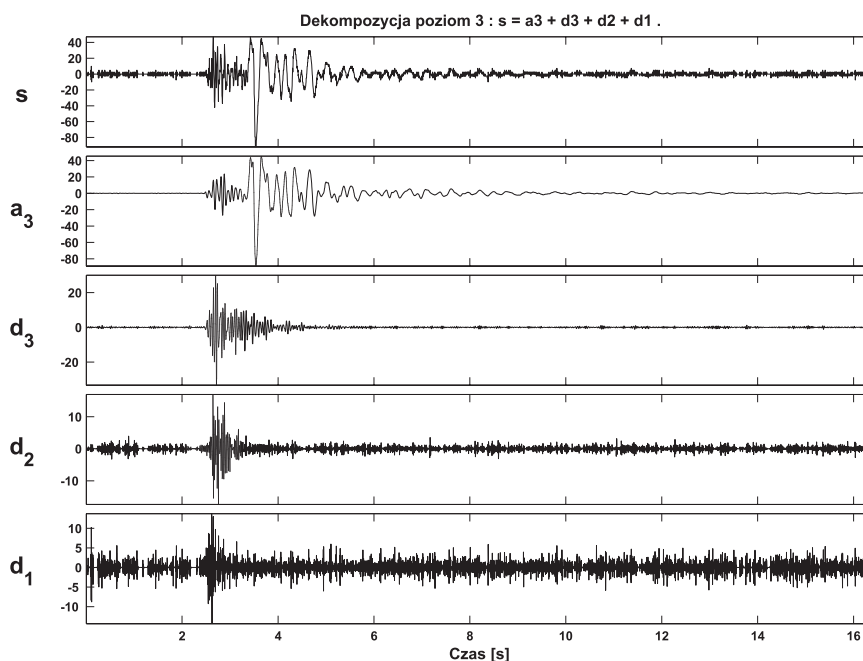
Rys. 15. Przyspieszenie poziome w kierunku y (wstrząs nr 1)



Rys. 16. Przyspieszenie poziome w kierunku y (pochodna obl. numerycznie) (wstrząs nr1)



Rys. 17. Przyspieszenie pionowe w kierunku z (wstrząs nr 1)



Rys. 18. Przyspieszenie pionowe w kierunku z (pochodna obl. numerycznie) (wstrząs nr1)

3. Wnioski

Analizowane wcześniej drgania ściany budynku zarejestrowane za pomocą tej samej aparatury i tym samym miejscu (prędkość drgań — geofon, przyspieszenie — akcelerator), spowodowane były wstrząsami górotworu o różnej energii (wstrząs nr 1 $E = 4,4 \cdot 10^6$ J, wstrząs nr 2 $E = 1,2 \cdot 10^8$ J) i innej lokalizacji wystąpienia. Większa energia wstrząsu (wstrząs nr 2) skutkowała większymi wartościami amplitud prędkości i przyspieszeń [10]. Porównując dominujące wartości widma i współczynnika gęstości mocy zarejestrowanej prędkości (składowe w kierunku poziomym x i y) zwraca uwagę ich przesunięcie w kierunku niższych częstotliwości dla wstrząsu nr 2. Dominujące wartości modułów składowych nie przekraczają 8 Hz. Widma prędkości w kierunku pionowym z obydwu wstrząsów posiadają istotne wartości modułów składowych do 30 Hz (rys. 3). W widmach przyspieszeń obydwu wstrząsów pojawiają się istotne wartości modułów dla częstotliwości wyższych (powyżej 16 Hz). Dotyczy to zwłaszcza przyspieszeń w kierunku pionowym z (rys. 7). Porównanie przebiegów przyspieszeń zarejestrowanych i obliczonych przez różniczkowanie zarejestrowanych prędkości prowadzi do wniosku, że różnią się one zasadniczo. Jest to szczególnie widoczne porównując ich dekompozycję falkową jak również zestawienie statystyk podstawowych dla dekompozycji (sygnałów, aproksymacji i detali), rysunki 13–18, tabelach 2, 3 i 4. Obserwowane różnice wynikają prawdopodobnie z różnych charakterystyk częstotliwości-

wych (transmitancji) czujników (geofonów, akcelerometrów) i rejestratorów. Brak możliwości prognozowania o wartościach przyspieszeń na podstawie zarejestrowanych wartości prędkości dla tego samego wstrząsu, może skłaniać do wniosku, że najbardziej wiarygodne byłoby rejestrowanie drgań w postaci przemieszczeń.

LITERATURA

- [1] *Białasiewicz J.T.*: Falki i aproksymacje. Warszawa, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne 2000
- [2] *Brzózka J., Dobroczyński L.*: Programowanie w Matlab. Warszawa, MIKOM 1998
- [3] *Mrozek B., Mrozek Z.*: Matlab 6 poradnik użytkownika. Warszawa, PLJ 2001
- [4] *Otnes R.K., Enochson L.*: Analiza numeryczna szeregów czasowych. Warszawa, WNT 1978
- [5] *Walaszczyk J., Barnat A., Hachaj S.*: Identyfikacja prędkości i przyspieszenia w dynamicznych modelach górotworu. Mat. XXV ZSMG, Kraków, 2002
- [6] *Zarzycki J.*: Cyfrowa filtracja ortogonalna sygnałów losowych. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne 1998
- [7] *Maciąg E.*: Interakcja układu niski budynek — podłoże gruntowe w przypadku drgań wzbudzanych wstrząsami górniczymi. Mat XXIX ZSMG KGBiG AGH, Kraków, 2006
- [8] *Janiszowski K.*: Identyfikacja modeli parametrycznych w przykładach. Warszawa, Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT 2002
- [9] *Tatara T.*: Działanie drgań powierzchniowych wywołanych wstrząsami górniczymi na niską tradycyjną zabudowę mieszkalną, Z.N. Politechnika Krakowska, 2002
- [10] *Walaszczyk J. i in.*: Prace statutowe Katedry Geomechaniki Budownictwa i Geotechniki, rok 2008 (praca niepublikowana)