

Jan Walaszczyk, Stanisław Hachaj*, Andrzej Barnat**

ANALIZA EFEKTYWNOŚCI MODELOWANIA CYFROWEGO DRGAŃ BUDYNKU WYWOŁANYCH WSTRZĄSAMI GÓRNICZYMI

1. Wstęp

Spowodowane eksploatacją górniczą zjawiska dynamiczne (np. utrata stateczności górotworu) wywołują drgania zarówno samego górotworu, jak i budynków usytuowanych na powierzchni. Prowadzone są liczne prace, których celem jest pomiar lub prognoza ww. wstrząsów oraz będących ich skutkiem drgań [7, 9, 11, 12]. Jednym ze sposobów prognozowania drgań jest modelowanie cyfrowe (np. metodą elementów skończonych) [12]. Modelowanie to obarczone jest licznymi ograniczeniami [5]. Do najważniejszych z nich należą trudności w identyfikacji modelu cyfrowego górotworu oraz budynków przez co jakość uzyskiwanych wyników modelowania cyfrowego jest ciągle niewystarczająca. W pracy niniejszej (powstałej w ramach badań statutowych AGH [10]) jakość modelowania cyfrowego oceniono w oparciu o porównanie drgań budynku (modelowanych metodą elementów skończonych) z drzaniem rejestrowanymi odpowiednią aparaturą geofizyczną. Podstawą porównań drgań modelowych oraz pomierzonych stanowi ich analiza spektralna [1–4, 6, 8].

2. Analiza spektralna pomierzonych drgań budynku

Do analizy wykorzystano udostępnione przez G. Mutkego zapisy 2 wstrząsów górotworu (z LGOM) zarejestrowanych na akcelerometrze i geofonie umieszczonych na ścianie budynku obok siebie:

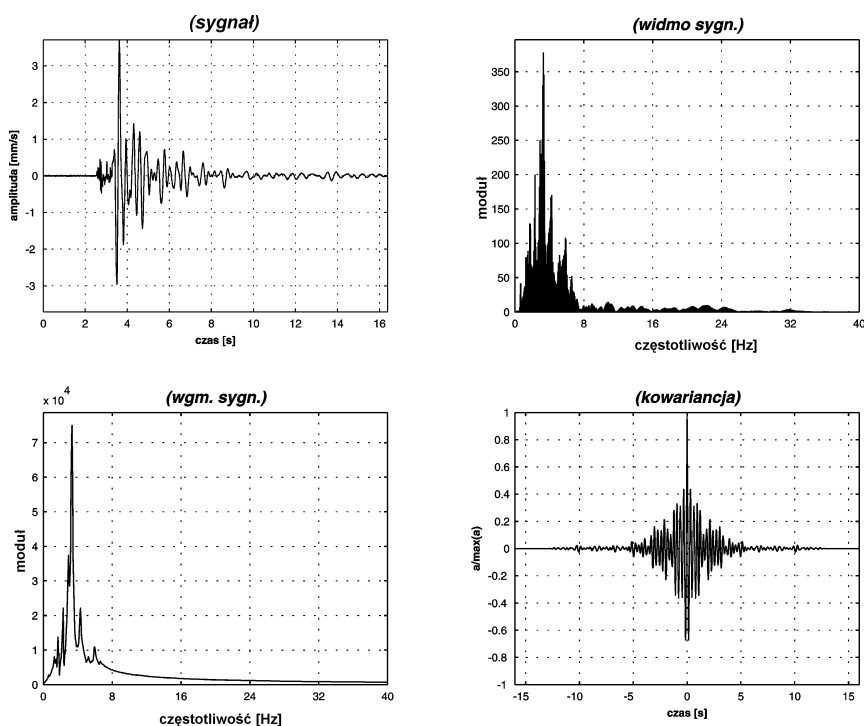
- wstrząs nr 1 z dnia 2003.05.11 o energii $E = 4,4E + 06$ [J] i współrzędnych $X = 30713$, $Y = 6426$;
- wstrząs nr 2 z dnia 2004.01.27 o energii $E = 1,2E + 08$ [J] i współrzędnych $X = 32598$, $Y = 5100$.

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

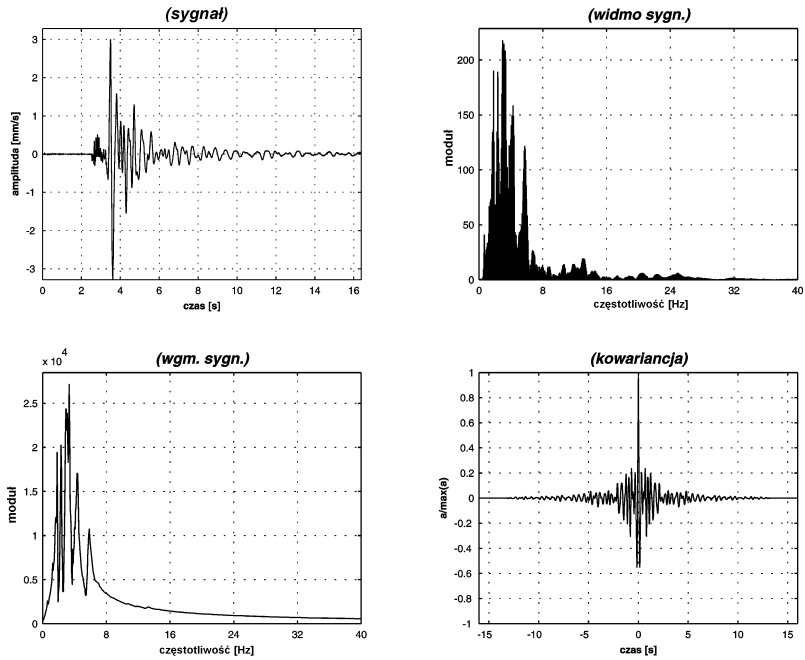
Próbkowanie w obydwu przypadkach wynosiło 0,004 pr/s (250Hz). Przeprowadzono porównanie przyspieszeń rejestrowanych z wartościami przyspieszeń obliczonych z zarejestrowanych prędkości (różniczkowanie numeryczne z krokiem równym krokowi próbkowania). W tym celu wykonano analizę widma częstotliwościowego składowych kierunkowych (xyz) 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] oraz opublikowane w [11]. Tutaj ograniczymy się do podania niektórych wyników dla wstrząsu nr 1.

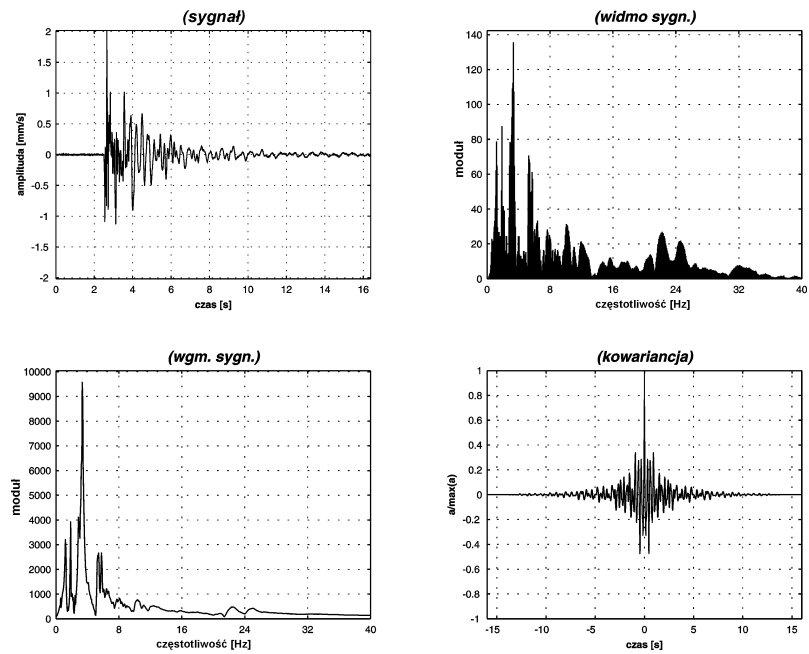
Rysunki 1–3 zawierają po cztery wykresy będące analizą spektralną kierunkowych składowych prędkości tego zarejestrowanego wstrząsu. Pierwszy wykres przedstawia zmienność amplitudy w czasie, wykres drugi widmo (spektrum) tego przebiegu. Zakres częstotliwości został ograniczony do przedziału 0÷40 Hz. Wykres 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)



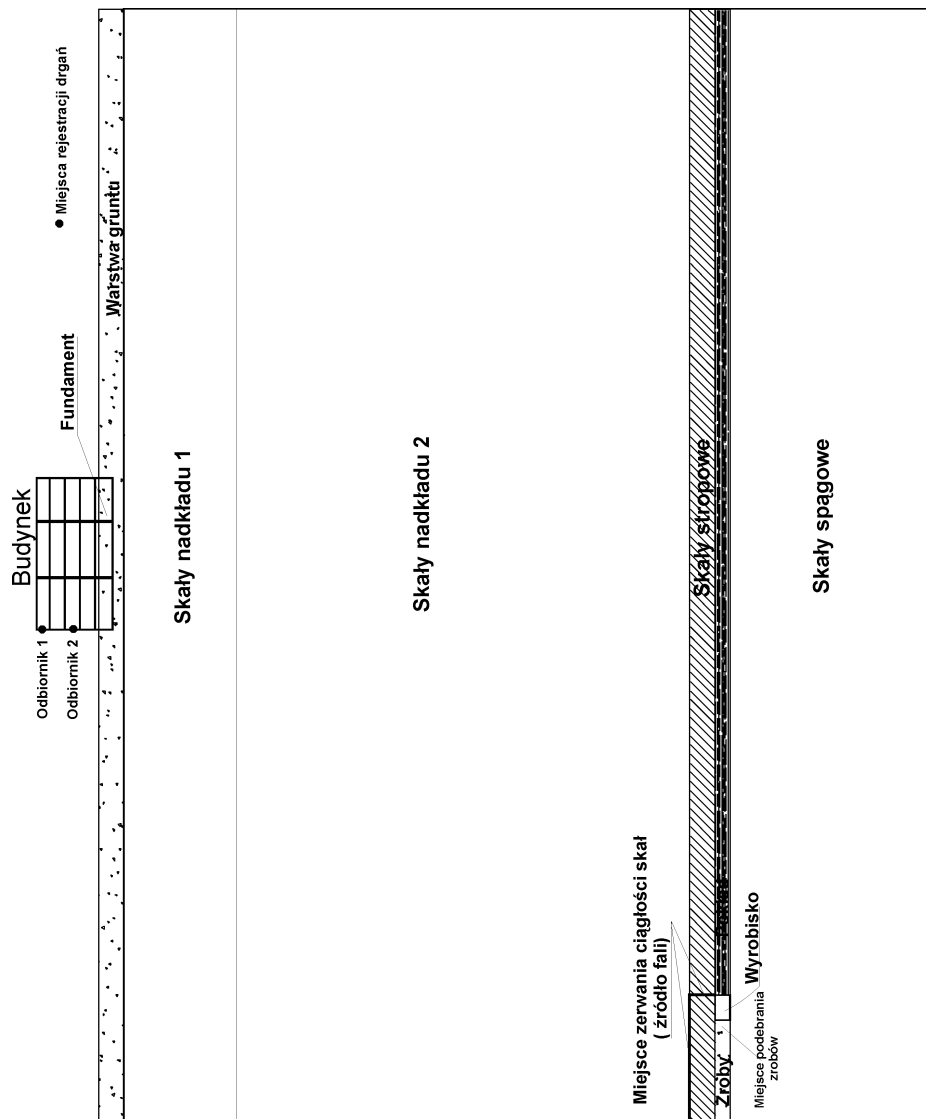
Rys. 3. Prędkość pionowa w kierunku z (wstrząs nr 1)

Z przedstawionych wykresów wynika, że dla wstrząsu nr 1 podobnie jest dla wstrząsu nr 2 [10] największe amplitudy prędkości (dla wszystkich trzech kierunków) skupiają się w zakresie 0÷8 Hz., przy czym maksymalna amplituda występuje dla częstotliwości ok. 3 Hz.

3. Model numeryczny wpływu wstrząsu górotworu spowodowanego utratą jego ciągłości na posadowiony w pobliżu budynek

Dwa analizowane wstrząsy [10, 11] zostały zarejestrowane w tym samym miejscu (ściana budynku) i przy pomocy tej samej aparatury. Zmierzona energia wstrząsów była różna oraz różne miejsca ich wystąpienia (inne współrzędne x i y , natomiast brak było informacji o głębokości, na których wstrząsy zaistniały). Zarejestrowane drgania ściany budynku mają odmienny charakter. Ponieważ właściwości fizyczne budynku oraz aparatura pomiarowa pozostały niezmienione, różnice w charakterze drgań należy przypisać charakterowi źródła wstrząsu oraz różnym właściwościom skał, przez które przebiegała fala od źródła do miejsca rejestracji. Budując model numeryczny propagacji fali sejsmicznej w górotworze należy uwzględnić właściwości fizyczne skał, przez które będzie przebiegać fala oraz właściwości budynku, na którym zostanie dokonana rejestracja. Udostępnione przez Mutkego wyniki pomiarów drgań ścian budynku (prędkości i przyspieszeń) uzupełnione są informacjami o energii wstrząsów będących źródłem drgań i ich położenia (współrzędne x i y), brakuje informacji o właściwościach górotworu. Dlatego budując model numeryczny autorzy odwołali się do doświadczeń wynikających z innych opracowań [5, 12]. Ze względu na wielkość modelu (odsunięcie możliwie daleko źródła fali od odbiornika) zrezygnowano z modelu przestrzennego ograniczając się do modelu płaskiego (spowodowało to utratę składowej poziomej analizowanego sygnału). Założono, że źródłem fali będzie wstrząs górotworu wywołany gwałtownym odspojeniem się skał w stropie nad wyrobiskiem wywołany usunięciem w warstwie zrobów kilku elementów przylegających bezpośrednio do wyrobiska (rozwarstwienie się warstw na kontakcie skał stropowych i skał nadkładu 2 — rys. 4). Energia nagromadzona w naprężonej nad zrobami warstwie zostanie oddana w postaci fali przemieszczeń. Z uzyskanych przemieszczeń obliczono numerycznie prędkości.

Na rysunku 4 przedstawiono poglądowy schemat rozmieszczenia warstw (bez zachowania skali). Model jest płaską tarczą jednostkowej grubości. Przyjęto płaski stan odkształcenia. Wymiary tarczy to 1100 m długości i 750 m wysokości. Na górnej krawędzi tarczy (pośrodku) posadowiona jest konstrukcja symulująca (przekrój przez) czterokondygnacyjny budynek o wysokości 20m i długości 40 m. W skład modelu wchodzi warstwy: do dolnej krawędzi modelu przylegają skały spągowe o grubości 115 m. Powyżej znajduje się warstwa pokładu miąższości 5 m. Od lewego brzegu tarczy na wysokości pokładu warstwa zrobów długości 50 m. Pomiedzy zrobami i pokładem znajduje się pustka symulująca wyrobisko o długości 5 m. Nad zrobami wyrobiskiem i pokładem zalegają skały stropowe o grubości 20 m.



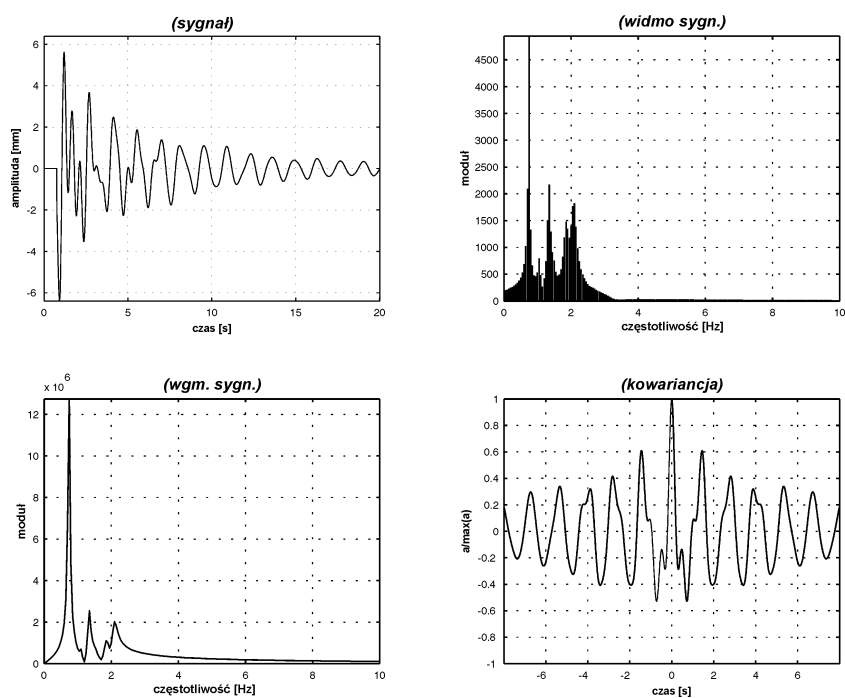
Rys.4. Schemat modelu obliczeniowego

TABELA 1
Właściwości fizyczne obszarów modelu

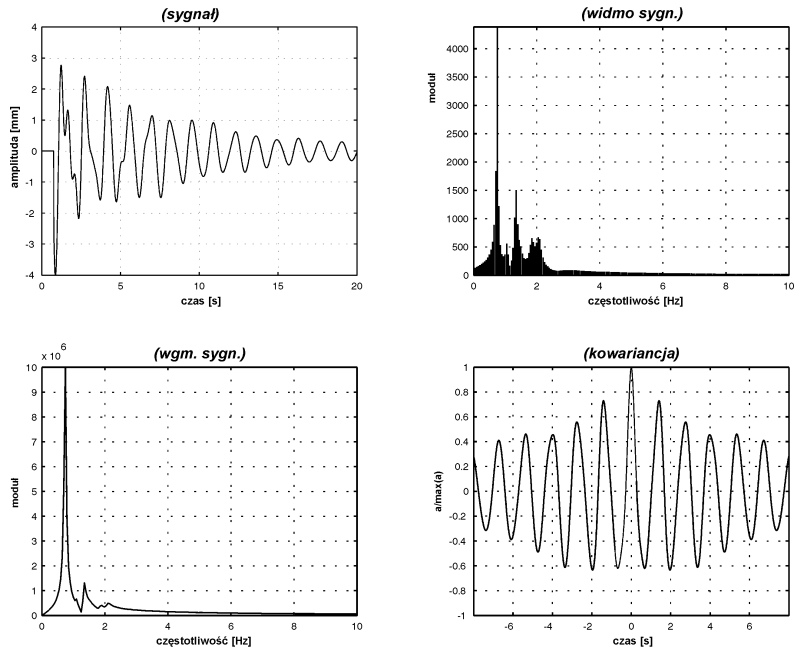
Obszar	Grubość, m	Moduł Younga, MPa	Współczynnik Poissona	Gęstość, Mt/m ³	Współczynnik Rayleigh' α	Współczynnik Rayleigh' β
Skąły spągowe	115	50000	0,31	0,0025	0,002	0,08
Pokład	5	30000	0,3	0,0025	0,002	0,08
Zroby	5	400	0,38	0,0025	0,002	0,08
Skąły stropowe	20	30000	0,3	0,0025	0,002	0,08
Skąły nadkładu 2	500	4000	0,21	0,0025	0,002	0,005
Skąły nadkładu 1	100	1000	0,28	0,0025	0,002	0,005
Grunt	5	200	0,35	0,0025	0,002	0,005
Budynek	20	15000	0,25	0,0025	0	0,001
Fundament	3	15000	0,25	0,0025	0,001	0,005

Powyżej znajdują się skały nadkładu 2 o grubości 500 m, powyżej skały nadkładu 1 o grubości 100 m. Warstwa najwyższa to warstwa gruntu grubości 5 m. Budynek posadowiony jest fundamentem w warstwie gruntu na głębokość 3 m. Przyjęto materiał liniowo sprężysty dla zadania statyki i liniowo sprężysto lepki dla zadania dynamicznego. Celem wyeliminowania odbić fali od brzegów modelu i stopniowego wygaszenia drgań wprowadzono współczynniki tłumienia Rayleigh'a. Stałe fizyczne dobrano metodą analizy odwrotnej i zamieszczono w tabeli 1. Warunkami brzegowymi są zerowe przemieszczenia poziome na lewym i prawym brzegu tarczy oraz zerowe przemieszczenia pionowe na dolnym brzegu tarczy. Obciążeniem są siły ciężkości.

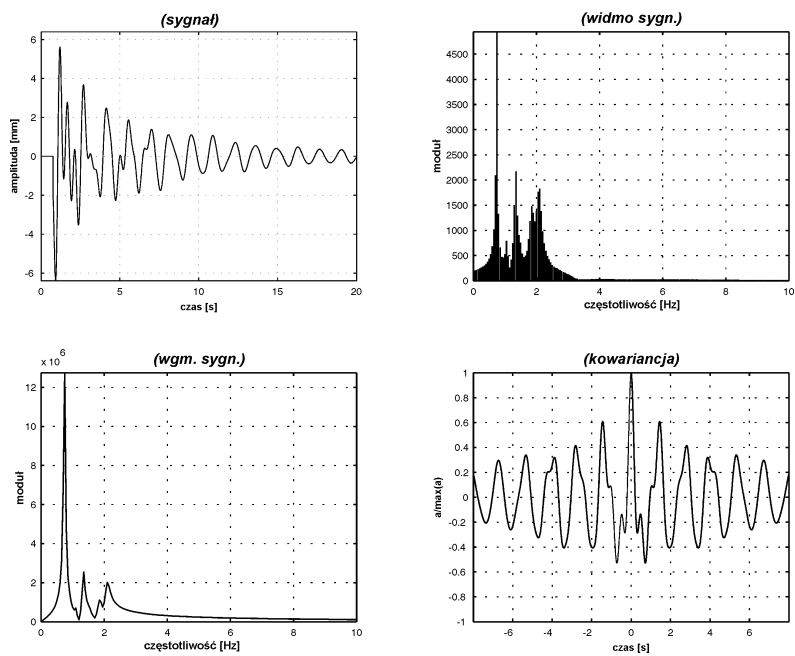
Do rozwiązania zagadnienia użyto programu ADINA [10, 12]. Obliczenia przeprowadzono w dwu etapach. Etap pierwszy polegał na rozwiązaniu statycznego zadania liniowo sprężystego celem wyznaczenia wartości przemieszczeń przy zadanych warunkach brzegowych i obciążeniu. Etap drugi — rozwiązanie zagadnienia dynamicznego. Zaburzenie równowagi modelu spowodowano usunięciem elementów siatki z warstwy zrobów znajdujących się z lewej strony wyrobiska, co pozwala na odspojenie się warstwy skał stropowych od warstwy skał nadkładu 2 wzdłuż istniejącej warstwy kontaktowej na długości do 20 m. Wywołaną w modelu falę rejestrowano w dwóch punktach (odbiornikach) umieszczonych na lewej ścianie budynku (druga i czwarta kondygnacja). Uzyskane wyniki zamieszczono na rysunkach 5–12.



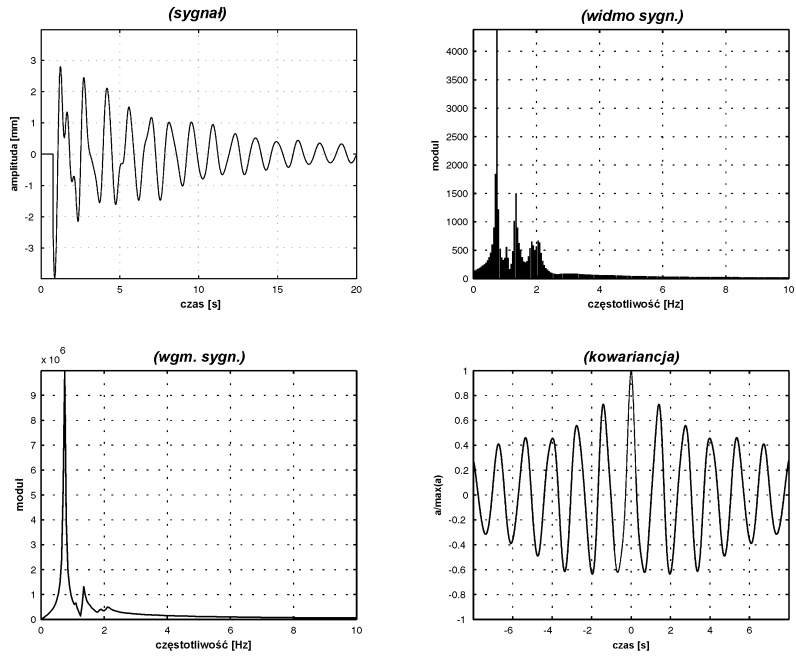
Rys. 5. Przemieszczenie poziome w kierunku y (odbiornik 1)



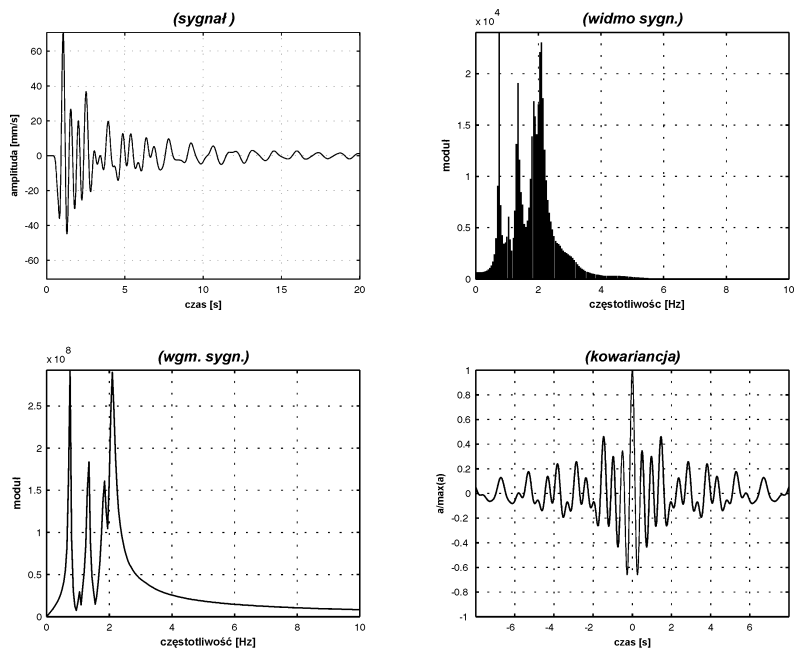
Rys. 6. Przemieszczenie poziome w kierunku y (odbiornik 2)



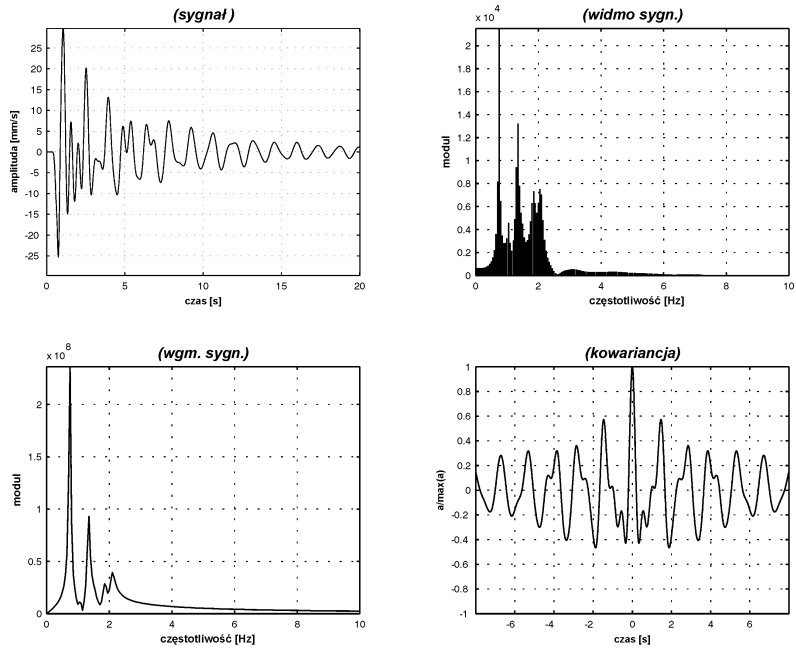
Rys. 7. Przemieszczenie pionowe w kierunku z (odbiornik 1)



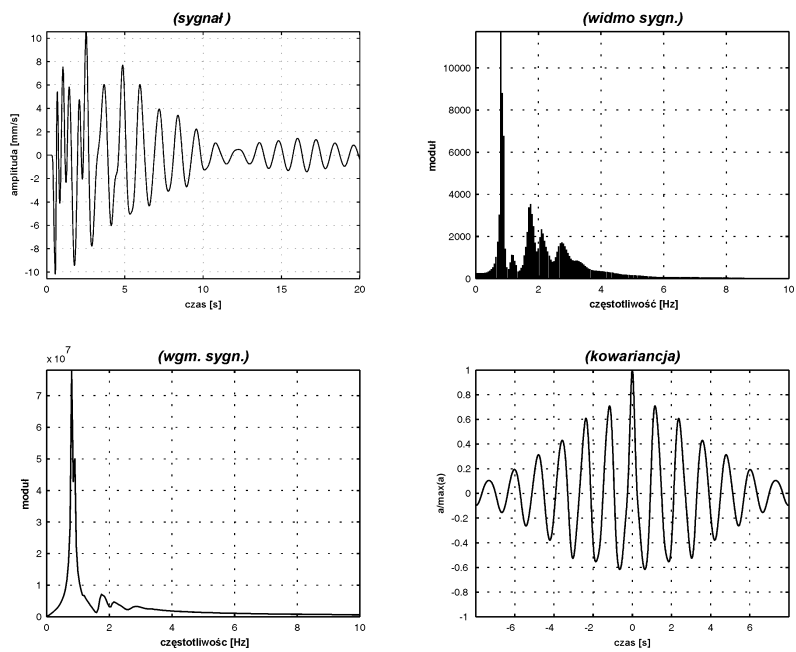
Rys. 8. Przesunięcie pionowe w kierunku z (odbiornik 2)



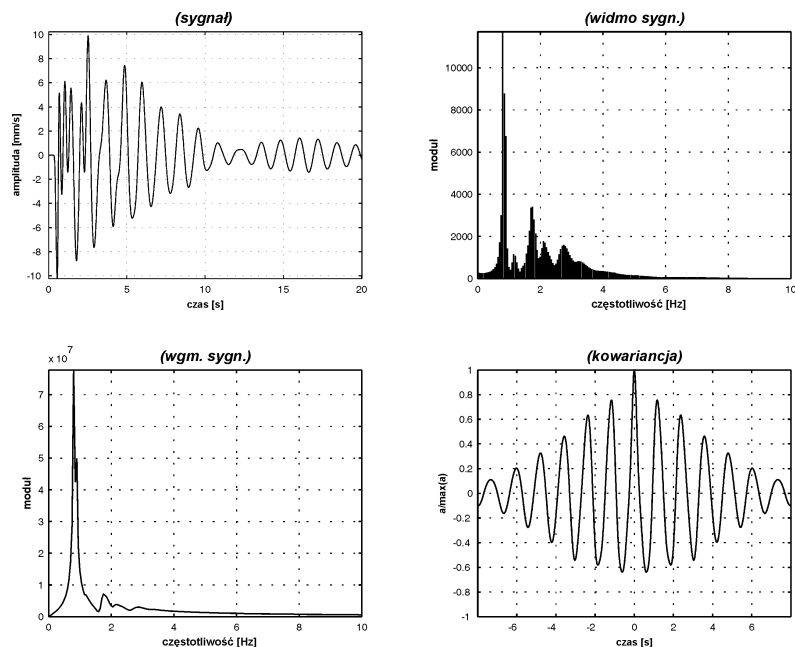
Rys. 9. Prędkość pozioma w kierunku y (odbiornik 1)



Rys. 10. Prędkość pozioma w kierunku y (odbiornik 2)



Rys. 11. Prędkość pionowa w kierunku z (odbiornik 1)



Rys. 12. Prędkość pionowa w kierunku z (odbiornik 2)

Rysunki zawierają po cztery wykresy będące analizą spektralną kierunkowych składowych przemieszczeń uzyskane w odbiornikach 1 i 2 (rys. 5–8) oraz obliczonych prędkości (rys 9–12). Każdy rysunek składa się z czterech wykresów. Pierwszy wykres przedstawia zmienność amplitudy w czasie zaś wykres drugi widmo (spektrum) tego przebiegu. Zakres częstotliwości został ograniczony do przedziału 0–10 Hz. Wykres trzeci przedstawia współczynnik mocy dla podanego zakresu częstotliwości. Wykres czwarty jest obrazem autokowariancji sygnału.

Z uzyskanych wyników widać, że w widmie obliczonych przemieszczeń i prędkości dominuje składowa o częstotliwości ok. 1 Hz. Zakres istotnych wartości widma nie przekracza 4 Hz. Związane jest to z przyjętymi właściwościami fizycznymi skał i dużymi wartościami współczynników tłumienia (wytłumienie odbić fali od brzegów modelu). Zwraca uwagę wysokie autoskorelowanie sygnałów.

4. Wnioski

Odnosząc uzyskane wyniki modelowania numerycznego do wyników uzyskanych z pomiarów stwierdzić należy, że:

- nie uzyskano pełnej ilościowej wyników z pomiarów z wynikami modelowania numerycznego;

- ze względu na przyjęte uproszczenia dotyczące tak modelu górotworu jak i modelu budynku można prognozować zachowanie się dynamiczne budynku poddanemu wstrząsom pochodzącym od działalności górniczej głównie od strony jakościowej;
- zamodelowanie struktury (geometrii) i przyjęcie właściwości fizycznych budynku nie nastręcza obecnie dużych kłopotów. Problemem jest natomiast postać (przebieg w czasie) wstrząsu zależny od sposobu jego inicjacji (obwał skał, pęknięcie płyt, rozwarstwienie się skał na kontakcie itp.), energii, właściwości fizycznych i geometrycznych skał, przez które fala sejsmiczna dociera do konstrukcji budynku. Wartości te znane są post factum, a prognozowanie ich (lokalizacja źródła fali, przyczyna jego wystąpienia, właściwości fizyczne skał) oprócz można na analogii do wstrząsów, które już miały miejsce;
- istotnym problemem modelowania numerycznego drgań budynku jest rozmiar modelu górotworu mały w odniesieniu do rzeczywistości i związane z tym częstotliwości drgań własnych wycinka górotworu nakładające się na drgania pochodzące od źródła. Pomimo tego model numeryczny daje wiele cennych informacji o skutkach przejścia fali sejsmicznej przez konstrukcje budynku oraz pozwala na rejestrację drgań w dowolnym miejscu konstrukcji. Jakość wyników modelowania numerycznego drgań budynku wywołanych wstrząsami górniczymi będzie wzrastać w miarę polepszenia identyfikacji fizycznego modelu źródła wstrząsu oraz modelu górotworu i budynku.

LITERATURA

- [1] *Białasiewicz Jan T.*: Falki i aproksymacje, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa, 2000
- [2] *Brzózka J, Dobroczyński L.*: Programowanie w Matlab, MIKOM, Warszawa, 1998
- [3] *Mrozek B., Mrozek Z.*: Matlab 6 poradnik użytkownika, PLJ, Warszawa, 2001
- [4] *Otnes Robert K., Enochson L.*: Analiza numeryczna szeregów czasowych, WNT, Warszawa, 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, Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa, 2002
- [9] *Tatara T.*: Działanie drgań powierzchniowych wywołanych wstrząsami górniczymi na niską tradycyjną zabudowę mieszkalną, Z.N. Politechnika Krakowska, Kraków, 2002
- [10] *Walaszczyk J. i in.*: Prace statutowe Katedry Geomechaniki Budownictwa i Geotechniki, r. 2008 (praca niepublikowana)
- [11] *Walaszczyk J., Hachaj S., Barnat A.*: Analiza spektralna drgań budynku wywołanych wstrząsami górniczymi. *Górnictwo i Geoinżynieria*, r. 33, z. 1, Kraków rok 2009