

Jan Walaszczyk, Dariusz Wiewiórka**

ANALIZA DRGAŃ POWIERZCHNI TERENU WYWOŁANYCH PĘKANIEM WARSTW SKALNYCH**

1. Wprowadzenie

Na terenach objętych podziemną działalnością górniczą sprawą oczywistą jest powstawanie szeregu zjawisk w górotworze i na powierzchni terenu. Szczególnie te ostatnie wzbudzają żywe zainteresowanie, ponieważ wiążą się z oddziaływaniem na ludzi i ich mienie. Spośród wielu oddziaływań działalności górniczej na powierzchnię szczególne znaczenie mają oddziaływania dynamiczne [2, 3]. Za lokalizację rozpatrywanych zjawisk przyjęto rejon LGOM. Ponieważ eksploatacja górnicza prowadzona jest tutaj w trudnych warunkach geomechanicznych, a skały charakteryzują się bardzo dużą fizyko-mechaniczną niejednorodnością, to dochodzi do gromadzenia dużych ilości energii sprężystej uwalnianej m.in. w sposób dynamiczny. Ten niekorzystny fakt potęgowany jest dodatkowo zaburzeniami tektonicznymi struktury, szczelinowatością, spękaniem czy ciosem. Stanowią one naturalne miejsca odprężania górotworu opartego na mechanizmie poślizgowym. Zjawiska te przebiegają gwałtownie i są połączone często ze zniszczeniem skał, wobec czego obserwowanie ich jest bardzo trudne, a niejednokrotnie wręcz niemożliwe [7]. Dlatego też ważną sprawą pozostaje właściwy opis stanu górotworu bezpośrednio przed pojawieniem się zjawiska odprężenia oraz sposób opisu samego zjawiska dynamicznego. Jedną z prób opisu inicjacji zjawiska odprężenia podjęto w [7], gdzie zdefiniowano pojęcie dynamicznego odciążenia górotworu.

Matematyczne modelowanie ww. zjawiska sprowadza się w szczególności do opisu i oceny skutków gwałtownego zerwania ciągłości na pewnej płaszczyźnie o osłabionej spójności i wymaga zastosowania dyskretnych modeli górotworu bazujących na metodzie elementów skończonych (MES), różnic skończonych (MRS) czy elementów odrębnych.

Należy zwrócić uwagę, że najbardziej newralgiczną fazą analizy dynamicznej pozostaje tworzenie modelu komputerowego, który będzie symulował zachowanie ciała rzeczywistego.

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

** Artykuł powstał w ramach badań statutowych nr 11.11.100.588

tego. Pewne właściwości mogą być wyznaczane bądź przybliżane za pomocą eksperymentów, jednak dla wielu ciał trudno jest ocenić charakterystykę dynamiczną, a w szczególności właściwości dyssypatywne. Niezbędne staje się przeprowadzenie wielu analiz dynamicznych z wykorzystaniem modeli komputerowych ze zróżnicowanymi obciążeniami i warunkami brzegowymi i początkowymi. Niektóre z tych metod zostały omówione w pracach [4, 7, 9]. Autorzy zdecydowali się prowadzić obliczenia metodą różnic skończonych w ujęciu systemu FLAC. Właściwości tego programu umożliwiają modelowanie płaszczyzn nieciągłości z wieloma ich parametrami oraz wygodne symulowanie zjawisk z wymuszeniami dynamicznymi.

Jak zauważono w [6], stosując metody komputerowe do symulacji zjawisk falowych w górotworze musimy spojrzeć na model numeryczny jako zespół elementarnych układów mechanicznych o zróżnicowanych właściwościach dynamicznych. Zgodnie z zasadą Huygensa, jeśli fala napotka cząstkę zdolną do wykonywania drgań, pobudza ją do tych drgań, a cząstka ta staje się źródłem nowej fali elementarnej. Sygnały końcowe odbierane na wyjściu modelu są sumą sygnałów wyjściowych wszystkich układów elementarnych składających się na model. Najczęściej jest to więc suma sygnałów zdeterminowanych i sygnałów o charakterze losowym, a więc obliczane wyniki powinny być analizowane są w sposób podobny, w jaki analizuje się sygnały losowe. Skoro właściwy sygnał wyjściowy jest zaburzony sygnałami pasożytniczymi pochodzenia numerycznego, istnieje konieczność oddzielenia sygnału od zniekształceń. Staje się to szczególnie konieczne, gdy analizujemy prędkość i/lub przyspieszenie. Rozwiązania tego problemu można poszukiwać w skorygowaniu sygnału przez przepuszczenie go przez filtr cyfrowy.

Do filtracji fal sejsmicznych używa się filtrów dolnoprzepustowych typu FIR, gdzie obcina się wszystkie częstotliwości powyżej pewnego progu f_c

$$H(f) = \begin{cases} 1, & |f| \leq f_c \\ 0, & |f| > f_c \end{cases} \quad (1)$$

gdzie $H(f)$ nazywamy transmitancją operatorową filtru lub funkcją przenoszenia [5].

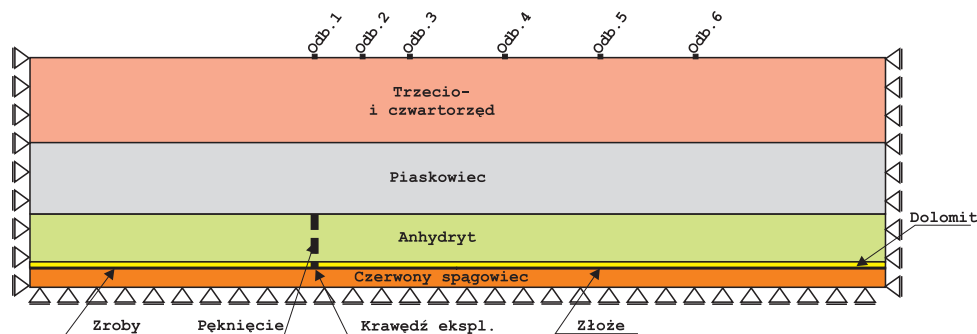
Decyzję o wielkości częstotliwości progowej f_c podejmowano na podstawie analizy widmowej Fouriera (FFT) oraz widmowej gęstości mocy przemieszczeń (PSD).

W oparciu o metodykę rozwiązywania zagadnień dynamicznych opracowaną w pracy [9] badano zachowania się powierzchni w warunkach eksploatacji górniczej kopalń LGOM. W niniejszym artykule modelowano pionowe pęknięcie warstw stropowych w bezpośrednim sąsiedztwie wyrobiska eksploatacyjnego.

2. Model komputerowy

Do oceny zachowania się górotworu pod wpływem pęknięcia warstw skalnych przyjęto model obliczeniowy w kształcie prostokątnej tarczy o wymiarach 4500×1134 m w płaskim

stanie odkształcenia, co zobrazowano na rysunku 1. Na głębokości 1030 m w obszarze złoża miedzi zamodelowano wyrobisko eksploatacyjne o wysokości 4 m.



Rys. 1. Model obliczeniowy z zaznaczonymi warunkami brzegowymi odbiornikami i płaszczyzną pęknięcia

Tarczę podzielono zgodnie z profilem geologicznym na poziome warstwy o właściwościach materiałowych zebranych w tabeli 1. Przyjęto model liniowo-sprężysty dla wszystkich warstw. Założono, że w warstwie dolomitu i anhydrytu może nastąpić gwałtowne zniszczenie struktury (pęknięcie) powodująca dynamiczny proces propagacji fali przemieszczeń i naprężeń.

TABELA 1
Parametry geotechniczne skał tarczy

Warstwy	Miaższość m	Gęstość objętościowa ρ kg/dm ³	Moduł sprężystości E MPa	Współczynnik Poissona ν
Trzecio- i czwartorzęd	420	2,5	14 000	0,3
Piaskowiec	350	2,4	20 000	0,15
Anhydryt	240	2,9	55 000	0,26
Dolomit	20	2,5	62 000	0,26
Złoże	4	2,5	30 000	0,21
Zroby	4	2,5	3000	0,21
Czerwony spągowiec	100	2,3	7000	0,14

Warunki początkowe i brzegowe dla modelowanej tarczy dla statycznego stanu modelu przedstawiono na rysunku 1. Dyskretyzację przeprowadzono przy pomocy metody różnic skończonych [4].

Zgodnie z założeniami dynamicznego odciążenia górotworu obliczenia prowadzono dwuetapowo. Jako pierwszy etap rozwiązano zagadnienie statyczne dla przyjętych warunków początkowych i brzegowych wynikających z sił grawitacyjnych. W efekcie obliczony stan naprężeń i odkształceń staje się stanem wyjściowym do symulacji dynamicznej.

Dla rozwiązania dynamicznego (zmienny w czasie stan przemieszczenia modelu) warunki brzegowe i początkowe przejęto z rozwiązania statycznego i wprowadzono płaszczyzny nieciągłości w dolomicie i anhydrycie o łącznej długości 260 m. Ze względu na trudność w umiejscowieniu źródła pęknięć i ich zasięgu przyjęto arbitralnie jedno z możliwych miejsc ich wystąpienia — w stropie wyrobiska na granicy ze zrobami. Wprowadzaną płaszczyznę nieciągłości opisano sztywnościami normalną i styczną [4]. Nie wprowadzono tarcia i kohezji na tej płaszczyźnie, co powodowało możliwość poślizgu i jej rozdzielania się. Nie wprowadzono tłumienia wewnętrznego i na brzegach modelu.

Obserwacje wyników symulacji komputerowych prowadzono w przedziale czasu równym 4 s w odbiornikach umieszczonych w następujących punktach na górnej krawędzi modelu:

- odbiornik 1 — bezpośrednio nad miejscem pęknięcia,
- odbiornik 2 — 250 m poziomo od miejsca pęknięcia,
- odbiornik 3 — odpowiednio w odległości 500 m,
- odbiornik 4 — 1000 m,
- odbiornik 5 — 1500 m,
- odbiornik 6 — 2000 m poziomo od miejsca pęknięcia,

co obrazuje rysunek 1.

Krok czasowy został dobrany automatycznie w programie FLAC.

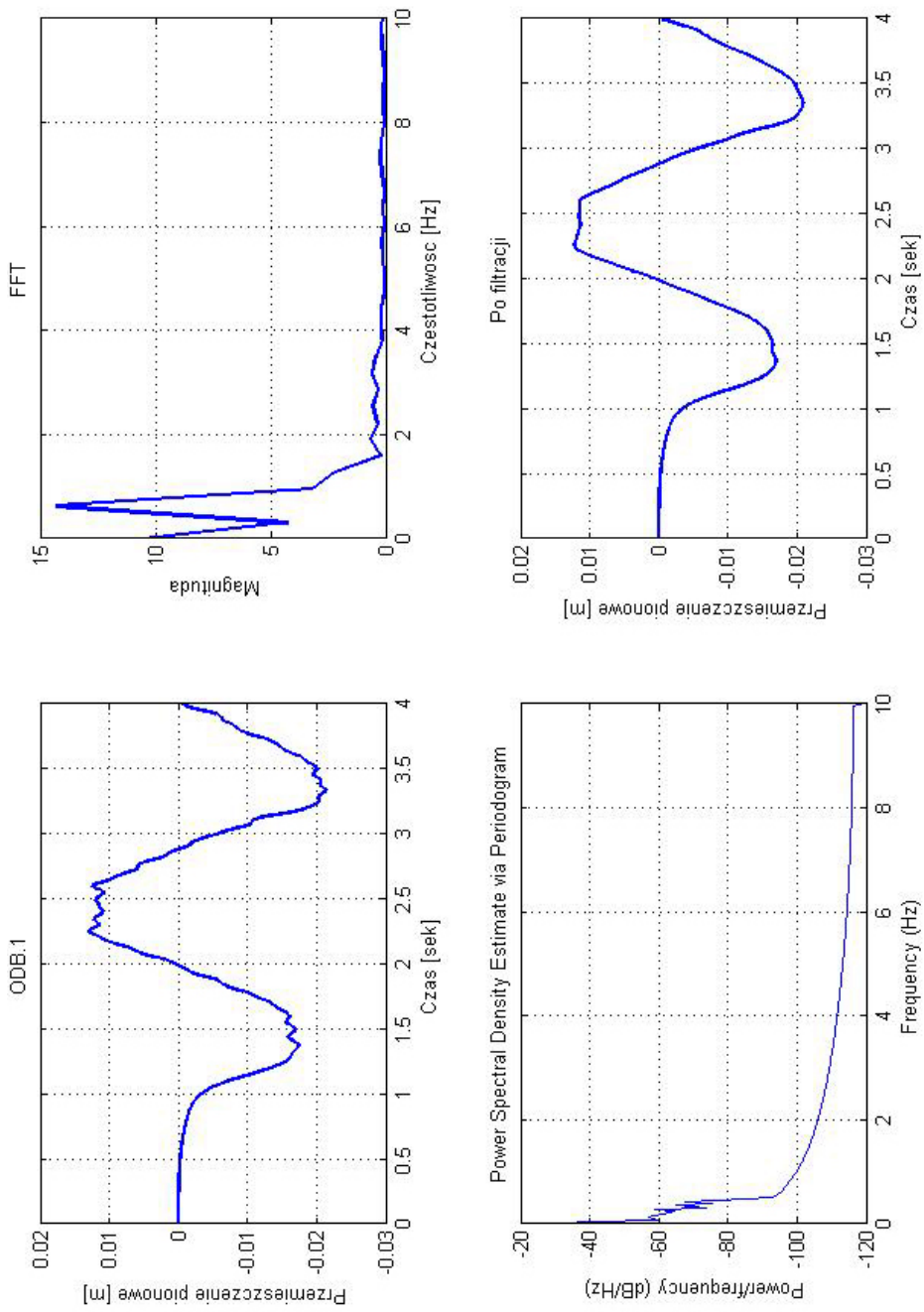
W zdefiniowanych odbiornikach obserwowano przemieszczenia poziome i pionowe. Dla przemieszczeń tych wyznaczono widma częstotliwościowe FFT oraz funkcje widmowej gęstości mocy PSD. Przeprowadzono analizę tych widm i zbudowano dolnoprzepustowy filtr cyfrowy typu FIR [1].

Analiza ta posłużyła również do wyznaczenia częstotliwości odcięcia, którą ustalono na poziomie $f_c = 10$ Hz. Tak zbudowany filtr stosowano do wszystkich sygnałów przemieszczenia. Z sygnału przemieszczeń po filtracji wyznaczano wartości prędkości i przyspieszenia (zgodnie z procedurą opisaną w [9]).

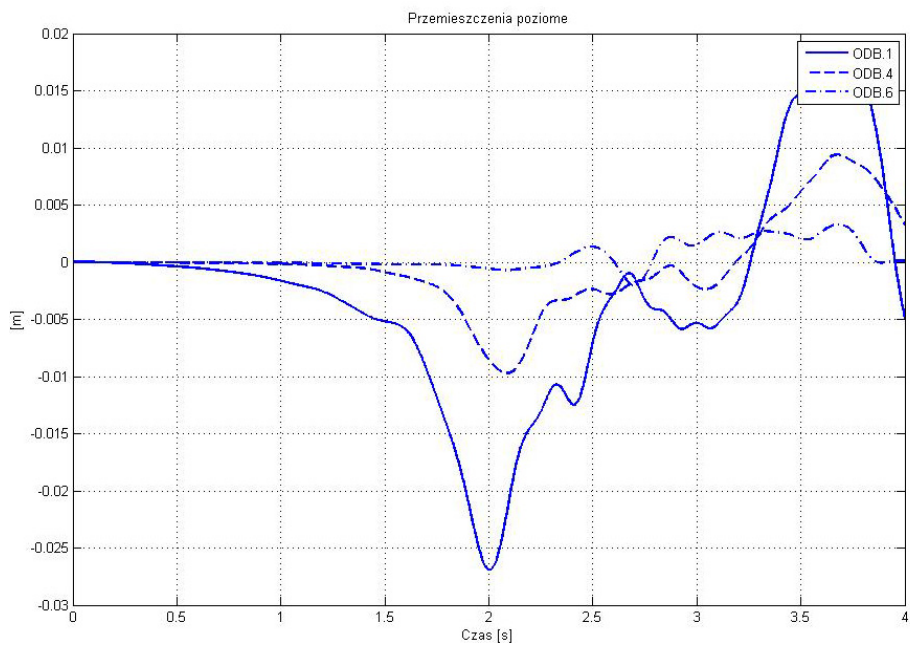
Na rysunku 2 przedstawiono przykładową analizę częstotliwościową i filtrację dla przemieszczenia poziomego w odbiorniku 1.

Filtracja wyników pozwoliła przedstawić wykresy zawierające zmiany w czasie składowej poziomej i pionowej przemieszczeń, prędkości i przyspieszeń obserwowanych w odbiornikach 1–6.

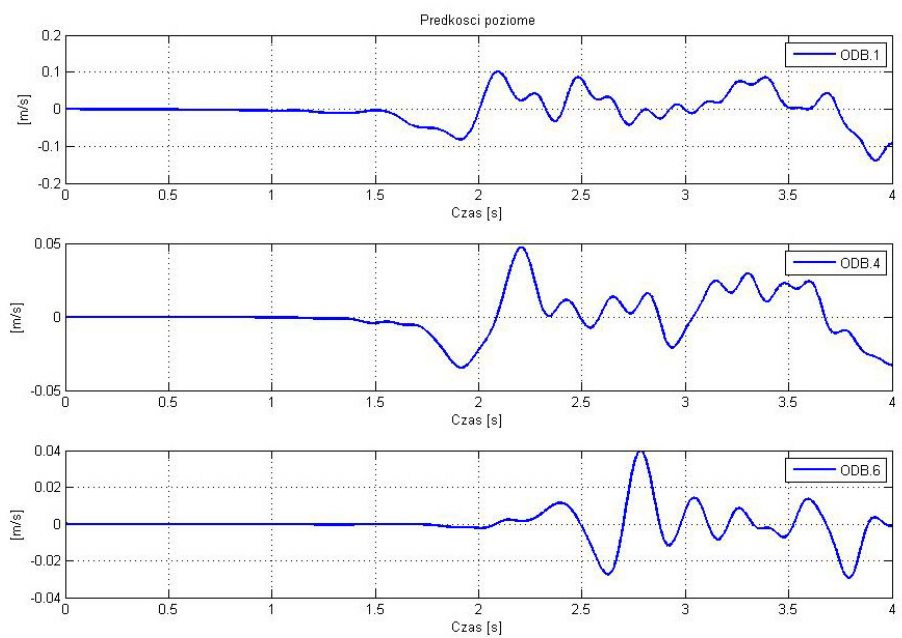
Ze względu na dużą ilość analizowanych wyników na rysunkach 3–8 przedstawiono przykładowo obraz zachowania się górnej krawędzi modelu w odbiornikach 1, 4 i 6.



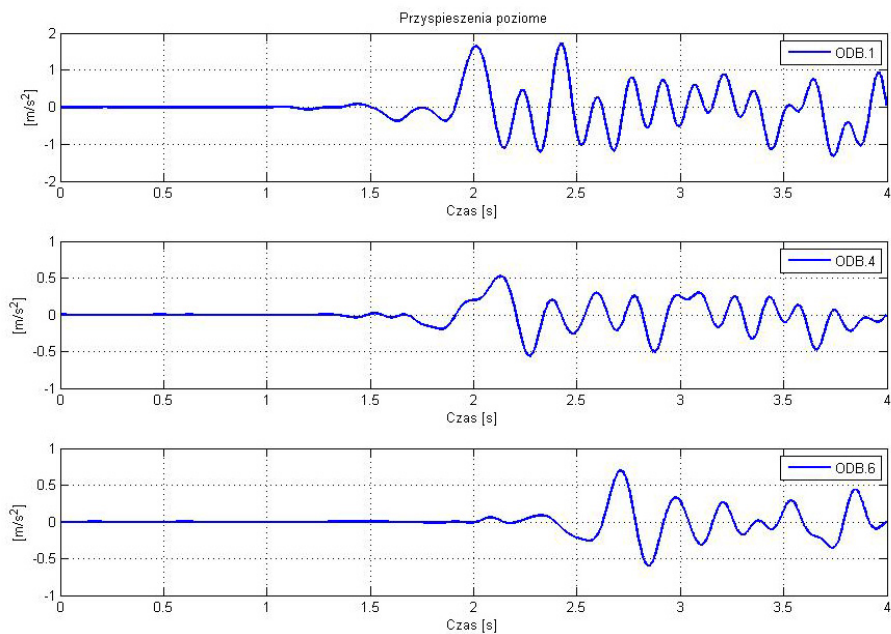
Rys. 2. Przemieszczenia poziome w odbiorniku 1, FFT, widmowa gęstość mocy oraz sygnał po filtracji



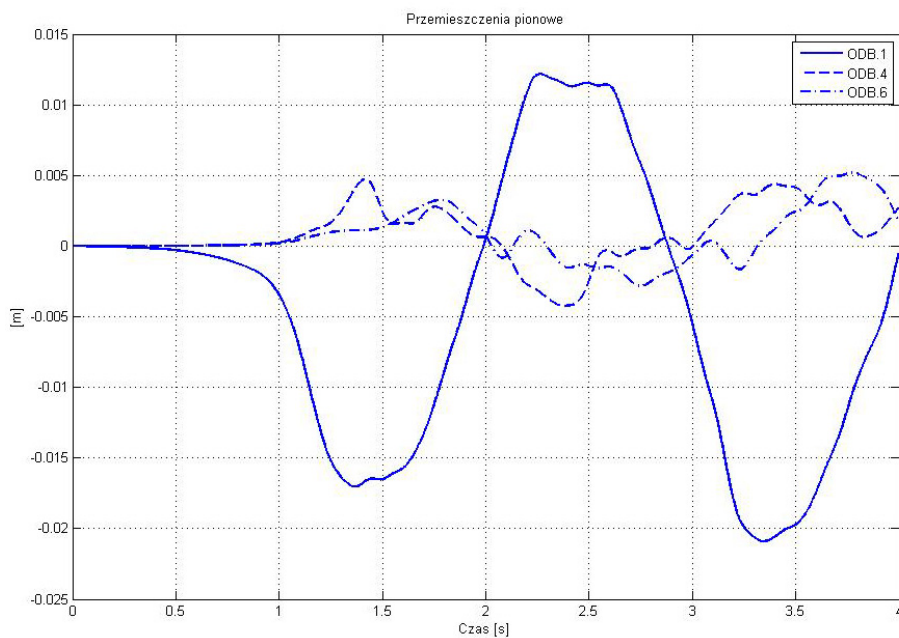
Rys. 3. Przeszyczenia poziome w odbiornikach 1, 4 i 6



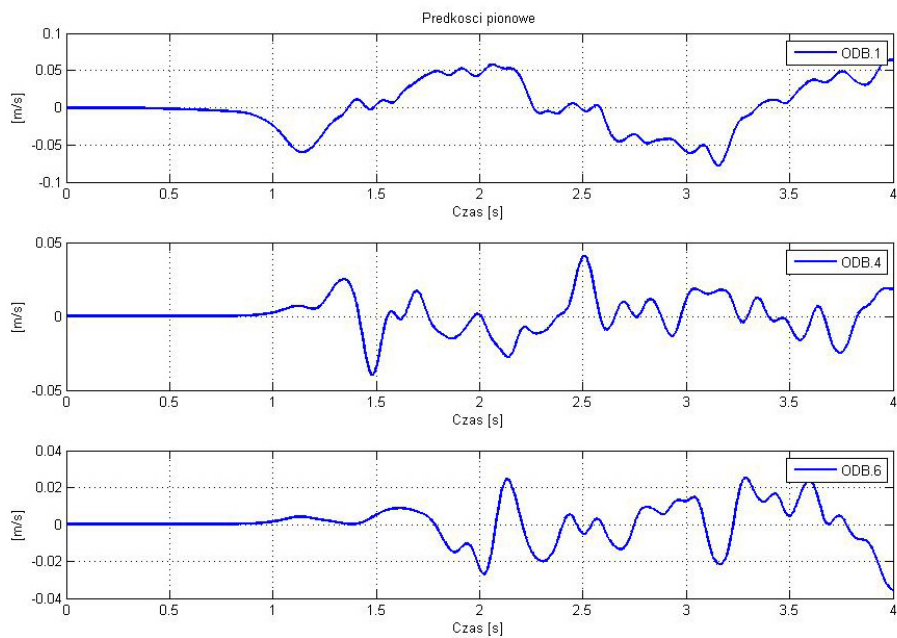
Rys. 4. Prędkości poziome w odbiornikach 1, 4 i 6



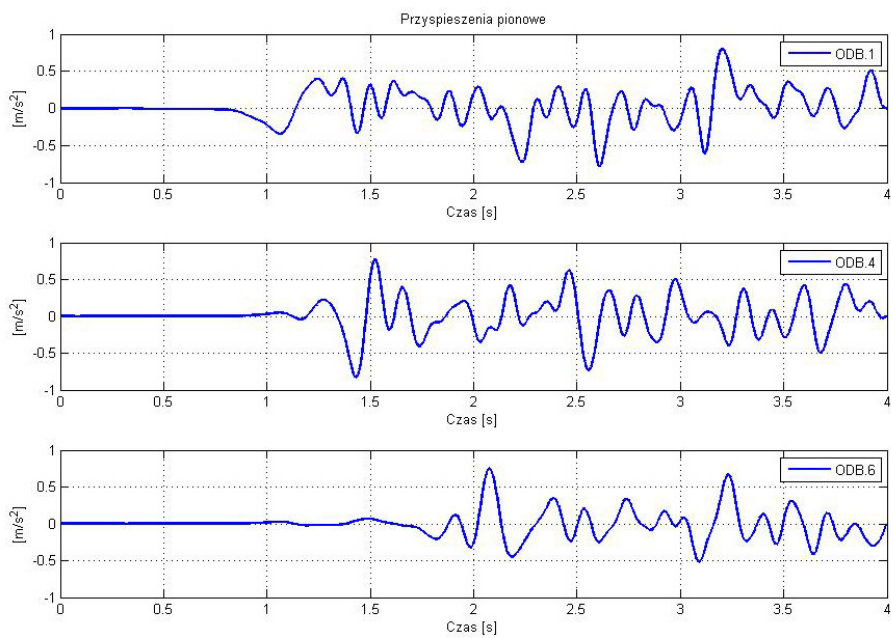
Rys. 5. Przyspieszenia poziome w odbiornikach 1, 4 i 6



Rys. 6. Przemieszczenia pionowe w odbiornikach 1, 4 i 6



Rys. 7. Prędkości pionowe w odbiornikach 1, 4 i 6



Rys. 8. Przyspieszenia pionowe w odbiornikach 1, 4 i 6

3. Wnioski i spostrzeżenia

- 1) Ze względu na to, że wyniki obliczeń na modelach dynamicznych obarczone są pewnymi błędami (zaburzeniami) związanymi ze stosowanymi metodami numerycznymi, zastosowano do eliminacji tych błędów cyfrową filtrację sygnałów.
- 2) Przemieszczenia poziome we wszystkich odbiornikach mają podobny charakter częstotliwościowy. Przemieszczenia pionowe mają nieco wyższe wartości częstotliwości. Obserwuje się zmniejszanie wartości amplitud przemieszczeń wraz z oddalaniem się od źródła fal. Zauważalne jest opóźnienie w rozpoczęciu drgań związane z prędkością fali i czasem dojścia czoła fali do odbiorników.
- 3) Obserwuje się wzrost częstotliwości drgań prędkości i przyspieszeń zarówno poziomych, jak i pionowych. Prędkości poziome osiągają wartości od 10 cm/s w odbiorniku 1 do 4 cm/s w odbiorniku 6, a przyspieszenia poziome z kolei od 1,8 m/s² do 0,7 m/s². Prędkości pionowe osiągają wartości od 8 cm/s w odbiorniku 1 do 2 cm/s w odbiorniku 6, a przyspieszenia pionowe 0,7 m/s² niezależnie od odbiornika.
- 4) Pomimo wybitnie pionowej orientacji impulsu pochodzącego od pęknięcia warstw skalnych dochodzi do zbliżenia się wartości przemieszczeń, prędkości i przyspieszeń pionowych i poziomych obserwowanych na górnej krawędzi modelu.

LITERATURA

- [1] Bendat J.S., Piersol A.G.: Metody analizy i pomiaru sygnałów losowych. Warszawa, PWN 1976
- [2] Ciesielski R. (red.): Challenges to civil and mechanical engineering in 2000 and beyond: CCME'97. Proceedings of the International Conference, June 2–5, Wrocław, 1997
- [3] Ciesielski R., Kwiecień A., Szypula K.: Propagacja drgań w warstwach przypowierzchniowych podłoża gruntowego: badania doświadczalne *in situ*. Seria Monografia — Politechnika Krakowska 1999
- [4] Itasca Consulting Group Inc. Fast Lagrangian Analysis of Continua v. 5.0, Minneapolis, User's Manual 2005
- [5] Oppenheim A.V. i in.: Digital signal processing. London, Prentice-Hall International 1986
- [6] Walaszczyk J., Barnat A., Hachaj S.: Identyfikacja prędkości i przyspieszenia w dynamicznych modelach górotworu. XXV Zimowa Szkoła Mechaniki Górotworu Zakopane, Kraków, Wydawnictwo KGBiG AGH 2002
- [7] Walaszczyk J.: O pewnych możliwościach zastosowania metod numerycznych do zagadnienia odprężeń górotworu. ZN AGH Górnictwo, 107, 1980
- [8] Walaszczyk J., Wiewiórka D.: Wpływ nagłej utraty podporności stropu wyrobiska ścianowego na stan przemieszczenia górotworu. XXV Zimowa Szkoła Mechaniki Górotworu: Zakopane. Kraków, Wydawnictwo KGBiG AGH, 2002
- [9] Wiewiórka D.: Komputerowe modelowanie skutków dynamicznego odciążenia górotworu. AGH, Kraków, 2003 (niepublikowana praca doktorska)