

Jan Walaszczyk, Dariusz Wiewiórka**

MODELOWANIE WPŁYWU ZABURZEŃ TEKTONICZNYCH NA DRGANIA STROPU W GÓROTWORZE UWARSTWIONYM**

1. Wprowadzenie

Skały, w których prowadzona jest podziemna eksploatacja surowców skalnych w Polsce, charakteryzują się bardzo dużą niejednorodnością zarówno pod względem litologii, jak i cech fizyko-mechanicznych. Zaburzenia tektoniczne oraz spękania czy szczelinowatość dodatkowo potęgują fakt trudnych warunków eksploatacji. Do tego obszary górnicze kopalń podziemnych zlokalizowane najczęściej są w blokach tektonicznych utworzonych przez duże uskoki. Długość uskoków, ich zrzuty oraz lokalizacja są bardzo zróżnicowane, a kąt nachylenia powierzchni uskoków też jest często zróżnicowany. Obok uskoków, w których przemieszczenie skał następowało zgodnie z kierunkiem zbliżonym do pionowego, powszechnie obserwowane są przesunięcia poziome. Wyniki badań geologicznych wskazują, że przemieszczanie się bloków skalnych względem siebie było wielopiętrowe, wielokierunkowe, a także wielokrotne. Dodatkową komplikację struktury górotworu stanowią występujące w skałach spękania ciosowe, pęknięcia oraz szczeliny.

Należy podkreślić, że podziemna eksploatacja prowadzona jest często w otoczeniu skał mocnych w stosunku do wybieranego złoża, schodzi się na coraz większą głębokość i coraz większe obszary górotworu zostają naruszone robotami górniczymi. Potęguje się intensywność heterogenicznych zjawisk fizycznych w górotworze, szczególnie o charakterze dynamicznym. W miarę równomiernie rozmieszczona w górotworze energia potencjalna zostaje naruszona robotami górniczymi. To z kolei może powodować lokalne uwalnianie się — wyładowanie energii i zamianę energii potencjalnej górotworu na energię kinetyczną, pracę pękania, kruszenia skał, wypiętrzanie spągu, wydzielanie ciepła itp. Obserwuje się zjawiska wyładowania energii — zwane w praktyce górniczej odprężeniami, które przebie-

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

** Praca wykonana w ramach badań własnych AGH nr 10.10.100.960

gają gwałtownie i są połączone ze zniszczeniem skał. Niemniej wyjaśnienie tych zjawisk jest bardzo trudne, a niejednokrotnie wręcz niemożliwe [3].

Aby przybliżyć zachowanie się górotworu w trakcie zjawisk o charakterze nagłym sięga się po analityczne, czy też przybliżone, modelowe metody opisu tychże zjawisk. Istotną sprawą pozostaje dobór właściwego modelu stanu górotworu przed rozpoczęciem się zjawiska odprężenia oraz sposób opisu zjawiska dynamicznego. Pewne przyczyny powstawania zjawisk dynamicznych w górotworze oraz mechanizm tych zjawisk są dyskutowane w publikacjach [2, 5]. W niniejszej pracy skupiono się na komputerowym modelowaniu dynamicznego odciążenia górotworu i obserwacji jego skutków ze szczególnym uwzględnieniem wpływu uskoku na ww. proces.

Podążając za opisaną w pracy [2] definicją dynamicznego odciążenia górotworu proponuje się opisać zjawisko odprężenia poprzez „wyzwolenie się” sił wewnętrznych np. na skutek, zamierzonego lub niezamierzonego, naruszenia ciągłości „naprężonego” ciała. Wyładowanie energii połączone jest tutaj z ruchem ciała. W miejscach utraty ciągłości siły wewnętrzne maleją i następuje lokalne odciążenie ciała połączone ze zmianą w czasie stanu naprężenia i odkształcenia. W sposób naturalny uskoki, pęknięcia czy granice ośrodków są miejscami szczególnie predysponowanymi do inicjacji tych zjawisk.

Matematyczne modelowanie zjawisk zachodzących w górotworze, a konkretnie opis i ocena skutków gwałtownego zerwania ciągłości na pewnej powierzchni o osłabionej spójności, istniejącej lub powstającej w trakcie działalności górniczej i powodującej powstanie zjawiska dynamicznego, może być przeprowadzone z zastosowaniem dyskretnych modeli górotworu bazujących na metodach numerycznych. Najpopularniejsze z nich to metoda elementów skończonych, metoda różnic skończonych oraz metoda elementów odrębnych. Najbardziej newralgiczną fazą analizy dynamicznej pozostaje tworzenie modelu komputerowego ze skończoną liczbą elementów i skończoną liczbą stopni swobody, który to model stanowi podstawę do symulowania zachowania się obszaru rzeczywistego. Dla skał o charakterystyce liniowo-sprężystej własności sztywnościowe elementów mogą być wyznaczane bądź przybliżane za pomocą badań eksperymentalnych. Jednak dla wielu obszarów trudno jest ocenić charakter odciążenia dynamicznego, energetyczne własności dyssypatywne oraz warunki brzegowe (graniczne). Szczególnie dla przypadków o pochodzeniu sejsmicznym.

Aby błędy spowodowane modelowaniem ośrodków ciągłych minimalizować — przeprowadza się wielokrotne i różnorakie analizy dynamiczne, używając do tego różnych modeli komputerowych, wariantuje się obciążenia oraz warunki brzegowe i początkowe. Istotne ponadto jest, żeby w analizie dynamicznej stosować programy komputerowe z możliwie dokładną i cyfrowo efektywną metodą rozwiązań.

Stosując metody komputerowe do symulacji zjawisk falowych w ośrodku skalnym musimy spojrzeć na model numeryczny jako zbiór obszarów, warstw, bloków czy minerałów. Zespół takich elementarnych układów mechanicznych ma zróżnicowane własności i różne, często trudne do określenia funkcje przenoszenia. Zgodnie z zasadą Huygensa, jeśli fala napotka cząstkę zdolną do wykonywania drgań, pobudza ją do drgań — cząstka ta staje się źródłem nowej fali elementarnej. Sygnały końcowe rejestrowane w modelu są sumą sygna-

łów wyjściowych wszystkich układów elementarnych składających się na model. Najczęściej jest to więc suma sygnałów zdeterminowanych i sygnałów o charakterze, który porównać można do sygnałów losowych, a te wymagają specyficznej analizy. Wyniki uzyskane z obliczeń modelu można wobec tego analizować w sposób podobny, w jaki analizuje się sygnały losowe. Większość używanych przy tym wzorów i schematów bazuje na fakcie, że dane, które mają być przetwarzane, są przedstawione w postaci szeregu wartości dyskretnych (w czasie), odwzorowujących realizacje stacjonarnych procesów losowych [3].

Skoro właściwy sygnał wyjściowy traktujemy jako zaburzony (zaszumiony) sygnałami pasożytniczymi pochodzenia numerycznego, istnieje konieczność oddzielenia od zniekształceń (szumu) sygnału uważanego za prawdziwy. Staje się to szczególnie konieczne, gdy analizie poddajemy pierwsze czy też drugie pochodne sygnału przemieszczeń (prędkość i/lub przyspieszenie). Rozwiązanie tego problemu można sprowadzić do przepuszczenia sygnału przez filtr cyfrowy (układ o znanej transmitancji). Ponieważ w modelowaniu numerycznym otrzymujemy skończoną liczbę obliczonych wyników, a ponadto podstawowym wymogiem jest liniowość charakterystyki fazowej, proponuje się stosować filtry typu FIR [5].

Do filtracji fal sejsmicznych używa się tzw. filtrów dolnoprzepustowych, tzn. obcinamy wszystkie częstotliwości f powyżej pewnej częstotliwości progowej f_c . Decyzję o wielkości progu f_c podejmuje się na podstawie analizy widmowej Fouriera oraz widmowej gęstości mocy przemieszczeń. Jako wynik modelowania zagadnień dynamicznych otrzymuje się zmienne w czasie przemieszczenia, prędkości i przyspieszenia w wybranych punktach modelu. Dwie ostatnie funkcje, jako pierwsze i drugie pochodne przemieszczeń, mogą być obciążone wyjątkowo dużymi błędami. Próbę identyfikacji ww. błędów podano w pracy [3, 5].

W oparciu o doświadczenia autorów opracowano następującą metodykę rozwiązywania zagadnień dynamicznych w ośrodkach skalnych:

- 1) W oparciu o mechanikę ciała stałego w ujęciu statycznym określa się stan naprężenia i odkształcenia modelu obciążonego siłami stałymi w czasie.
- 2) W oparciu o obliczony stan wyężenia (bądź kryterium stateczności) dokonuje się oceny czy może dojść do lokalnej utraty ciągłości modelu.
- 3) Wprowadza się płaszczyzny lub miejsca osłabionej spójności, na których może dojść do lokalnej utraty ciągłości. Budowę takich płaszczyzn przeprowadza się w oparciu o rozwiązanie zagadnienia kontaktowego.
- 4) Po wprowadzeniu powyższego opisuje się zjawisko odciążenia jako niestacjonarny dynamiczny problem teorii sprężystości. Warunki początkowe i brzegowe wynikają z uwzględnienia powstałej nieciągłości oraz z krytycznego statycznego stanu naprężenia.
- 5) Obliczone wyniki (zwłaszcza sygnały prędkości i przyspieszenia) poddaje się analizie z zastosowaniem cyfrowej filtracji.

Tak przedstawione postępowanie wymaga budowy dwóch modeli obliczeniowych i rozwiązanie ich w oparciu o inne równania równowagi:

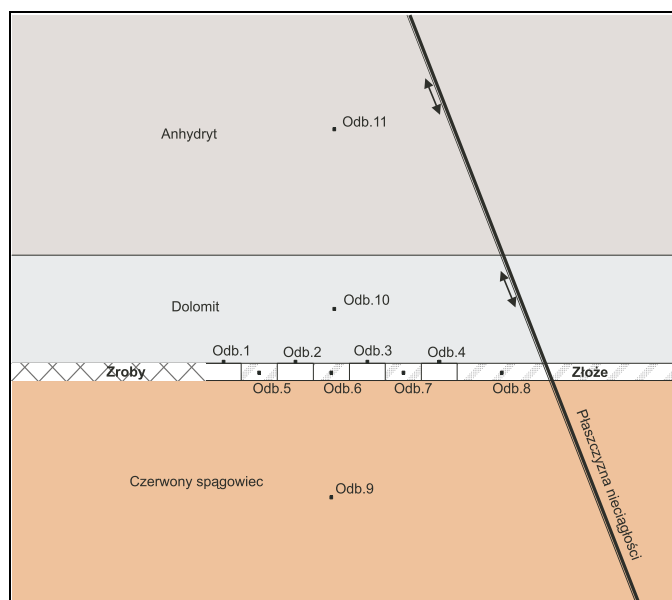
- pierwszy, zakładając ciągłość modelowanego ciała, w ujęciu statycznym
- drugi, uwzględniający nieciągłość, w ujęciu dynamicznym.

Zdefiniowaną tak metodykę stosowano do badania zachowania się górotworu w wybranych warunkach eksploatacji górniczej.

2. Komputerowa symulacja wpływu uskoku na drgania górotworu w sąsiedztwie wyrobisk komorowych

Zachwianie równowagi górotworu, niszczenie jego struktury, pękanie, rozwarstwianie się i związane z tym dynamiczne zachowanie się górotworu ma bezpośredni wpływ na stateczność wyrobisk podziemnych. Spośród wielu możliwych przypadków utraty ciągłości do dalszych rozważań zaproponowano taki, w którym dochodzi do „uruchomienia” dużego uskoku. Z doświadczenia wiadomo, że eksploatacja w rejonie uskoku wiąże się z trudną sytuacją geomechaniczną i często dochodzi do zwiększonej aktywności sejsmicznej. Postawiono zbadać, jak zachowywać będzie się wiązka wyrobisk prowadzona z jednej strony wzdłuż uskoku, a z drugiej strony otoczona zrobami. Ta sytuacja najczęściej doprowadza do uaktywnienia się płaszczyzny poślizgowej nieciągłości i w konsekwencji zmian w stateczności wyrobisk. Przyjęto warunki geologiczne kopalń LGOM, co z jednej strony powoduje, że rozpatrujemy eksploatację jednopokładową, z drugiej jednak strony prowadzona jest ona w otoczeniu skał mocnych i bardzo mocnych (rys. 1).

Do opisu ww. zagadnienia przygotowano model numeryczny z warunkami zaczerpniętymi z kopalń LGOM.



Rys. 1. Schemat ideowy modelu

Model obliczeniowy przygotowano w postaci prostokątnej tarczy o wymiarach 2500 × 1300 m w płaskim stanie odkształcenia (rys. 2). Wiązkę wyrobisk eksploatacyjnych, wokół których dochodzi do inicjacji zjawiska dynamicznego, umiejscowiono w obszarze złoża rud miedzi na głębokości 1000 m. Profil geologiczny w wybranym rejonie zobligował podział tarczy na poziome warstwy, a parametry poszczególnych warstw przyjęte do obliczeń numerycznych przedstawiono w tabeli 1. Furta eksploatacyjna ma wysokość 4 m. Przyjęto model liniowo-sprężysty dla wszystkich warstw.

TABELA 1

Parametry fizykomechaniczne warstw skalnych

Warstwa	Gęstość objętościowa ρ , [kg/m ³]	Moduł Younga E, MPa	Liczba Poissona ν
Pstry piaskowiec	2300	28 500	0,17
Anhydryt	2850	55 500	0,26
Wapienie i dolomity	2450	46 500	0,225
Furta	2450	13 500	0,185
Czerwony spągowiec	2300	6 500	0,14

Założono, że komory i filary mają szerokość 6 m. Filar oddzielający wiązkę wyrobisk od uskoku ma szerokość 15 m. W przypadku symulacji zjawiska drgań górotworu wykorzystano elementy kontaktowe „uruchamiane” poprzez osłabienie wiązań na płaszczyźnie kontaktu. Nachylenie płaszczyzny nieciągłości symulującej uskok pod kątem 20° od pionu zostało przyjęte arbitralnie jako jedno z możliwych.

Zgodnie z proponowaną metodyką obliczenia prowadzono dwuetapowo. Jako pierwszy etap rozwiązano zagadnienie statyczne dla przyjętych warunków początkowych i brzegowych wynikających z sił grawitacyjnych. W efekcie otrzymano stan naprężeń i odkształceń będący stanem wyjściowym do symulacji dynamicznej. Na tym etapie płaszczyzny nieciągłości pozostają niejako sklejone i nie wpływają na ogólny rozkład odkształceń.

Etap drugi — dynamiczny — posłużył do śledzenia zachowań górotworu pod wpływem zmian, jakich dokonywano w modelu. Płaszczyzny nieciągłości przygotowane w odpowiednich miejscach modelu, składające się na uskok, zostają „rozklejone” i może dochodzić na nich do poślizgów i rozdzieleni. Parametry nieciągłości dobrano odpowiednio do otaczających je skał i wprowadzono Coulombowskie tarcie umożliwiające powstawanie zjawiska *slip-stick*. Ze względu na trudności z umiejscowieniem początku (źródła) poślizgu oraz jego zasięgu i czasu trwania, uwolnienie płaszczyzn nieciągłości nastąpiło jednocześnie na całej ich długości. Takie postępowanie jest zgodne z założeniami dynamicznego odciążenia górotworu opisanego wcześniej.

Dyskretyzację przeprowadzono przy pomocy metody różnic skończonych (FLAC ver. 5.0), dzieląc ww. tarczę siatką zagęszczoną wokół wiązki wyrobisk oraz wokół płaszczyzn

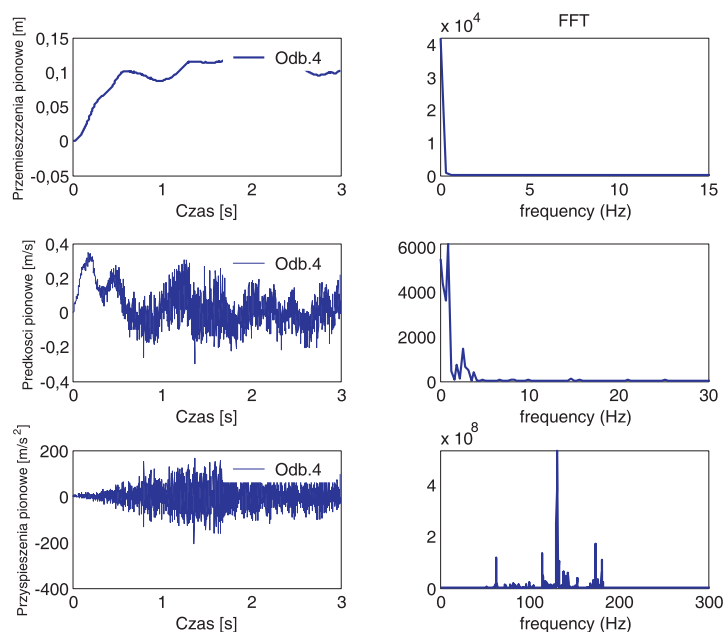
nieciągłości. Nie wprowadzono tłumienia wewnętrznego. Nie zadawano również tłumienia na brzegach modelu [1].

Aby dokonać obserwacji zmian zachodzących w górotworze, umieszczono jedenaście odbiorników w wybranych punktach modelu:

- odb. 1–4 — w stropach komór,
- odb. 5–8 — w filarach międzykomorowych,
- odb. 9–11 — w warstwach otaczających złożę (–60 m pod złożem, +5 m i +60 m nad złożem).

Lokalizację odbiorników przedstawiono na rysunku 1. Czas obserwacji w ww. odbiornikach wynosił 3 sekundy, a krok czasowy został dobrany automatycznie w programie FLAC [1].

Obserwowano w modelu przemieszczenia poziome i pionowe. Jak wcześniej opisano, wyniki te traktujemy jako zaburzone i przeprowadzamy ich analizę częstotliwościową (rys. 2). Powyższe rysunki uzupełniono o obliczone wyniki prędkości i przyspieszeń wraz z ich widmami częstotliwościowymi.



Rys. 2. Przemieszczenia, prędkości i przyspieszenia pionowe w odb. 4 oraz ich widma częstotliwościowe

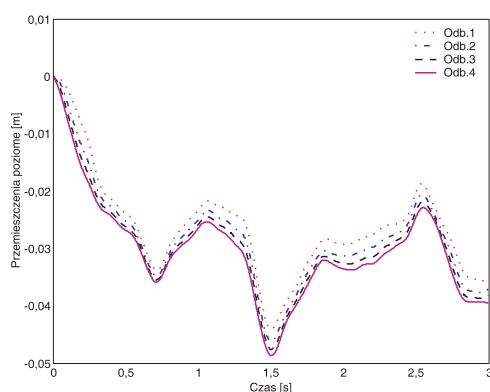
Zastosowano odfiltrowanie błędów numerycznych metodą filtru dolnoprzepustowego. Na podstawie analiz widm częstotliwościowych oraz funkcji widmowej gęstości mocy przemieszczeń zbudowano dolnoprzepustowy filtr cyfrowy typu FIR. Częstotliwości odcięcia

ustalono na poziomie $f_c = 10$ Hz. Tak zbudowany filtr stosowano do sygnałów przemieszczeń. Z sygnału przemieszczeń po filtracji wyznaczano wartości prędkości i przyspieszeń. Operacje cyfrowego przetwarzania wyników realizowano przy pomocy programu MATLAB.

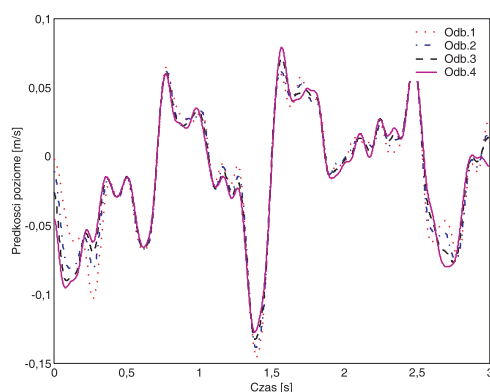
Filtracja wyników pozwoliła przedstawić wykresy zawierające zmiany w czasie składowej poziomej i pionowej przemieszczeń, prędkości i przyspieszeń obserwowanych w odbiornikach odb. 1, odb. 2, odb. 3 i odb. 4. Wykresy te zebrano dla wartości poziomych na rysunkach 3–5, a dla wartości pionowych na rysunkach 6–8.

Prócz przemieszczeń interesujące wydają się zmiany stanu naprężenia w filarach (odb. 5–8). Do rejestrowanych w modelu naprężeń również zastosowano cyfrową filtrację wcześniej zbudowanym filtrem dolnoprzepustowym. Wykresy zmian naprężeń pionowych w filarach zebrano na rysunku 9.

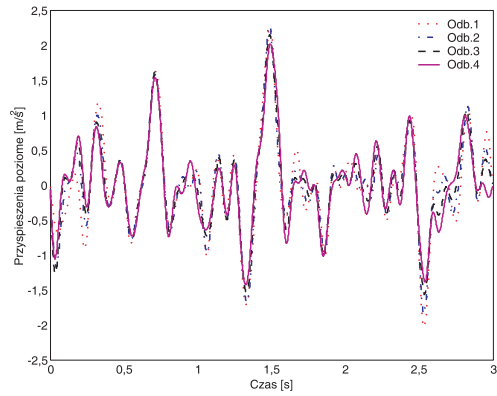
Do pełniejszego obrazu zachowania się górotworu w ww. warunkach dołączono przyrosty naprężeń w warstwach sąsiednich — odb. 9–11. Tu również stosowano cyfrową filtrację. Wykresy zmian naprężeń pionowych i poziomych stropie i spągu zebrano na rysunku 10 i 11.



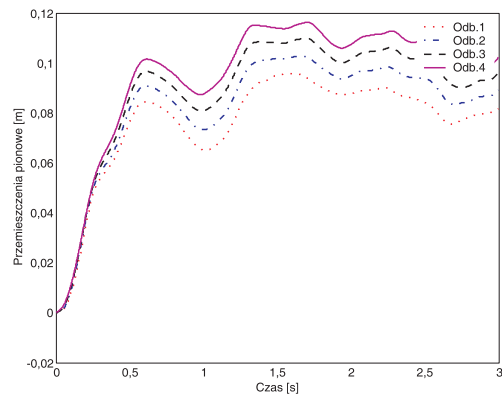
Rys. 3. Przemieszczenia poziome w odb. 1–4



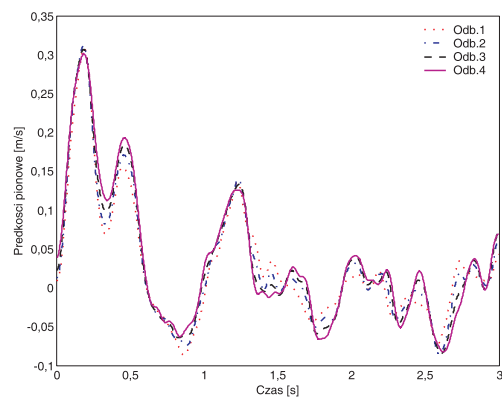
Rys. 4. Prędkości poziome w odb. 1–4



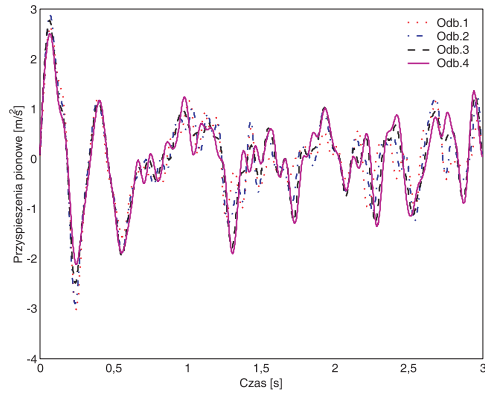
Rys. 5. Przyspieszenia poziome w odb. 1–4



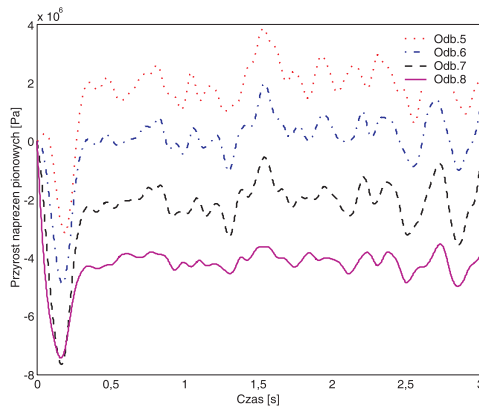
Rys. 6. Przemieszczenia pionowe w odb. 1–4



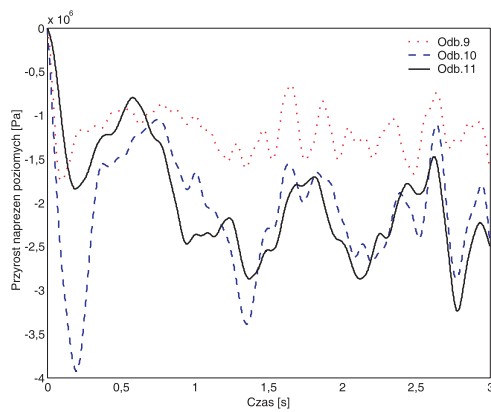
Rys. 7. Prędkości pionowe w odb. 1–4



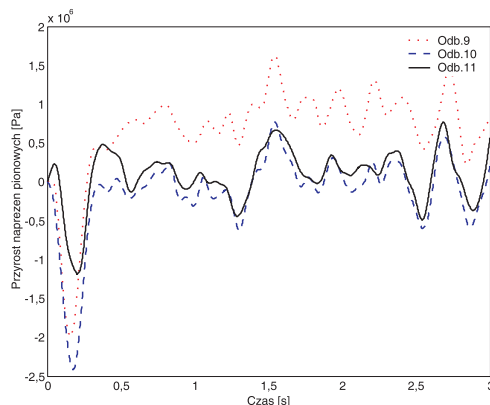
Rys. 8. Przyspieszenia pionowe w odb. 1–4



Rys. 9. Zmiany naprężeń pionowych w filarach — odb. 5–8



Rys. 10. Zmiany naprężeń poziomych odb. 9–11



Rys. 11. Zmiany naprężeń pionowych odb. 9–11

3. Spostrzeżenia i wnioski

Sygnały przemieszczeń, prędkości, a szczególnie przyspieszeń rejestrowane w modelu obciążone są błędami natury numerycznej. Jak pokazuje rysunek 2, następuje przesunięcie częstotliwości dominujących w stronę częstotliwości wyższych. Cyfrowa filtracja efektywnie eliminuje te błędy. Sytuacja górnictwo-geologiczna symulowana tutaj, a szczególnie czynny uskok generują zmiany w czasie stanu przemieszczeń i naprężeń w obrębie modelowanych wyrobisk. Analizując bardziej szczegółowo zachowanie się górotworu można zauważyć, że największe przemieszczenia w odbiornikach umieszczonych na stropach komór rejestruje się w odb. 4. Przemieszczenia pionowe osiągają tutaj 12 cm. W fazie początkowej obserwuje się przemieszczenie w górę. Prędkości osiągają wartość 30 cm/s, a przyspieszenia wykazujące przed filtrowaniem największy udział częstotliwości wyższych w największym stopniu zredukowały swe amplitudy i osiągają wartość 3 m/s.

Największy przyrost naprężeń ściskających obserwuje wewnątrz filara przyuskokowego. Zarejestrowano tutaj skok naprężeń o 7 MPa. Spośród skał otaczających komory — strop bezpośredni i zalegająca w nim warstwa dolomitów podlega największemu przyrostowi naprężeń ściskających i sięgają 4 MPa.

Obserwowane zmiany stanu przemieszczenia i naprężenia w modelu, jakkolwiek mają charakter jakościowy, to wyraźnie sugerują możliwość spękań górotworu i zniszczeń rozpatrywanej grupy komór. Prowadzenie wyrobisk w strefie przyuskokowej musi być zatem poprzedzone szczególnie wnikliwą analizą miejscowej sytuacji górnictwo-geologicznej.

Analiza przedstawionych zagadnień pozwala stwierdzić, że istnieje możliwość skutecznego modelowania dynamicznego odciążenia górotworu. Możliwa jest minimalizacja błędów obliczeń numerycznych, a w szczególności obliczeń prędkości i przyspieszeń wybranych punktów górotworu. Wydaje się, że cyfrowe filtrowanie jest efektywnym narzędziem do przetwarzania wyników obliczeń. Należy nadmienić, że uzupełnienie tych rozważań o analizę falkową [4] doprowadza do dalszej poprawy jakości otrzymanywnych wyników.

LITERATURA

- [1] Itasca Consulting Group Inc.: Fast Lagrangian Analysis of Continua v. 5.0, Users Manual, Minneapolis 2000
- [2] *Walaszczyk J.*: O pewnych możliwościach zastosowania metod numerycznych do zagadnienia odprężeń górotworu, ZN AGH Górnictwo z. 107, Kraków, 1980
- [3] *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
- [4] *Walaszczyk J., Barnat A., Hachaj S.*: Wykorzystanie analizy falkowej do identyfikacji zniekształceń sygnałów otrzymanych z modeli numerycznych MES., Geotechnika i Budownictwo Specjalne, 2004, Wyd. KGBiG AGH, Kraków, 2004
- [5] *Wiewiórka D.*: Komputerowe modelowanie skutków dynamicznego odciążenia górotworu, AGH, Kraków, 2003, (rozprawa doktorska, niepublikowana)