

# Ocena możliwości uzyskania konstruktywnej interferencji drgań pochodzących od robót strzałowych

## Assessment of the possibility to obtain constructive vibration interference from blasting



*Dr hab. inż. Józef Kabiesz, prof. GIG\**



*Dr hab. inż. Adam Lurka, prof. GIG\**

**Treść:** Roboty strzałowe są przedsięwzięciami powszechnie stosowanymi w górnictwie, szczególnie przy drażeniu wyrobisk, urabianiu złoże oraz jako profilaktyka zagrożenia sejsmicznego i tąpnięciami. Zwykle praktyczna ich realizacja obejmuje celowy rozkład otworów strzałowych oraz sekwencję czasową ich odpalania. Treścią artykułu jest próba określenia warunków i możliwości takiej koordynacji prowadzenia robót strzałowych w warunkach podziemnego górnictwa rud miedzi, aby uzyskać w wybranym obszarze górotworu efekt konstruktywnej interferencji drgań wywołanych strzelaniami. Efekt ten powinien poprawić skuteczność strzelań, szczególnie przy próbach prowokowania występowania silnych wstrząsów sejsmicznych. Artykuł przedstawia teoretyczne założenia uzyskiwania efektu interferencji, wyniki prób jego modelowania oraz wstępne rezultaty praktycznych eksperymentów przeprowadzonych w jednej z kopalń rud miedzi.

**Abstract:** Blasting is a commonly used method in underground mining, particularly in driving underground galleries, deposit extraction and prevention from seismic and rockburst hazard. In practice, blasting consist in appropriate arrangement of the geometry of blast holes and time sequence of individual blast holes. This paper presents the possibility of electronic time synchronization of individual blast holes in order to obtain constructive interference of the generated seismic waves in copper underground mine in Poland. This synchronization should improve blasting effectiveness for inducing strong seismic events in the mine. Some theoretical aspects of longitudinal seismic wave interference are introduced and measurement results of interference effect of seismic waves generated by blasting in one of the copper mine in Poland are presented.

### Słowa kluczowe:

*górnictwo, roboty strzałowe, interferencja fal sejsmicznych*

### Key words:

*mining, blasting, interference of seismic waves*

## 1. Wprowadzenie

Jednym z istotnych efektów robót strzałowych są rozprzestrzeniające się w ośrodku skalnym drgania mechaniczne w postaci sprężystych fal podłużnych. To charakterystyczne zjawisko jest najczęściej traktowane jako niepożądany efekt uboczny, źle wpływający na stan infrastruktury znajdującej się w zasięgu ich oddziaływania [1]. Są jednak także przykłady jego wykorzystywania w niektórych praktycznych zastosowaniach robót strzałowych, np. jako źródło wzbudzenia górotworu do drgań w badaniach geofizycznych. W górnictwie podziemnym efekt ten jest stosowany dla prowokowania występowania wstrząsów sejsmicznych. W ten sposób poddaje

się kontroli czas wystąpienia zagrożenia – eliminuje się ich wpływ na ludzi zatrudnionych pod ziemią.

Prowokowanie powstawania wstrząsów sejsmicznych poprzez wykonywanie robót strzałowych w swojej istocie może polegać na zaburzeniu stanu równowagi niestatecznych fragmentów górotworu poprzez:

- osłabienie struktury (obniżeniu własności wytrzymałościowych skał) krytycznie wyęźżonego fragmentu górotworu,
- zwiększenie stanu lokalnych naprężeń w górotworze,
- wymuszenie ruchu fragmentów górotworu będących w stanie równowagi chwiejnej.

Wynikiem wykonywania robót strzałowych może być więc zachwianie równowagi określonego fragmentu górotworu i związane z tym dynamiczne wyzwolenie zgromadzonej energii sprężystej. Z tego powodu sposób przeprowadzania

\* ) Główny Instytut Górnictwa, Katowice.

w kopalniach profilaktycznych robót strzałowych, a w szczególności ich efektywność, jest zagadnieniem istotnym. W niniejszym artykule przedstawiono rozważania i efekty pierwszych prób poprawy skuteczności strzelań wskutek efektów nakładania się drgań wywołanych odpalaniem w otworach wiertniczych ładunków materiałów wybuchowych.

## 2. Warunki interferencji

Oddziaływanie na górotwór drgań pochodzących od robót strzałowych w kontekście prowokowania wystąpienia wstrząsów opisują dwie kategorie zjawisk.

Pierwsza z nich dotyczy zmiany stanu skrajnie wyężonych obszarów skał, co może doprowadzać do przekraczania ich wytrzymałości i gwałtownego rozpadu (np. „eksplozja” calizny węglowej, pęknięcie warstw mocnych skał), skutkującego wyzwoleniem dużych ilości energii sprężystej – silnego wstrząsu sejsmicznego.

Druga kategoria oddziaływania dotyczy inicjowania przez drgania falowe utraty stateczności wydzielonych fragmentów naruszonego tektoniką lub/i eksploatacją górotworu. Uwolnione jego części przemieszczają się, dzięki sile grawitacji, w kierunku pustych przestrzeni, najczęściej wytworzonych przez wcześniej prowadzoną eksploatację. W momencie wyhamowywania ich ruchu energia kinetyczna przekształca się w inne rodzaje energii, w tym w energię sprężystych drgań, kreując wstrząs sejsmiczny. Przemieszczone fragmenty górotworu osiągają nowy, bardziej stabilny stan równowagi.

Przedstawione scenariusze są konsekwencją utraty przez określone fragmenty górotworu stanu równowagi. Jej utrata jest inicjowana przez dynamiczne oddziaływanie drgań powstających w wyniku robót strzałowych. Zasadniczą rolę odgrywa w takich sytuacjach ilość energii wyrażona dla fal sejsmicznych poprzez gęstość strumienia energii dostarczanej przez drgania do miejsc o bliskim krytycznego stanie wyężenia. Gęstość strumienia energii jest, jak wiadomo, proporcjonalna do kwadratu amplitudy prędkości drgań cząstek ośrodka  $v$ , przy czym istotne jest, aby amplitudy te były jak największe w obszarach równowagi chwiejnej lub metastabilnej w odpowiednich fragmentach górotworu [8]. Im większe wartości tych parametrów, tym większe prawdopodobieństwo przekroczenia krytycznych wartości wytrzymałościowych w górotworze. Jedną z możliwości uzyskania takich efektów, bez zwiększania mocy odpalanych ładunków materiału wybuchowego, jest uzyskiwanie efektu konstruktywnej interferencji drgań pochodzących z różnych miejsc (otworów wiertniczych, przodków) prowadzenia robót strzałowych.

### 2.1. Podstawy teoretyczne interferencji podłużnych fal sejsmicznych

Podstawowe fale sejsmiczne, jakie powstają podczas stosowania materiałów wybuchowych w górnictwie, to fale podłużne. Fale te można scharakteryzować poprzez amplitudy prędkości drgań cząstek ośrodka oraz poprzez ich widmo częstotliwościowe. Z uwagi na to, że zjawisko interferencji opisywane jest dla fal monochromatycznych, czyli o jednej częstotliwości, przyjęto założenie, że powstające drgania można opisać poprzez widmo fourierowskie o ustalonej częstotliwości dominującej.

Interferencją to zjawisko powstawania przestrzennego rozkładu amplitud fal na skutek nakładania się, czyli tak zwanej superpozycji dwóch lub więcej rozkładów fal w przestrzeni o takim samym lub podobnym rozkładzie częstotliwości wokół częstotliwości dominującej. Fundamentalnym faktem

wykorzystywanym przy opisie zjawiska interferencji jest założenie o liniowości mówiące, że sumaryczny ruch fałowy nakładających się drgań fałowych jest ich algebraiczną sumą. Widoczne to jest najlepiej dla jednowymiarowego równania fałowego

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{1}{c} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (1)$$

gdzie:

- $u$  – funkcja fałowa opisująca zmienność amplitud drgań w czasie i przestrzeni,
- $c$  – prędkość propagacji fali.

Rozwiązaniem tego równania jest każda funkcja postaci

$$f(x - ct) + g(x + ct) \quad (2)$$

gdzie:

- $f$  i  $g$  – dowolne funkcje opisujące zmienność amplitud w czasie i przestrzeni.

Rozwiązanie (2) równania (1) reprezentuje propagację dwóch fal biegnących wzdłuż osi  $x$  w przeciwnych kierunkach. Liniowość wyraża się poprzez cechę równania (1) mówiącą, iż jeżeli mamy dwa rozwiązania tego równania  $f_1$  i  $f_2$ , to również suma tych funkcji jest rozwiązaniem równania fałowego (1).

Należy jednak podkreślić, że zjawisko interferencji różnych typów fal zachodzi nie tylko na podstawie założenia o liniowości ruchu fałowego, ale także na podstawie założenia o podobnej charakterystyce częstotliwościowej kilku różnych fal. Najsilniejsza interferencja zachodzi wtedy, gdy mamy do czynienia z falami o jednej, ustalonej częstotliwości drgań.

W najprostszym przypadku interferencja zachodzi dla dwóch źródeł drgań, które generują taką samą częstotliwość drgań, a różnią się amplitudą oraz fazą

$$\begin{aligned} f_1 &= A_1 e^{i(\omega t + \varphi_1)} \\ f_2 &= A_2 e^{i(\omega t + \varphi_2)} \end{aligned} \quad (3)$$

gdzie:

- $f_1, f_2$  – czasowa zmienność amplitud drgań w tym samym punkcie przestrzeni dla dwóch źródeł drgań,
- $\omega$  – częstotliwość drgań,
- $A_1, A_2$  – maksymalne amplitudy drgań dla fali 1 i 2,
- $\varphi_1, \varphi_2$  – fazy drgań dla fali 1 i 2.

Jeżeli założymy, że amplitudy  $A_1$  i  $A_2$  są sobie równe i wynoszą  $A$  wtedy wynikowa amplituda drgań pochodzących od fal 1 i 2, na podstawie liniowości, będzie miała postać

$$W = f_1 + f_2 = A \cos(\omega t + \varphi_1) + A \cos(\omega t + \varphi_2) \quad (4)$$

Równanie 4 po prostych przekształceniach można zapisać jako

$$W = 2A \left[ \cos \frac{1}{2} (\varphi_1 - \varphi_2) \cos \left( \omega t + \frac{1}{2} \varphi_1 + \frac{1}{2} \varphi_2 \right) \right] \quad (5)$$

Równanie (5) pokazuje w sposób jawny, że wynikowa amplituda drgań  $W$  jest falą, która drga nadal z częstotliwością  $\omega$ , natomiast nowa amplituda drgań wynosi  $2A \cos \frac{1}{2} (\varphi_1 - \varphi_2)$  i zależy od faz drgania fal 1 i 2. Oznacza to, że sterując fazami źródeł fal  $\varphi_1, \varphi_2$  możemy wpływać na amplitudy drgań wynikowych. Stanowi to podstawową właściwość, która może być wykorzystana przy tworzeniu konstruktywnej interferencji drgań dla fal sejsmicznych, powstałych w wyniku odpalania ładunków wybuchowych.

W celu otrzymania bardziej ogólnego wzoru na interferencję należy skorzystać z aparatu, jaki dostarczają liczby zespolone. Formuła (3) przyjmuje wtedy postać [2]

$$\begin{aligned} f_1 &= A_1 e^{i(\omega t + \varphi_1)} \\ f_2 &= A_2 e^{i(\omega t + \varphi_2)} \end{aligned} \quad (6)$$

gdzie:

$e$  – liczba Eulera,

$i$  – jednostka urojona o właściwości  $i^2 = -1$ .

Przy takim zapisie sumaryczna amplituda drgań wynosi

$$W = f_1 + f_2 = A_1 e^{i(\omega t + \varphi_1)} + A_2 e^{i(\omega t + \varphi_2)} = (A_1 e^{i\varphi_1} + A_2 e^{i\varphi_2}) e^{i\omega t} \quad (7)$$

Związek (7) pozwala wyrazić sumaryczną amplitudę drgań, która zmienia się jak moduł wielkości  $A_1 e^{i\varphi_1} + A_2 e^{i\varphi_2}$ .

Widać także, że drgania nadal mają charakter oscylacyjny w czasie z częstotliwością  $\omega$ .

Przedstawione w postaci (7) drgania można uogólnić do przypadku  $n$  źródeł drgań. Wtedy sumaryczna amplituda tych drgań wyraża się w postaci

$$W = f_1 + f_2 + \dots + f_n = e^{i\omega t} \sum_{k=1}^n A_k e^{i\varphi_k} \quad (8)$$

Moduł wartości  $\sum_{k=1}^n A_k e^{i\varphi_k}$  wyraża wypadkową amplitudę oscylacji  $n$  drgań z częstotliwością  $\omega$  i jak widać jest zależny tylko od faz poszczególnych drgań. Tak więc mając wpływ na fazy generowanych drgań możemy wpływać na wypadkową, maksymalną amplitudę drgań. Stanowi to istotę metody synchronizacji drgań sejsmicznych pochodzących od strzelania materiałami wybuchowymi. Należy przy tym pamiętać, że związek (8) zachodzi dla interferencji fal monochromatycznych i w przypadku fal o pewnym rozkładzie częstotliwości interferencja będzie miała charakter bardziej złożony.

Podstawowe fale sejsmiczne generowane materiałami wybuchowymi to fale podłużne, które w ogólności mają charakter wektorowy. Założono więc, że fale generowane w  $n$  miejscach ładunkami wybuchowymi są falami podłużnymi o charakterze wektorowym, które można synchronizować czasowo w wybranym punkcie przestrzeni wpływając w ten sposób na fazy ich drgań, a poprzez to na ich interferencję. Związek (8) dotyczący interferencji  $n$  drgań typu skalarnego należy uogólnić na interferencję dla fal wektorowych. W tym celu skalarnie funkcje  $f_1, f_2, \dots, f_n$  należy zastąpić wektorowymi o postaci

$$\begin{aligned} \vec{f}_1 &= \vec{A}_1 e^{i(\omega t + \varphi_1)} \\ \vec{f}_2 &= \vec{A}_2 e^{i(\omega t + \varphi_2)} \\ &\dots \\ \vec{f}_n &= \vec{A}_n e^{i(\omega t + \varphi_n)} \end{aligned} \quad (9)$$

gdzie:

$\vec{A}_1, \vec{A}_2, \dots, \vec{A}_n$  – wektorowe, maksymalne amplitudy drgań o składowych

$$(A_{1x}, A_{1y}, A_{1z}), (A_{2x}, A_{2y}, A_{2z}), \dots, (A_{nx}, A_{ny}, A_{nz})$$

Wtedy formuła (8) przybiera postać

$$W = \vec{f}_1 + \vec{f}_2 + \dots + \vec{f}_n = e^{i\omega t} \sum_{k=1}^n \vec{A}_k e^{i\varphi_k} \quad (10)$$

Wzór (10) jest podstawowym związkiem, który jest używany do modelowych obliczeń interferencji monochromatycznych lub pseudomonochromatycznych podłużnych fal sejsmicznych. Podstawową różnicą między tym równaniem a równaniem (8), opisującym interferencję w optyce, jest sumowanie wartości wektorowych  $\vec{A}_1, \vec{A}_2, \dots, \vec{A}_n$  w przypadku fal sejsmicznych.

Ostatnim czynnikiem, jaki należy uwzględnić podczas propagacji podłużnych fal sejsmicznych, jest krzywoliniowość rozchodzenia się promieni sejsmicznych w ośrodkach niejednorodnych. W takim przypadku należy przy sterowaniu fazami  $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n$  drgań sejsmicznych od poszczególnych fal uwzględnić w obliczaniu czasu propagacji fal krzywoliniowość tych promieni. W ogólności czas przebiegu fali sejsmicznej w ośrodku niejednorodnym wyraża się przez zasadę Fermata

$$t = \min_{\gamma} \int_{\gamma} \frac{ds}{V(x, y, z)} \quad (11)$$

gdzie  $\gamma$  jest krzywą w przestrzeni o tej właściwości, że czas przejścia fali wzdłuż tej krzywej jest minimalny [9, 3].

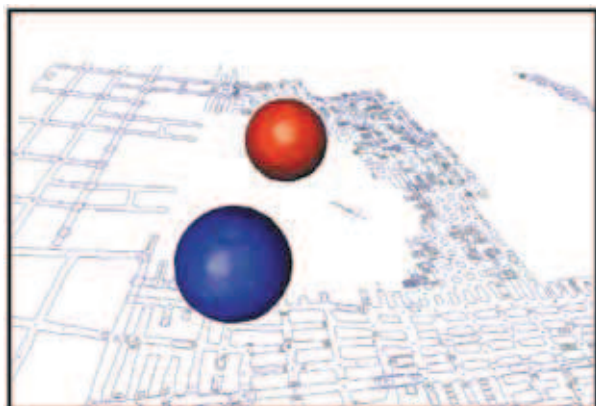
### 3. Modelowanie interferencji podłużnych fal sejsmicznych

Interferencja fal sejsmicznych opisana za pomocą związku (10) i przy założeniu niejednorodności ośrodka jest procesem dość skomplikowanym. Generalnie nie istnieją żadne proste matematyczne formuły, pozwalające w łatwy sposób przedstawiać to zjawisko. Aby poznać ten proces, należy uciec się do numerycznych obliczeń modelowych, które pozwolą w sposób przejrzysty zobrazować najbardziej typowe efekty interferencji. W związku z tym dla wybranego przykładu eksploatacji w kopalni rud miedzi zbudowano modele 2D i 3D i przeprowadzono obliczenia dla czterech rodzajów ośrodków: jednorodnego o stałej wartości prędkości fali sejsmicznej 5100 m/s, niejednorodnego z anomalią wysokoprędkościową, niejednorodnego z anomalią niskoprędkościową, oraz niejednorodnego z anomalią nisko- i wysokoprędkościową (rys. 1). Anomalie te opisane są kulami o średnicy 100 metrów o środku w wybranym na poziomie eksploatacji punkcie, przy czym wartość prędkości wewnątrz kuli dla anomalii niskoprędkościowej wynosi 4100 m/s, natomiast dla anomalii wysokoprędkościowej wynosi 6100 m/s. Otaczający kule ośrodek jest jednorodny o wartości prędkości fali sejsmicznej 5100 m/s. Obliczenia wykonano dla 2 i 6 źródeł fal. Na kolejnych rysunkach 2, 3 i 4 przedstawiono wyniki modelowania interferencji fal dla wariantu płaskiego i przestrzennego z dwoma i sześcioma źródłami drgań w ośrodku jednorodnym (rys. 2) i w ośrodku z dwoma anomaliami nisko- i wysokoprędkościowymi (rys. 3 i 4).

Na podstawie wykonanych pomiarów sejsmicznych w badanym rejonie przyjęto do modelowania interferencji, że dominująca częstotliwość drgań wywołanych odpaleniem pojedynczych otworów strzelniczych wynosi około 150 Hz, co zostało uwzględnione w modelowaniu. Wynikami uzyskanych obliczeń są obrazy intensywności interferencji drgań wyskalowane w przedziale od 0 do 1. Maksymalna interferencja konstruktywna jest wykazywana jako wartość 1, natomiast 0 oznacza całkowite wygaszenie amplitud drgań, czyli maksymalną interferencję destruktywną.

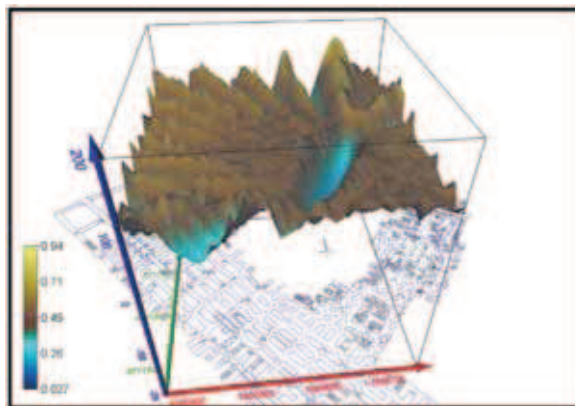
Wykonane obliczenia modelowe interferencji dla podłużnych fal sejsmicznych pozwalają stwierdzić, że:

- sterowanie fazami drgań poszczególnych źródeł sejsmicznych pozwala wzmocnić drgania w **wybranym miejscu** analizowanego obszaru,
- istnieje wyraźny wpływ na zjawisko interferencji niejednorodności ośrodka skalnego oddziałując na formowanie się obrazów interferencji drgań,
- zwiększanie liczby źródeł drgań wpływa na formowanie się pola intensywności interferencji.



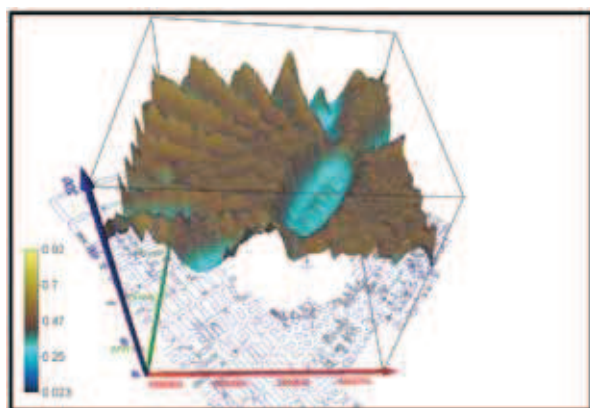
Rys. 1. Model ośrodka ( $v = 5100$  m/s) z anomalią niskoprędkościową (kolor niebieski;  $v = 4100$  m/s) i wysokoprędkościową (kolor czerwony;  $v = 6100$  m/s)

Fig. 1. Constant seismic velocity model ( $V=5100$  m/s) with high velocity volume (blue color,  $V=4100$  m/s) and low velocity volume (red color,  $V=6100$  m/s)

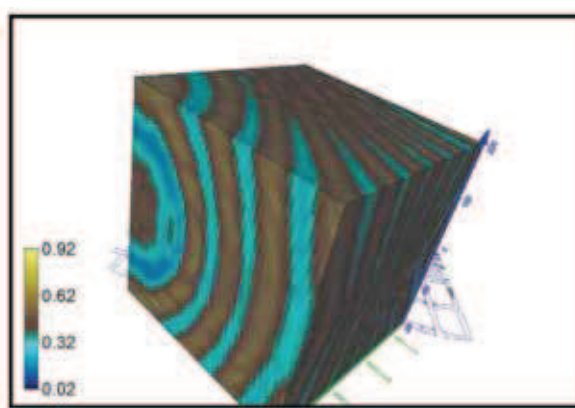


Rys. 2. Wynik modelowania intensywności interferencji drgań sejsmicznej fali podłużnej P na poziomie eksploatacji złoża dla dwóch źródeł sejsmicznych w ośrodku jednorodnym

Fig. 2. Numerically calculated intensity of interference in medium of constant velocity model. Two seismic sources used



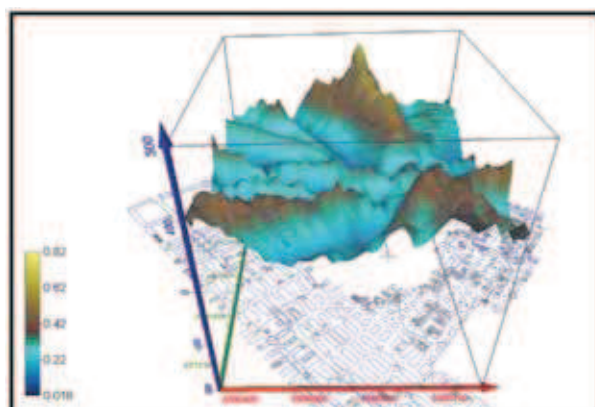
a)



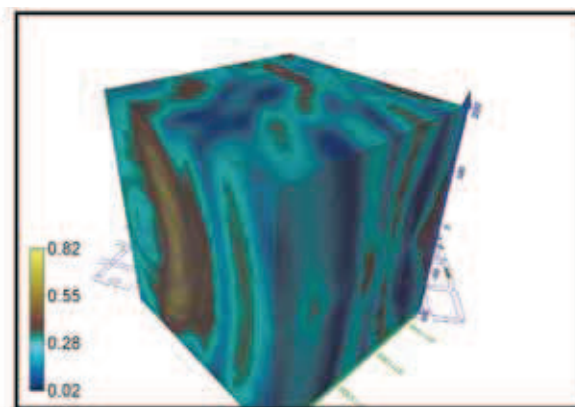
b)

Rys. 3. Wynik modelowania 2D (a) i 3D (b) intensywności interferencji drgań sejsmicznej fali podłużnej P na poziomie eksploatacji złoża dwóch źródeł sejsmicznych i dwóch anomalii: wysokoprędkościowej i niskoprędkościowej

Fig. 3. Numerically calculated intensity of interference in medium of constant velocity model with high and low velocity volumes. Two seismic sources used



a)



b)

Rys. 4. Wynik modelowania 2D (a) i 3D (b) intensywności interferencji drgań sejsmicznej fali podłużnej P na poziomie eksploatacji złoża dla sześciu źródeł sejsmicznych i dwóch anomalii: wysokoprędkościowej i niskoprędkościowej

Fig. 4. Numerically calculated intensity of interference in medium of constant velocity model with high and low velocity volumes. Six seismic sources used

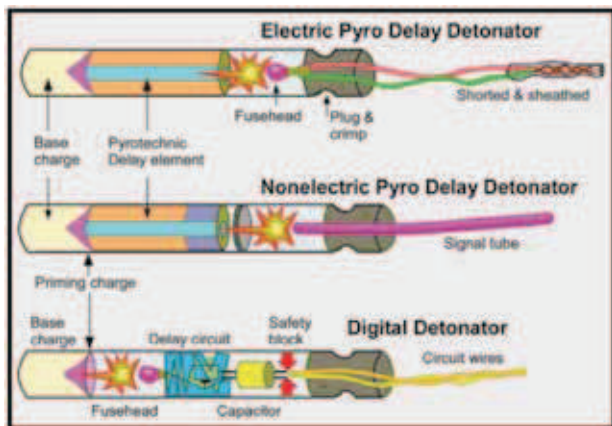
Załączone obrazy pokazują wyraźnie zjawisko znane z optyki, że ze wzrostem liczby źródeł sejsmicznych wzrasta tzw. kierunkowość interferencji [2]. Przejawia się to tym, że zwiększanie liczby źródeł drgań wyraźnie preferuje interferencje w określonych kierunkach.

#### 4. Praktyczna możliwość sterowania fazami drgań generowanych przez roboty strzałowe

Fale sejsmiczne generowane robotami strzałowymi interferują, wzmacniając i osłabiając wartości amplitud. Tym samym ich oddziaływanie na górotwór w aspekcie inicjowania wstrząsów sejsmicznych jest pochodną uśrednionych wartości amplitud drgań. Interferencja fal sejsmicznych jest utrudniona między innymi poprzez nieskoordynowane rozprzestrzenianie drgań w górotworze. Jest to spowodowane „przypadkowymi” czasami inicjowania wybuchów MW i generowania sprężystych drgań ośrodka skalnego jako skutku eksplozji ładunków MW rozmieszczanych w określonych konfiguracjach geometrycznych. Określenie „przypadkowe” należy rozumieć jako zbyt duże wartości opóźnień (zwłok) w dotychczasowych systemach inicjacji MW i brak dokładności w określaniu czasów tych inicjacji. Dla precyzyjnego sterowania fazami drgań niezbędne jest zapewnienie bardzo precyzyjnego sterowania czasami odpalania poszczególnych ładunków MW.

Możliwość precyzyjnego sterowania czasami odpalania ładunków MW jest zagadnieniem czysto technicznym. Rozwiązania w postaci np. klasycznych zapalników (systemów odpalania) milizwłocnych nie zapewniają odpowiedniej dokładności, która powinna być rzędu 1 milisekundy lub nawet mniej. Możliwe do uzyskania opóźnienia międzystrzałowe dla systemów elektrycznych wynoszą 25 ms, dla systemów nieelektrycznych teoretycznie rzędu kilku ms przy znacznej tolerancji rzeczywistych czasów opóźnień. Należy w tym miejscu wspomnieć, że prędkości rozchodzenia się postrzałowych fal sejsmicznych w sprężystych skałach typu dolomit, anhydryt mogą sięgać 6000 m/s, co oznacza, że w okresie 1 ms fala taka pokonuje dystans 6 m.

Ostatnio, po skonstruowaniu i rozpoczęciu produkcji elektronicznych systemów inicjacji MW [5], pojawiła się możliwość praktycznego zrealizowania takich wymogów. Dla dostępnego na rynku systemu i-kon™ firmy ORICA [6, 7] czas opóźnienia może wynosić 1 ms przy dokładności  $\pm 0,05$  ms w zakresie opóźnień 0÷500 ms. System taki składa się z trzech podstawowych elementów: zapalnika elektronicznego,



Rys. 5. Budowa podstawowych rodzajów zapalników wg (Miller, Martin 2008)

Fig. 5. Schematic diagram of basic detonator types (Miller, Martin 2008)

go, urządzenia logującego oraz zapalarki. Najważniejszym elementem systemu jest zapalnik wyposażony w elektroniczny, programowalny układ zastępujący klasyczny element opóźniający. Różnica w budowie zapalników elektronicznych, elektrycznych i nieelektrycznych wynika bezpośrednio z całkowicie odmiennej idei przekazywania sygnału inicjującego wysyłanego od urządzenia odpalającego do zapalnika oraz sposobu osiągnięcia wymaganego opóźnienia milisekundowego. Jest ono realizowane przez układ scalony i zaimplementowane w nim oprogramowanie, a nie za pomocą reakcji chemicznych. Elektroniczny element opóźniający w zapalniku znajduje się przed tzw. „główką zapalczą”. Budowę podstawowych rodzajów zapalników przedstawiono na rysunku 5.

#### 5. Eksperymenty *in situ*

Wykorzystując przedstawione możliwości techniczne elektronicznego sterowania inicjacją MW przeprowadzono w wybranym oddziale kopalni rudy miedzi testowe strzelania i tak (rys. 1):

- odpalenie kolejno dwóch otworów strzałowych i cyfrową rejestrację wywołanych drgań oraz pomiar czasów przejścia drgań do wybranych punktów (sond) pomiarowych,
- odpalenie dwóch otworów z opóźnieniem wynikającym z pomiaru czasów przejścia fal i rejestracją drgań w wybranych punktach pomiarowych,
- analizę otrzymanych wyników rejestracji.

Poligon pomiarowy wyposażono w system rejestracji SOS [4] z 16 trójskładowymi stanowiskami rejestracji fal sejsmicznych (rys. 6). Otwory strzałowe zlokalizowano w przodkach oznaczonych na rysunku 6 symbolami „górnicych młotków”. Symbole G-1 – G-16 oznaczają lokalizację sond rejestrujących.

Strzelania wykonano w trzech następujących po sobie cyklach. W każdym cyklu odpalano po jednym otworze w przodku, w którym umieszczano po 2 kg MW. W pierwszym cyklu odpalono otwory w przodkach w odstępach czasu 5000 ms. Cyfrowa rejestracja tych strzelań pozwoliła na dokładne określenie opóźnień czasowych, które użyto w następnych dwóch cyklach do uzyskania interferencji sygnałów pochodzących z dwóch przodków.



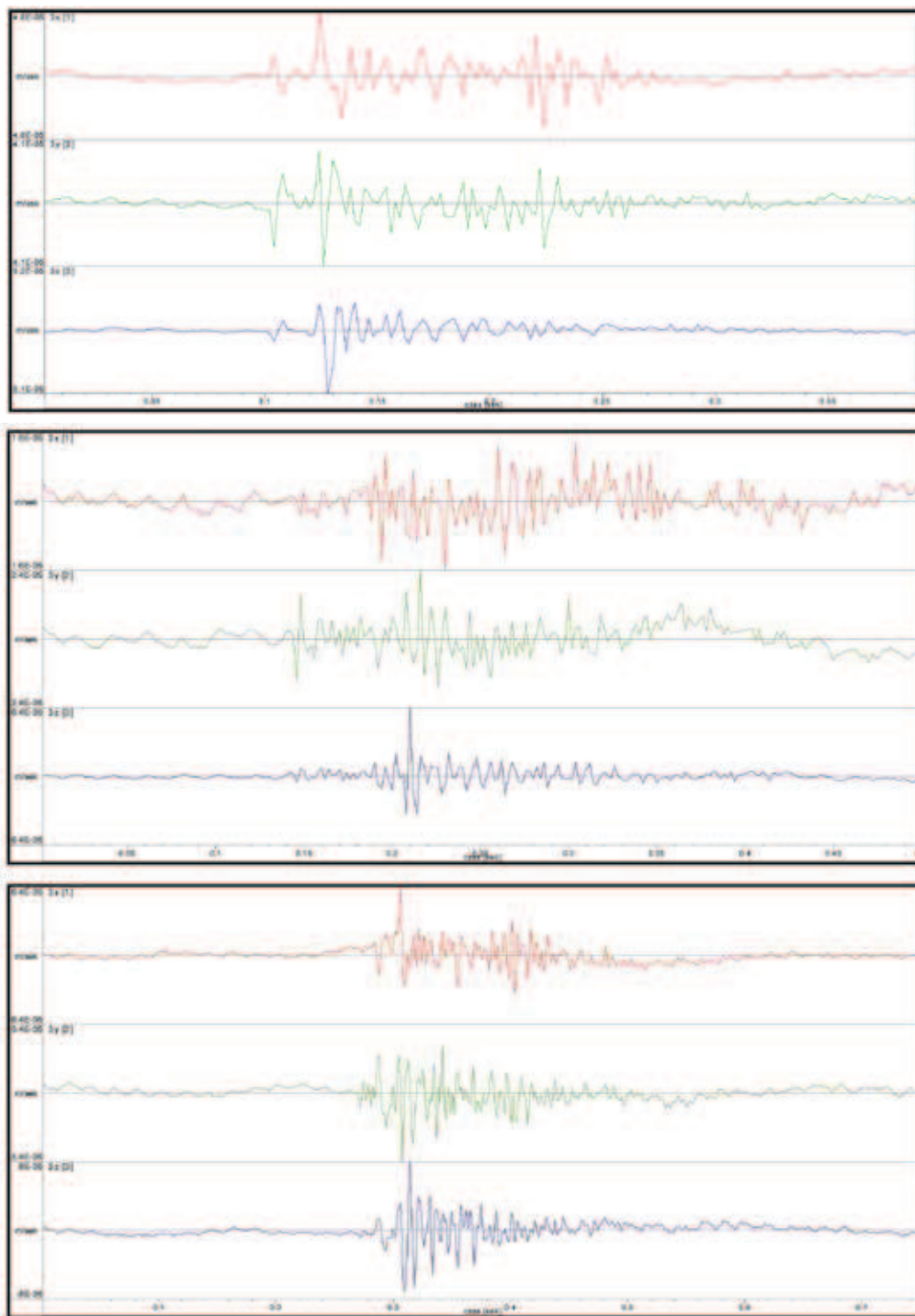
Rys. 6. Mapa poligonu pomiarowego

Fig. 6. Map of measurement area

Ze względu na skrajne rozmieszczenie miejsc odpalania otworów strzałowych skoncentrowano się na potencjalnym wystąpieniu efektu interferencji na stanowisku pomiarowym G-3 i G-15, które zapewniały dużą różnicę w długościach dróg przebiegu fal sejsmicznych generowanych przez odpalane ładunki wybuchowe.

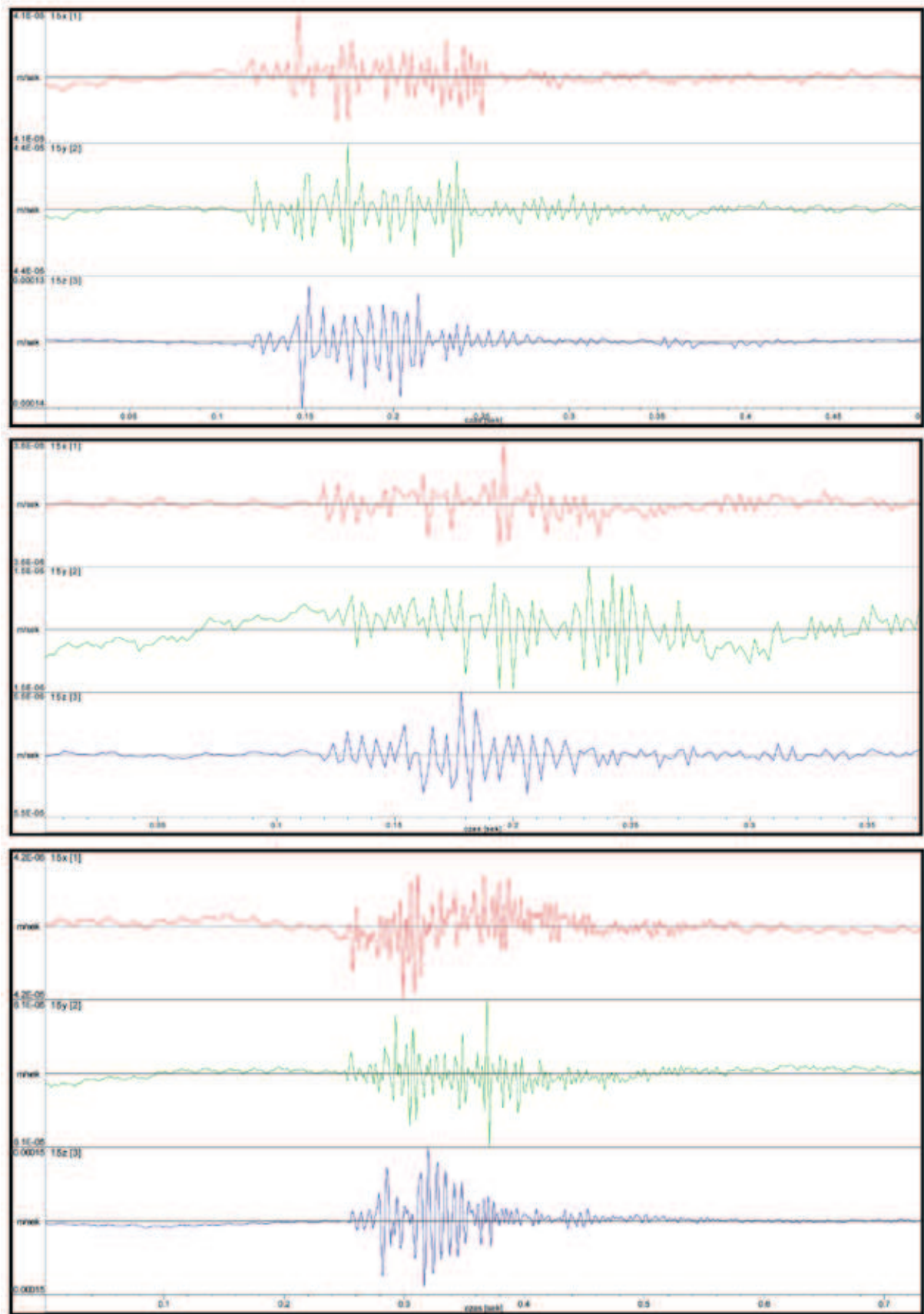
Na podstawie pierwszej fazy strzelań wyznaczono dwie wartości opóźnień czasowych – oddzielnie dla synchronizacji drgań na stanowisku G-3 i oddzielnie na stanowisku

G-15. Dla stanowiska G-3 otrzymano wartość opóźnienia 44 milisekundy dla bliższego względem niego miejsca odpalania MW, natomiast dla stanowiska G-15 otrzymano wartość opóźnienia 10 milisekund. W kolejnych etapach strzelań zastosowano sterowane elektronicznie opóźnienia o obliczonych wartościach. Na rysunkach 7 i 8 przedstawiono obrazy rejestracji drgań pochodzących od odpalanych oddzielnie otworów strzałowych oraz po synchronizacji czasów ich odpalania.



Rys. 7. Zapisy drgań na stanowisku G-3 po strzelaniach w otworach bliższym (a) i dalszym (b) oraz po synchronizacji czasów odpalania obydwu otworów (c)

Fig. 7. Digital seismograms of particle velocity amplitudes (m/s) recorded on the triaxial seismic station G-3 after blasting from the nearer blast hole (a), the farther blast hole (b) and after electronically synchronized blasts both in the nearer and further blast holes (c)



Rys. 8. Zapisy drgań na stanowisku G-15 po strzelaniach w otworach bliższym (a) i dalszym (b) oraz po synchronizacji czasów odpalenia obydwu otworów (c)  
 Fig. 8. Digital seismograms of particle velocity amplitudes (m/s) recorded on the triaxial seismic station G-15 after blasting from the nearer blast hole (a), the farther blast hole (b) and after electronically synchronized blasts both in the nearer and further blast holes (c)

**Tablica 1. Maksymalne wartości prędkości drgań (m/s) i strumienia energii (J/m<sup>2</sup>) generowanych robotami strzałowymi**

**Table 1. Maximum vibration velocity values (m/s) and the energy flux (J/m<sup>2</sup>) generated by blasting seismic waves**

Stanowisko rejestracji drgań Otwór strzałowy	Maksymalna prędkość drgań; m/s	Scałkowany po czasie strumień energii; J/m <sup>2</sup>
G-3 bliższy	X = 4,77E-5 m/s	5,21E-11
	Y = 4,10E-5 m/s	
	Z = 9,17E-5 m/s	
	XYZ = 9,19E-5 m/s	
G-3 dalszy	X = 1,59E-5 m/s	2,26E-11
	Y = 2,43E-5 m/s	
	Z = 6,44E-5 m/s	
	XYZ = 6,50E-5 m/s	
G-3 synchronizacja	X = 6,40E-5 m/s	7,14E-11
	Y = 5,42E-5 m/s	
	Z = 8,03E-5 m/s	
	XYZ = 8,28E-5 m/s	
G-15 bliższy	X = 4,07E-5 m/s	1,76E-10
	Y = 4,42E-5 m/s	
	Z = 1,35E-4 m/s	
	XYZ = 1,37E-4 m/s	
G-15 dalszy	X = 3,59E-5 m/s	2,97E-11
	Y = 1,53E-5 m/s	
	Z = 5,49E-5 m/s	
	XYZ = 5,57E-5 m/s	
G-15 synchronizacja	X = 4,20E-5 m/s	1,84E-10
	Y = 6,08E-5 m/s	
	Z = 1,46E-4 m/s	
	XYZ = 1,46E-4 m/s	

Charakterystykę zarejestrowanych drgań: maksymalne wartości prędkości drgań na odpowiednich składowych oraz scałkowany po czasie strumień energii przedstawiono w tablicy 1.

Z danych zawartych w tablicy 1 wynika, że:

- pierwsze maksymalne wartości prędkości amplitud drgań na poszczególnych składowych nie różnią się istotnie bez względu na to czy rejestrowano drgania od jednego strzelania czy też dwóch nałożonych na siebie synchronicznie,
- charakter drgań generowanych tymi strzelaniami zawiera w sobie wiele częstotliwości,
- obliczone wartości scałkowanego po czasie strumienia energii drgań, który jest proporcjonalny do uśrednionej intensywności drgań pochodzących od strzałów w badanym przedziale czasu, wskazują na jego zwiększenie dla strzałów zsynchronizowanych. Oznacza to, że nastąpiła konstruktywna interferencja dwóch badanych sygnałów sejsmicznych.

## 6. Podsumowanie

Praktyka górnicza, a w szczególności profilaktyka zagrożenia sejsmicznego, wskazuje na potrzebę prowadzenia badań, które pozwolą na poprawę efektywności robót strzałowych. Jedną z takich możliwości jest doprowadzenie w praktyce do efektu konstruktywnej interferencji podłużnych fal sejsmicznych wywoływanych takimi robotami. Teoretyczne modelowanie zjawiska interferencji potwierdziło możliwość jego zaistnienia nawet w niejednorodnym ośrodku skalnym, a zwiększanie liczby źródeł emisji poprawia tzw. kierunkowość interferencji. Rozwój techniki strzelniczej, a szczególnie elektronicznego sprzętu strzałowego, umożliwi precyzyjne uzyskiwanie bardzo małych zwłok czasowych odpalania ładunków MW, co z kolei pozwala na dokładne sterowanie fazami drgań i uzyskiwanie zamierzonego efektu interferencji. Przeprowadzone eksperymenty dołowe wykazały, że:

- częstotliwość drgań przy odpalaniu pojedynczego otworu strzałowego z ładunkiem 2 kg MW w skałach o dużej sprężystości sięga 150 Hz,

- możliwa jest praktyczna aplikacja obliczonych czasów opóźnień odpalania otworów strzałowych z wykorzystaniem systemu i-kon<sup>TM</sup>,
- synchronizacja czasów odpalania otworów strzałowych wykazała zaistnienie efektu konstruktywnej interferencji drgań, o czym świadczą scałkowane po czasie wzrosty wartości strumienia energii podłużnej fali sejsmicznej docierającej do wybranych punktów w górotworze,
- maksymalne wartości prędkości amplitud drgań nie wykazywały istotnych zmian (przyrostów) dla strzałów zsynchronizowanych, co wynika przede wszystkim z braku ich monochromatyczności.

## Literatura

1. *Dubiński J.*: Sejsmiczna metoda wyprzedzającej oceny zagrożenia wstrząsami górnymi w kopalniach węgla kamiennego. Prace GIG. Seria dodatkowa. 1989.
2. *Feynman R.P., Leighton R.B., Sands M.*: Feynmana wykłady z fizyki. T. 1-3. Warszawa. PWN. 1968.
3. *Lurka A.*: Wybrane teoretyczne i praktyczne zagadnienia tomografii pasywnej w górnictwie podziemnym. Prace naukowe GIG. 2009.
4. *Lurka A., Logiewa H.*: Sejsmologiczny system obserwacji SOS jako nowe narzędzie do obserwacji i interpretacji danych sejsmicznych w górnictwie zagrożonym tąpnięciami. Katowice. GIG. 2007. 283-296.
5. *Miller D., Martin D.*: A review of the benefits being delivered using electronic delay detonators in the quarry industry. Melbourne. 2008.
6. *Prędko S.*: Przegląd elektronicznych systemów inicjacji produkcji ORICA. Ustroń. 2009.
7. *Prędko S.*: Praktyczne zastosowanie wybranych systemów elektronicznej inicjacji MW. Prace Naukowe Instytutu Górnictwa Politechniki Wrocławskiej. Nr 130. Studia i Materiały nr 37. 2010.
8. *Rubinowicz W., Królikowski W.*: Mechanika teoretyczna. Warszawa. PWN. 1971.
9. *Stawiński M.*: Seismic waves and rays in elastic media. Pergamon. Elsevier. 2003.