

OKREŚLANIE MAKSYMALNEJ POZIOMEJ RADIALNEJ CZĘSTOTLIWOŚCI DRGAŃ W ZŁOŻU, SPOWODOWANEJ PARASEJSMICZNĄ POZIOMĄ FALĄ RADIALNĄ W POLU BLISKIM PODCZAS URABIANIA BLOKU SKALNEGO STRZELANIEM

ETERMINATION OF THE MAXIMUM HORIZONTAL RADIAL VIBRATION FREQUENCY IN THE DEPOSIT CAUSED BY A PARSE-SEISMIC HORIZONTAL RADIAL WAVE IN THE NEAR FIELD DURING BLASTING OF A ROCK BLOCK

Tadeusz Chrzan, Sławomir Szymanowicz – „Poltegor Instytut” Instytut Górnictwa Odkrywkowego, Wrocław

Sposób określania maksymalnej poziomej radialnej częstotliwości drgań w złożu spowodowaną parasejsmiczną poziomą falą radialną w polu bliskim podczas urabiania bloku skalnego strzelaniem polega na zastosowaniu prędkości fali parasejsmicznej na radialnym kierunku X i częstotliwości poziomej radialnej drgań złoża w czasie strzelania oraz obliczenia na tej podstawie maksymalnej poziomej radialnej częstotliwości drgań w badanym złożu. Pomiary są wykonywane w punktach pomiarowych przed czołem urabianego bloku skalnego. Pomiary wykonuje się, po odpaleniu ładunku materiału wybuchowego umieszczonego w jednym rzędzie otworów strzałowych urabianego strzelaniem bloku skalnego. Sposób ten znajdzie zastosowanie w górnictwie odkrywkowym, do określenia czasu odpalenia następnego otworu czyli czasu zwłoki między strzałowej [ms] powodującej wygaszenie drgań spowodowanych odpaleniem poprzedniego otworu.

Słowa kluczowe: materiały wybuchowe, rozkład drgań parasejsmicznych

The method for determining the maximum horizontal radial frequency of vibration in the deposit caused by a parasitic horizontal radial wave in the Near Field during the mining of a rock block by blasting is based on the use of the velocity of the parseismic wave in the radial X direction and the horizontal radial frequency of vibration of the deposit during blasting, and the calculation on this basis of the maximum horizontal radial frequency of vibration in the tested deposit. Measurements are taken at measuring points in front of the face of the mined rock block. The measurements are taken after firing a charge of explosive placed in one row of blast holes of the blasted rock block. The method is used in open-cast mining to determine the time it takes for the next hole to be fired, i.e. the inter-blasting delay time [ms] for ceasing the vibrations caused by the previous hole.

Keywords: explosives, parseismic vibration distribution

Obecny stan techniki

Urabianie skał MW jest to odspojenie od calizny skalnej wzdłuż linii pionowej i poziomej bloku skalnego o różnych wartościach jego wymiarów w stosunku do długości fali parasejsmicznej. Wykonywanie prac w górnictwie odkrywkowym z użyciem materiałów wybuchowych, prowadzi do powstania drgań parasejsmicznych, które powodują drgania urabianego złoża a następnie gruntu poza złożem. Drgania te przenoszą się poprzez propagacje fal parasejsmicznych we wszystkich kierunkach i działają szkodliwie na infrastrukturę drogową i mieszkalną. Dotychczas przyjmuje się, że wartość szkodliwego oddziaływania robót strzałowych, czyli amplitudy wychylenia, prędkości lub przyspieszenia cząsteczki drgającego ośrodka, zależy od wielkości odstrzelanego ładunku materiału wybuchowego oraz od odległości między kopalnią a chronionym obiektem. Parametrem pozwalającym porównywać szkodliwość drgań spowodowanych strzelaniem, za pomocą materiałów wybuchowych, jest przykładowo maksymalna wartość

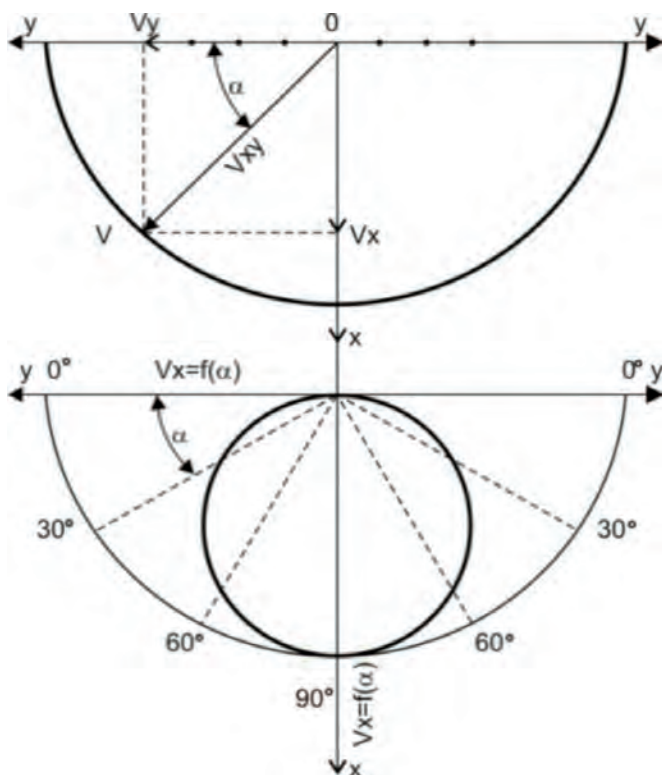
wektora poziomej radialnej prędkości drgań parasejsmicznych i odpowiadająca temu wektorowi prędkości częstotliwość. Parametry te związane są z warunkami geologiczno-tektonicznymi złoża, wymiarami odstrzelanego bloku i zmienianym miejscem prowadzonych robót strzałowych wynikających z postępu wydobywania. Jedną z metod oceny szkodliwego wpływu drgań gruntu na budynki jest bezpośredni pomiar parametrów drgań na budynku na poziomie terenu, w tym przykładowo wartości wektora poziomej radialnej prędkości drgań i jej częstotliwości. Odpowiednio zinterpretowane wyniki pomiarów, umożliwiają zastosowanie Skali Wpływów Dynamicznych podanych w Polskiej Normie [5]. Skala ta została utworzona do prognozowania skutków szkodliwego oddziaływania drgań, w zależności od wartości parametrów drgań guntu działających na budynki. Polska Norma PN-B-02170:2016-12, w zależności od największej wartości wektora poziomej stycznej lub radialnej prędkości drgań oraz jej częstotliwości drgań po tercjowaniu w przedziałach 1/3 oktawowych, określa stopień szkodliwego oddziaływania drgań na budynki mieszkalne. Pomiary radial-

nej prędkości drgań wykonuje się wzdłuż linii łączącej punkt pomiarowy ze źródłem drgań.

Dla różnych wartości kąta kierunkowego pomiędzy linią otworów strzałowych a linią łączącą źródło drgań z chronionym przed drganiami parasejsmicznymi domem otrzymuje się wartości radialnej poziomej prędkości raz większe, a drugi raz mniejsze (Rys. 1). Taka zmiana ww. wartości charakteryzuje kołową kierunkowość poziomej radialnej prędkości drgań.

Teoretyczne podstawy obliczania poziomej radialnej prędkości drgań

Na rysunku 1 przedstawiono jednostkowy teoretyczny kołowy rozkład składowej radialnej prędkości V_x drgań fali sejsmicznej dla różnych wartości kąta kierunkowego α . Kierunek Y pokrywa się z linią otworów strzałowych, a prędkość V_x jest prostopadła do osi Y. Jednostkową wartość wektora prędkości wypadkowej dla rozkładu kołowego można zapisać jako sumę wektorów składowych, $V_{xy}^2 = V_x^2 + v_y^2$, $V_{xy} = R^2 = 1$. Z rysunku 1 wynika, że $V_x = V_{xy} \sin \alpha$. Stąd dla kąta kierunkowego $\alpha > 65^\circ$, największą prędkość drgań V_x 90° z dokładnością do 10% można obliczyć z zależności: $V_x 90^\circ = V_x 66^\circ / \sin 66^\circ$. Wartość poziomej radialnej wektora prędkości V_x drgań gruntu (Rys.1) jest największa dla kąta kierunkowego $\alpha = 90^\circ$ i maleje do zera przy kącie kierunkowym $\alpha = 0^\circ$, przy czym wartości V_x układają się przy osi x wzdłuż obwodu połowki koła. Pomiary wartości poziomej radialnej wektora prędkości V_x drgań gruntu należy wykonywać dla kąta kierunkowego $\alpha = 90^\circ$ i dla tych wartości prędkości drgań gruntu obliczać



Rys.1. Schemat do wykreślnego przedstawienia kształtu i wartości wektora jednostkowego wypadkowej prędkości drgań V_{xy} oraz radialnej V_x prędkości drgań fali podłużnej w funkcji kąta kierunkowego „ α ” / rozkład kołowy/ (opracowanie własne)

Fig. 1. Diagram for the representation of the shape and values of the unit vector of the resultant vibration velocity V_{xy} and the radial vibration velocity V_x of the longitudinal wave as a function of the directional angle „ α ” /circular distribution/ (own elaboration).

strefę bezpieczną wobec drgań parasejsmicznych.

Największe wartości wektora poziomej stycznej lub poziomej radialnej prędkości drgań zgodnie z Polską Normą służą do określania rodzaju uszkodzeń powstających w chronionym przed drganiami domu. Dobór właściwej zwłoki czasowej dla otworu drugiego i następnych ma znaczny wpływ na wartość szkodliwych drgań parasejsmicznych powstających przy przejściu poziomej radialnej fali parasejsmicznej. W naukowej literaturze krajowej i światowej dotyczącej drgań parasejsmicznych nie ma obecnie żadnej teoretycznej oraz korelacyjnej zależności do obliczania maksymalnej częstotliwości drgań poziomej radialnej fali parasejsmicznej, a zatem brak możliwości doboru właściwej zwłoki czasowej dla odpalenia otworu drugiego i następnych. Stosowane są natomiast wzory empiryczne do obliczania okresu drgań fali parasejsmicznej, aby do niego dobierać czas zwłoki milisekundowej podczas strzelania. Okres drgań T fali parasejsmicznej określa się z kilku empirycznych zależności [3,4,6]:

$$T = 0,023[Qc]^{(0,185)} \quad (1), \quad T = [Qc]^{(0,33)} \quad (2),$$

$$T = k \log r$$

gdzie:

$k=0,01- 0,13$; r- odległość od źródła drgań w [m]; Qc – całkowita ilość MW użyta do strzelania w [kg], $k=0,01$ skały zwarte, $k=0,13$ skały słabe i zawodnione.

Pierwsza zależność nie uwzględnia ciśnienia i siły MW, a otrzymywane wyniki z tej zależności są mniejsze, niż otrzymywane z pomiarów. Zależność druga daje czas odpalenia następnego otworu w przedziale 10-50 ms. Z zależności trzeciej otrzymywane wyniki są tego samego rzędu, co otrzymywane z pomiarów. Zależności te są również niedokładne, ponieważ nie uwzględniają rzeczywistej częstotliwości drgań powstającej podczas strzelania.

Na rysunku 2 podano stosowane w praktyce strzelań czasy zwłoki międzystrzałowej .

Określanie maksymalnej poziomej radialnej częstotliwości drgań w złożu, spowodowanej parasejsmiczną poziomą falą radialną w polu bliskim podczas urabiania bloku skalnego strzelaniem stosuje się sposób opisany w zgłoszeniu Patentowym P.434974 [7]. Pole bliskie jest to odległość od źródła drgań, w którym częstotliwość drgań ośrodka w czasie strzelania zmienia się po zależności sinusoidalnej[1]. Zależność ta ma postać, z której oblicza się maksymalną poziomą radialną częstotliwość drgań w urabianym strzelaniem złożu [1].

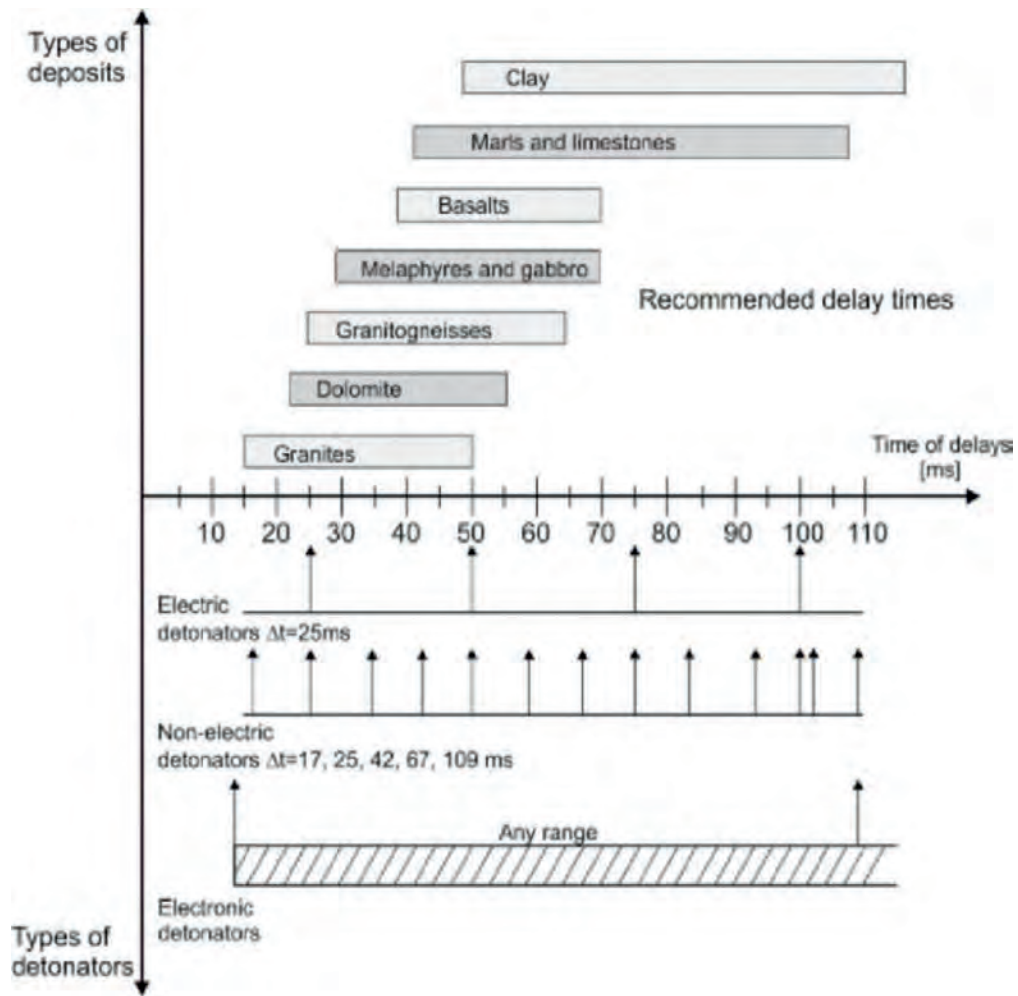
$$f_{x \max} = f_{x \text{ m}} / \sin (f_{x \text{ m}} * 360 * t),$$

gdzie:

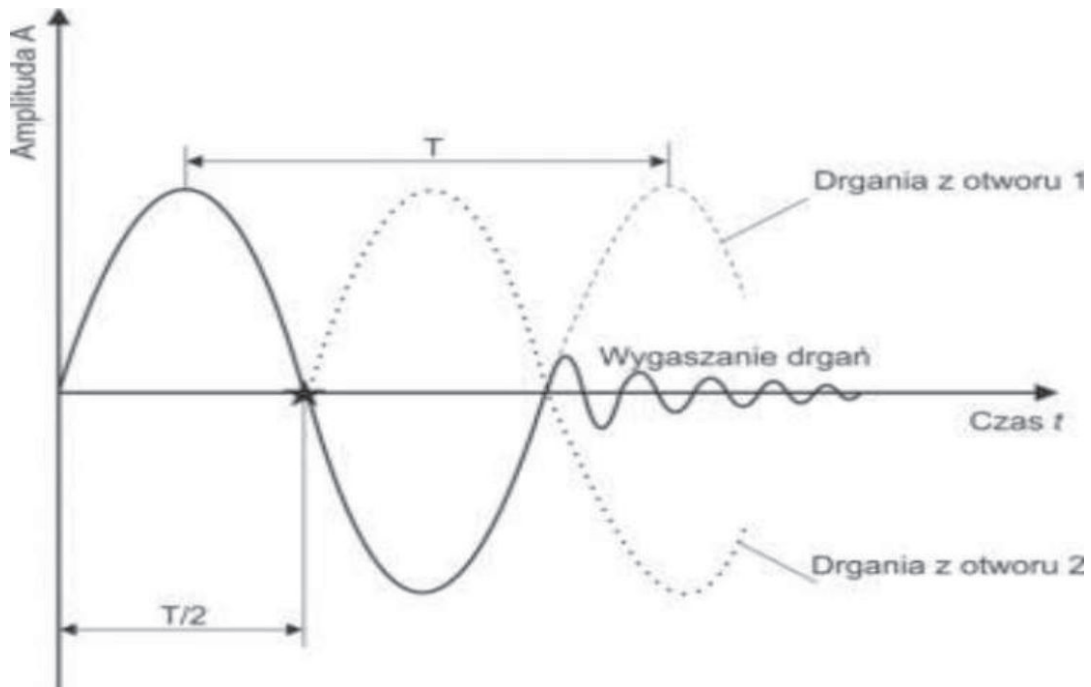
$f_{x \max}$ - maksymalna pozioma radialna częstotliwość drgań w urabianym strzelaniem złożu, $f_{x \text{ m}}$ - częstotliwość radialna drgań pomierzona w odległości około 280 m podzielona przez wartość funkcji sinus,

t - czas przejścia radialnej fali parasejsmicznej jako stosunek odległości punktu pomiarowego od źródła drgań do prędkości radialnej fali parasejsmicznej.

Mając obliczoną maksymalną poziomą radialną, częstotliwość drgań dobieramy czas odpalenia drugiego otworu, aby następował on w połowie okresu drgań T, wywołanego przez otwór pierwszy. Odpalenie drugiego otworu w punkcie czasowym $t=T/2$ spowoduje 100% wygaszenie drgań wywołanych



Rys. 2. Rekomendowane oparte na praktyce strzelań czasy zwłoki międzystrzałowej [ms] [2]
 Fig. 2. Recommended practice-based blasting inter-shot delay times [ms] [2].



Rys. 3. Przedstawia 100% wygaszenie drgań spowodowanych odpaleniem pierwszego otworu, gdy czas t zwłoki między strzałowej[ms] czyli odpalenia drugiego otworu/pierwszego ze zwłoką czasową/ $t_z = T/2$ oraz dla kolejnych „n” otworów (opracowanie własne)
 Fig. 3. Represents 100% extinguishing of vibrations caused by the firing of the first hole when the time t of the inter-shot delay[ms], i.e. the firing of the second hole/first hole with time delay/ $t_z = T/2$ and for the next „n” holes

przez otwór pierwszy. Czas t równy $\frac{1}{2}T$ będzie czasem zwłoki międzystrzałowej czyli czasem odpalenia otworu drugiego, co pokazano na rysunku 3.

Wykorzystanie metody obliczania poziomej radialnej prędkości drgań do produkcyjnych odstrzałów bloków skalnych

Dla powtarzalnych produkcyjnych odstrzałów jednym rzędem otworów bloków skalnych o zbliżonych wymiarach, na podstawie jednego strzelania istnieje możliwość dokładnego obliczenia maksymalnej radialnej częstotliwości drgań w złożu spowodowanych parasejsmiczną poziomą falą radialną w polu bliskim. Maksymalna radialna częstotliwość drgań niezbędna jest do określenia czasu /zwłoki międzystrzałowej [ms]/ odpalenia drugiego, a następnie 3, 4, 5, 6, 7, 8... otworu, tak aby następowało 100% wytłumienie drgań, spowodowane odpaleniem poprzedniego otworu. Mając obliczoną maksymalną poziomą radialną częstotliwość drgań można tak dobrać czas odpalenia drugiego otworu, aby następował on w połowie okresu drgań T , wywołanego przez otwór pierwszy. Odpalenie drugiego otworu w punkcie czasowym $t=T/2$ spowoduje 100% wygaszenie drgań wywołanych przez otwór pierwszy (Rys. 3). Podobnie postępujemy w stosunku do otworu 3, 4, 5, 6, 7, 8... Zastosowanie sposobu określania maksymalnej poziomej radialnej częstotliwości drgań w złożu oraz określania czasu odpalenia następnego otworu opisano na Przykładzie 1.

Przykład 1

Dotyczy powtarzalnych produkcyjnych odstrzałów jednym rzędem otworów strzałowych bloków skalnych o zbliżonych wymiarach. Dla urabianego MW złoża surowca skalnego wykonano pomiary prędkości poziomej radialnej fali parasejsmicznej V_x . $V_x=3543$ m/s. Następnie w czasie urabiania strzelaniem bloku skalnego przed jego czołem w punkcie pomiarowym odległym o 281,6 m od źródła drgań na kierunku radialnym dokonano pomiaru częstotliwości radialnej poziomej drgań, która wynosi $f_{xrm}=23,1$ Hz. Linia łącząca punkt pomiarowy ze środkowym otworem strzałowym pierwszego szeregu prostopadła do linii otworów i długości bloku skalnego wyznacza kierunek radialny. Kierunek styczny prostopadły do kierunku radialnego a równoległy do linii otworów i długości bloku. Mając pomierzone wartości częstotliwości poziomej radialnej: $f_{xrm}=23,1$ Hz, i prędkości poziomej radialnej fali

parasejsmicznej V_x , $V_x=3543$ m/s, podstawia się je do zależności: $f_{x \max} = f_{xrm} / \sin(f_{xrm} * 360 * t_x)$. Po podstawieniu i obliczeniu otrzymamy:

$$f_{x \max} = 23,1 / \sin(23,1 * 360 * 0,0795) = 23,1 / 0,856 = 27,0 \text{ Hz}$$

gdzie: $f_{x \max}$ - maksymalna pozioma radialna częstotliwość drgań występująca w danym złożu przy urabianiu bloku skalnego jednym rzędem otworów, f_{xrm} - częstotliwość radialna pozioma drgań pomierzona w odległości 281,6 m, podzielona przez wartość funkcji sinus, t - czas przejścia radialnej fali parasejsmicznej jako stosunek odległości punktu pomiarowego od źródła drgań do prędkości radialnej fali parasejsmicznej, $t_x = 281,6 / 3543 = 0,0795$.

Dla sprawdzenia prawidłowości pomiarów wykonano obliczenia $f_{x \max}$ dla punktu pomiarowego odległego o $r=201$ m i o $f_{xrm}=20$ Hz, stąd: $f_{x \max} = 20 / \sin(20 * 360 * 0,107) = 20 / 0,749 = 26,7$ Hz, co potwierdziło prawidłowość obliczonej poprzednio wartość $f_{x \max}$. Czas zwłoki międzystrzałowej t , czyli odpalenie drugiego otworu w punkcie czasowym $t=T/2$ wynosi $T_p = 1000 \text{ ms} / f_x = 1000 / 23,1 = 43,3$ ms. Stąd właściwy dla danego złoża czas zwłoki międzystrzałowej $t=21,6$ ms, co można osiągnąć przy stosowaniu elektronicznych zapalników. Sekwencja odpalania otworów wynosi: otwór 1- odpalany natychmiastowo, otwór 2-21,6 ms, otwór 3-43,3 ms, otwór 4-64,8 ms i tak dalej.

Podsumowanie

1. Podano sposób określania czasu zwłoki międzystrzałowej oparty na maksymalnej poziomej radialnej częstotliwości drgań w złożu, spowodowanej parasejsmiczną poziomą falą radialną.
2. Mając obliczoną maksymalną poziomą radialną, częstotliwość drgań można właściwie dobrać czas odpalenia drugiego otworu, aby następował on w połowie okresu drgań T , wywołanego przez otwór pierwszy.
3. Odpalenie drugiego otworu w punkcie czasowym $t=T/2$ spowoduje 100% wygaszenie drgań wywołanych przez otwór pierwszy.
4. Podany sposób określania maksymalnej poziomej radialnej częstotliwości drgań w złożu, spowodowanej parasejsmiczną poziomą falą radialną wymaga sprawdzenia przy powtarzalnych produkcyjnych odstrzałach wielorzędowych otworów strzałowych.

Literatura

- [1] Chrzan T., (2021), *Akustyka inżynierska w ochronie środowiska przy urabianiu surowców skalnych materiałem wybuchowym*, Wrocław
- [2] Chrzan T., Modrzejewski Sz. (2014), *Prognozowanie wartości drgań parasejsmicznych szkodliwie działających na infrastrukturę drogową i mieszkalną*. Logistyka, 2014, nr 5, CD 1, s. 222
- [3] Grześkowiak A., (2019), *Optymalizacja robót strzałowych w górnictwie odkrywkowym*. Praca doktorska. Wydział Geoinżynierii, Geologii i Górnictwa. Politechnika Wroclawska
- [4] Onderka Z., Sieradzki J., Winzer J. (2003), *Technika strzelnicza 2*. AGH Kraków .
- [5] Polska Norma (2016), PN-B-02170:2016-12. *Skala wpływów dynamicznych*
- [6] Sołtys A. (2011), *Analiza oddziaływania na otoczenie drgań wzbudzanych przez roboty strzałowe z zastosowaniem metody Matching Pursuit*. Praca doktorska. Wydział Geoinżynierii i Górnictwa. AGH Kraków
- [7] Zgłoszenie Patentowe P.434974. Chrzan T., Rogosz K., *Sposób określania maksymalnej poziomej radialnej częstotliwości drgań w złożu, spowodowanej parasejsmiczną poziomą falą radialną w polu bliskim podczas urabiania bloku skalnego strzelaniem*. Data zgłoszenia : styczeń 2022