

dr hab. inż. Tadeusz Chrzan, prof. Poltegor Instytut¹⁾
 ORCID: 0000-0002-5424-7311

Wpływ kołowego rozkładu radialnej sejsmicznej prędkości drgań na bezpieczeństwo techniczne budynku

The influence of circular distribution of radial seismic velocity on building technical safety

DOI: 10.15199/33.2022.09.06

Streszczenie. W artykule udowodniono tezę, że w przypadku kołowego rozkładu prędkości drgań przy urabianiu skał materiałem wybuchowym [MW] występuje kierunkowość składowej poziomej radialnej i stycznej prędkości drgań, czyli że wielkość składowych prędkości drgań w tej samej odległości od źródła drgań zależy od kąta kierunkowego między linią otworów strzałowych i linią łączącą środek powierzchni urabianego MW bloku skalnego a miejscem pomiaru. W przypadku rozkładu kołowego prędkości drgań przeprowadzono analizę teoretyczną zmiany wielkości radialnej V_x prędkości drgań w zależności od zmiany kąta kierunkowego. Przedstawiono pomierzone podczas urabiania skał MW wykresy prędkości drgań w przypadku rozkładu kołowego zgodnie z przewidywaniami teoretycznymi, a także zależności uwzględniające kąt kierunkowy przy obliczaniu maksymalnych wartości prędkości drgań, potrzebnych do określania bezpieczeństwa technicznego budynku.

Słowa kluczowe: drgania gruntu; drgania sejsmiczne; kołowy rozkład drgań.

Abstract. In the article proved the thesis that for the circular distribution of vibration velocity during mining with [BM], there is a directionality of the horizontal radial component and the tangential component of the vibration velocity. The magnitude of the components of the vibration velocity at the same distance from the source of vibration depends on the directional angle between the line of blast holes and the line connecting the centre of the surface of the mined rock block and the place of measurement. For the circular distribution of the vibration velocity, a theoretical analysis of the change in the radial value V_x of the vibration velocity depending on the change in the directional angle was conducted. Graphs of vibration velocity for circular distribution, measured during mining of BM rocks and complying with theoretical predictions were presented. The relationships taking into account the directional angle for calculating the maximum values of vibration velocity needed for determining the technical safety of a building are given.

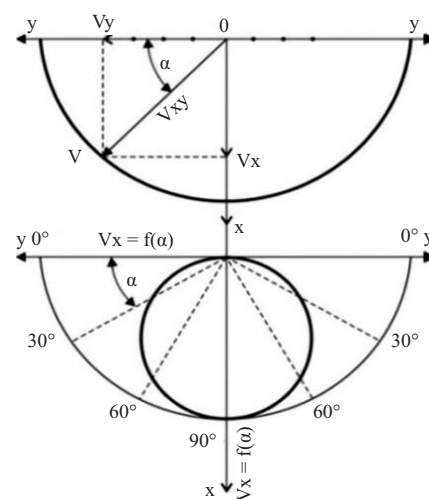
Keywords: ground vibrations; seismic vibrations; circular distribution of vibrations.

Skały związane z urabianiem za pomocą materiałów wybuchowych [MW], które powodują drgania urabianego ośrodka, a następnie gruntu poza kopalnią. Drgania te przenoszą się przez propagację fal sejsmicznych we wszystkich kierunkach i działają szkodliwie na infrastrukturę drogową i mieszkalną. Dotychczas w Polsce i na świecie uważa się, że drgania sejsmiczne powstające podczas urabiania skał MW rozchodzą się kołowo z jednakową energią w każdym kierunku, jak fale na wodzie od wrzuconego kamienia [2]. Analiza jednostkowego kołowego rozkładu składowej radialnej V_x prędkości drgań w funkcji kąta kierunkowego α (rysunek 1) pokazuje, że składowa ta w przypadku kąta $\alpha = 0 - 90^\circ$ ma kształt półokręgu w każdej ćwiartce i zmienną wartość przy osi X (w przypadku $\alpha = 0^\circ$, $V_x = 0$, a gdy $\alpha = 90^\circ$, $V_x = V_x \text{ max}$).

¹⁾ Instytut Górnictwa Odkrywkowego Poltegor; t.chrzan@iis.uz.zgora.pl

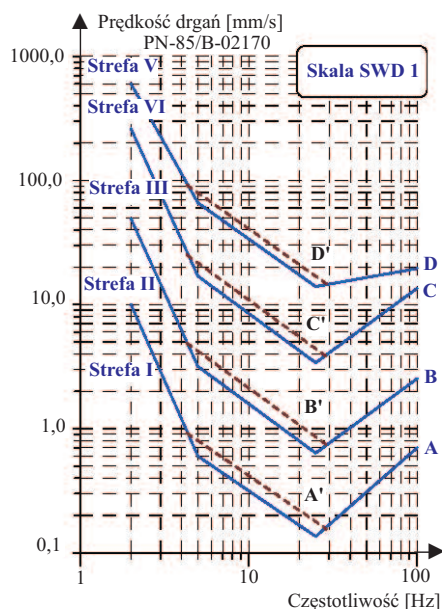
Z rysunku 1 wynika, że styczna V_y i promieniowa V_x mają różną wartość prędkości drgań w zależności od kąta kierunkowego pomiarów α . Kierunek Y pokrywa się z linią otworów strzałowych, a prędkość V_x jest prostopadła do kierunku Y. Na kierunkach X i Y dokonuje się pomiarów składowych poziomych radialnej V_x i stycznej V_y prędkości drgań na badanym obiekcie. Jednostkową wartość wektora prędkości wypadkowej w przypadku rozkładu kołowego można zapisać jako sumę wektorów składowych $V_{xy}^2 = V_x^2 + V_y^2$, $V_{xy}^2 = R^2 = 1$. Z rysunku 1 wynika, że $V_x = V_{xy} \sin \alpha = 1 \sin \alpha$, $V_x = V_y \cdot \operatorname{tg} \alpha$.

Skalę wpływów dynamicznych [SWD1] pokazuje rysunek 2 z liniami, które określają poszczególne strefy szkodliwości prędkości drgań. Nanosimy na niego wielkość największej poziomej składowej prędkości drgań pomierzonej w budynku na wysokości terenu i odpowiadającą jej częstotliwość. Punkt przecięcia się tych danych określa numer



Rys. 1. Kształt i wartości wektora jednostkowego wypadkowej prędkości drgań V_{xy} oraz radialnej V_x prędkości drgań fali sejsmicznej w funkcji kąta kierunkowego α (rozkład kołowy) [1]

Fig. 1. Graphical representation of the shape and value of the unit vector of the resultant vibration velocity V_{xy} and radial V_x of the vibration velocity of the seismic wave as a function of the directional angle α (circular distribution) [1]



Rys. 2. Skala wpływów dynamicznych SWD I [2]

Fig 2. The scale of dynamic influence SWD I [2] strefy oraz opisuje powstające w tej strefie uszkodzenia budynku:

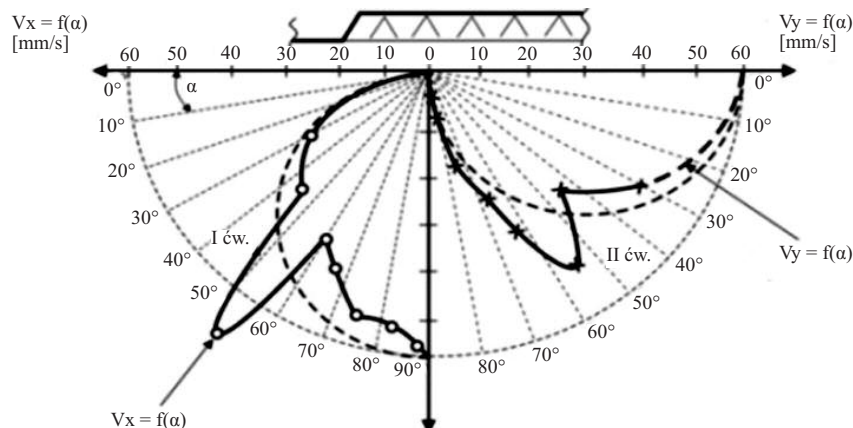
- **strefa I** – drgania nieodczuwalne przez budynki; granica A – dolna granica odczuwalności drgań przez budynek;
- **strefa II** – drgania odczuwalne przez budynek i nieszkodliwe dla jego konstrukcji; następuje przyspieszone zużycie budynku wynikające z powstawania rys w wyprawach, tynkach itd.; granica B – dolna granica powstawania zarysowań i spękań w elementach konstrukcyjnych; przyjęta jako górna granica bezpieczeństwa technicznego budynku;
- **strefa III** – drgania szkodliwe dla budynku, powodujące lokalne zarysowania i spękania, może nastąpić odpadanie wypraw i tynków; granica C – dolna granica ciężkich szkód budowlanych; granica wytrzymałości pojedynczych elementów budynku;
- **strefa IV** – drgania stanowiące zagrożenie dla ludzi; powstają liczne spękania; lokalne zniszczenie murów i spadanie pojedynczych elementów;
- **strefa V** – walenie się ścian.

Wielkość dopuszczalnej prędkości drgań działającej na budynek bez widocznych uszkodzeń elementów konstrukcyjnych zapewniającej jego bezpieczeństwo techniczne to granica B (rysunek 2). Inne prędkości powodują ściśle określone uszkodzenia budynków podane zgodnie z Polską Normą [9]. Przykład ilustrujący rzeczywisty roz-

kład radialnej prędkości V_x zmierzony podczas urabiania MW niejednorodnego nadkładu w złożu węgla brunatnego kopalni Adamów (rysunek 3) podobny jest do teoretycznego (rysunek 1). Niejednorodność ma charakter geologiczny i związana jest z budową złoża.

Na rysunku 3, kąt niejednorodności ośrodka o największej wartości poziomej radialnej V_x prędkości drgań wynosi $\alpha = 53,5^\circ$. Linia przerywana oznacza teo-

retyczny rozkład kołowy dla V_x , podobnie jak na rysunku 1. Niejednorodność związana jest z budową gruntu na odcinku między źródłem drgań a punktem pomiarowym (domem). Może to być warstwa piasku zawadniona w glinie zwałowej. Fala sejsmiczna na jej kierunku ma większą prędkość i wywołuje większą prędkość drgań ośrodka niż na sąsiednich kierunkach zbudowanych wyłącznie z gliny, co potwierdzają wyniki pomiarów (tabela).

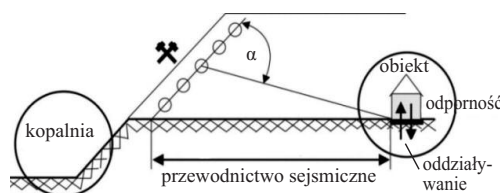


Rys. 3. Kołowy kierunkowy rozkład poziomej radialnej V_x prędkości drgań w funkcji kąta kierunkowego α – I ćwiartka

Fig. 3. Circular directional distribution of horizontal radial velocity V_x of vibrations as a function of directional angle α – I quadrant

Źródło: [10]

Source: [10]



Rys. 4. Schemat oddziaływania drgań na obiekt i kąt kierunkowy α

Opracowanie własne

Fig. 4. Diagram of the effect of vibrations on the object and the directional angle α

Own elaboration

Wpływ niejednorodności ośrodka na niezawodność obiektu

Wybudowany obiekt budowlany powinien spełniać swoje funkcje w planowanym okresie eksploatacji. Tę cechę obiektu budowlanego określa się mianem niezawodności. Zasadniczo przez to pojęcie rozumie się tzw. niezawodność

Parametry prędkości V_x drgań podczas urabiania glin zwałowych w kopalni Adamów [10] Velocity parameters V_x of vibrations during mining of glacial till in the Adamów mine [10]

Nr. strzelania	f_{xm} [Hz]	V_{xm} [cm/s]	r [m]	Q_z [kg]	kąt α [°]	n [szt]	Wsk	V_{xs} [cm/s]	z [m]	a [m]
10	1,8	0,28	800	250	30	3	1,02	0,29	14	6
14	2,2	0,81	700	200	53,5	5	0,89	0,72	17	6
15	2,5	0,56	810	200	75	5	1,03	0,58	15	6
16	1,4	0,50	930	250	82	4	1,19	0,60	15	5
17	2,0	0,50	1080	250	83	4	1,38	0,69	14	5
24	2,5	0,49	600	250	45,5	6	0,76	0,37	14	7
25	2,5	0,48	700	250	60	6	0,89	0,43	14	7
31	2,4	0,60	650 Śred. 784	220	65	15	0,83	0,50	16	7

Oznaczenia: f_{xm} – częstotliwość drgań w punktach pomiarowych na kierunku radialnym na masywie złoża; V_{xm} – prędkość drgań na kierunku radialnym w punktach pomiarowych na masywie złoża; r – odległość punktu pomiarowego od źródła drgań; Q_z – ładunek MW na jeden otwór i jedną zwłokę /zapalnik/; α – kąt kierunkowy określony dla rozkładu kołowego jako $\tan \alpha = V_x/V_y$; n – liczba odpalanych otworów; Wsk – wskaźnik korekcyjny odległości obliczony jako stosunek odległości punktu pomiarowego do odległości średniej wszystkich punktów [11]; V_{xs} – prędkość radialna skorygowana wskaźnikiem korekcyjnym odległości; z – odległość między rzędami otworów; a – odległość między otworami w rzędzie

wodność techniczną, która odnosi się do cech fizycznych i technicznych obiektu. Losowość różnych oddziaływań na obiekt budowlany powoduje, że ocenę jego niezawodności rozpatruje się też jako prawdopodobieństwo spełnienia postawionych wymagań [1, 4, 5, 6, 8]. Probabilistyczne miary niezawodności przypisuje się najistotniejszym cechom obiektu budowlanego, takim jak nośność, użyteczność i trwałość [12].

Ocenę niezawodności przeprowadza się, analizując stan, w którym znajduje się obiekt budowlany. Zgodnie z normami europejskimi PN-EN przyjmuje się, że obiekt budowlany ma dwa stany: zdatności i niezdatności (rysunek 5). Stan zdatności, czyli bezpieczny, to taki, w którym obiekt spełnia postawione mu wymagania, natomiast stan niezdatności, a więc niebezpieczny, jest wówczas, gdy obiekt nie spełnia zaplanowanych wymagań. W PN-EN przyjęto założenie [7], że konstrukcja jest w stanie zdatności do pewnej granicznej wartości efektu oddziaływań E_0 , a po jej przekroczeniu staje się całkowicie nieprzydatna do pełnienia wyznaczonej funkcji.

Rysunek 5 ilustruje stan graniczny, który „skokowo” oddziela stan zdatności konstrukcji od stanu niezdatności. W przypadku konstrukcji budowlanych stany niezdatności nie oznaczają katastrofy budowlanej, lecz są związane z niespełnieniem wymagań przyjętych w projektach budowlanych. Dotyczą one bezpieczeństwa elementów konstrukcji i możliwości użytkowania obiektu zgodnie z przyjętymi założeniami oraz zaplanowaną trwałością. W celu analizy wpływu niejednorodności nadkładu na niezawodność obiektu rozpatrzono kolejne strzelania nr 14 i nr 15. Zgodnie z obecną wiedzą [2], prędkość radialna V_x zależy od odległości r punktu pomiarowego od źródła drgań i wiel-

kości Q_z ładunku MW, odpalanego w jednym otworze na jedną zwłokę (zapalnik). Kolejne strzelania nr 14 i nr 15 wykonano w przypadku tej samej wielkości ładunku $Q_z = 200$ kg, ale z różnej odległości, dlatego jej wpływ na prędkość radialną skorygowano wskaźnikiem korekcyjnym odległości Wsk. Wskaźnik ten obliczony został jako stosunek odległości punktu pomiarowego do odległości średniej wszystkich punktów pomiarowych [11]. Z tabeli wynika, że V_{xs} – prędkość radialna skorygowana wskaźnikiem korekcyjnym odległości w przypadku niejednorodności w nadkładzie, przy kącie $\alpha = 53,5^\circ$ wynosi $V_{xs} = 7,2$ mm/s przy $f_x = 2,2$ Hz, a w przypadku kąta 75° $V_{xs} = 5,8$ mm/s przy $f_x = 2,5$ Hz. Nanosząc na SWD (rysunek 2) wartości prędkości na oś Y, a częstotliwości na oś X, otrzymano punkty przecięcia się tych danych. Zarówno podczas strzelania nr 14, jak i nr 15, punkty przecięcia się tych danych znajdują się na linii A. Jest to dolna granica odczuwalności drgań przez budynek w postaci spękań tynków (koniec strefy I – drgania nieodczuwalne przez budynki). Z analizy strzelania nr 14 i nr 15 wynika, że większa prędkość radialna na kierunku niejednorodności i mniejsza na pozostałych kierunkach w przypadku pomierzonych odległości nie przekracza na SWD granicy B. Nie ma więc wpływu na niezawodność obiektu w całym okresie jego użytkowania. Granica B jest to dolna granica powstawania zarysowań i spękań w elementach konstrukcyjnych. Można ją zatem traktować jako stan graniczny bezpieczeństwa technicznego budynku.

Podsumowanie i wnioski

W celu zapewnienia bezpieczeństwa technicznego obiektom inżynierskim, położonym blisko kopalni odkrywkowej, można tak zaplanować front robót górniczych, że obiekty inżynierskie znajdują się w bezpiecznej strefie kąta kierunkowego (obszary, gdzie wystąpią najmniejsze drgania). Przy kołowym rozkładzie prędkości drgań, budynki do dwóch kondygnacji będą miały zapewnione bezpieczeństwo techniczne, jeśli prędkość działających na nie drgań nie przekroczy granicy B (rysunek 2). Jest to strefa II – dolna granica powstawania zarysowań i spę-

kań w elementach konstrukcyjnych. Wartość prędkości drgań zależy od kąta kierunkowego α , który powinien być uwzględniany podczas pomiarów i prognozowania prędkości drgań.

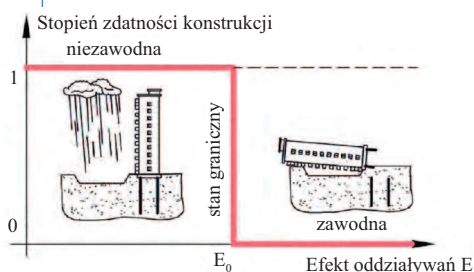
Ocenę bezpieczeństwa technicznego budynku przy kołowym rozkładzie prędkości drgań należy wykonywać przy maksymalnej pomierzonej lub obliczonej prędkości drgań gruntu. W przypadku prędkości radialnej jest to kąt kierunkowy $\alpha = 90^\circ$. Przy ocenie bezpieczeństwa technicznego budynku, położonego na kącie kierunkowym α równym kątowi niejednorodności ośrodka, należy uwzględnić wartość prędkości drgań dla kąta niejednorodności ośrodka.

Przy występowaniu kołowego rozkładu prędkości drgań należy kierować najmniejsze drgania do zabudowanego terenu, który powinien się znajdować pomiędzy kątem kierunkowym $0 - 45^\circ$ (rysunek 3) i $60 - 90^\circ$.

Literatura

- [1] Biegus A. Probabilistyczna analiza konstrukcji stalowych. WN PWN. 1999. Warszawa – Wrocław.
- [2] Chrzan T, Modrzejewski Sz. Prognozowanie wartości drgań parasejsmicznych szkodliwie działających na infrastrukturę drogową i mieszkalną. Logistyka. 2014; 5: 222 – 232. Konferencja ICTS, 2014, Wrocław.
- [3] Gulvanessian H, Calgaro JA, Holicky M. Designers' Guide to EN 1990. Eurocode: Basis of structural design, Thomas Telford, London 2002.
- [4] Gwóźdź M, Machowski A. Wybrane badania i obliczenia konstrukcji budowlanych metodami probabilistycznymi. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej. 2011. Kraków.
- [5] Kowal Z. Bezpieczeństwo konstrukcji w świetle teorii niezawodności. Archiwum Inżynierii Łądowej. 1967; (4).
- [6] Kuchta K, Tylek I, Rawska-Skotniczny A. Niezawodność obiektów budowlanych. Builder. 2019.
- [7] Lewicki B, Żurański JA. Obciążenie śniegiem w nowych normach polskich. Wiadomości Projektanta Budownictwa. 2007; (1).
- [8] Murzewski J. Wprowadzenie do teorii bezpieczeństwa konstrukcji. 1963. WN PWN.
- [9] PN-B-02170: 2016-12. Polska Skala wpływów dynamicznych.
- [10] Onderka Z. Badania intensywności drgań sejsmicznych przy strzelaniu metodą otworów wiertniczych w kopalniach odkrywkowych. Zeszyty Naukowe AGH. Nr 334. Górnictwo. 1971. Kraków.
- [11] Patent krajowy P. 420146. Sposób określania wartości poziomej radialnej wektora prędkości drgań gruntu dla różnych odległości od źródła drgań. Ważny do 2020 r. Poltegor Instytut.
- [12] Tylek I, Kuchta K. Ocena istniejących konstrukcji metalowych przed i po wzmocnieniu. XXXI Ogólnopolskie Warsztaty Pracy Projektanta Konstrukcji. 2016. Szczecin.

Przyjęto do druku: 11.08.2022 r.



Rys. 5. Definicja stanu granicznego [3]
Fig. 5. Definition of limit state [3]