

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

Wpływ eliptycznego rozkładu radialnej sejsmicznej prędkości drgań na bezpieczeństwo techniczne budynku

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

DOI: 10.15199/33.2023.05.04

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki analizy warunków eliptycznego rozkładu drgań sejsmicznych generowanych podczas robót strzałowych. Podano skalę szkodliwości prędkości drgań. Bezpieczeństwo techniczne budynku w strefie drgań sejsmicznych określono prędkością drgań zawartą w II strefie skali wpływów dynamicznych [SWD I]. Udowodnioną w artykule tezą jest, że w przypadku eliptycznych i kołowych rozkładów prędkości drgań w urabianiu skał za pomocą materiałów wybuchowych [MW], istnieje kierunkowość składowej poziomej prędkości drgań V_x promieniowych. Wartość prędkości drgań zależy od kąta kierunkowego „ α ” pomiędzy linią otworów strzałowych a linią łączącą środek powierzchni urabianego za pomocą MW bloku skalnego z miejscem pomiaru. Eliptyczne kształty krzywych uzyskanych podczas urabiania MW złoża bazaltowego, zależne od wartości kąta kierunkowego pomiarów, porównano z kształtem kołowych krzywych prędkości V_x .

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

Abstract. The article presents the results of an analysis of the conditions for the elliptical distribution of seismic vibrations generated during blasting. The scale of harmfulness of the vibration velocity is given. The technical safety of a building in the area of seismic vibrations was defined by the vibration velocity included in zone II of the influence scale of the dynamic impact scale [SWD I]. The thesis proved in this paper is that in case of elliptical and circular vibration velocity distributions in explosive rock excavation [MW], there is a directionality of the horizontal component of the vibration velocity V_x radial. The value of the vibration velocity depends on the directional angle „ α ” between the line of blast holes and the line connecting the centre of the surface of the rock block excavated with the BM to the place of measurement. The elliptical shapes of the curves obtained during the mining BM of the basalt deposit, which depend on the value of the directional angle of the measurements, were compared with the shape of the circular velocity curves V_x .

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

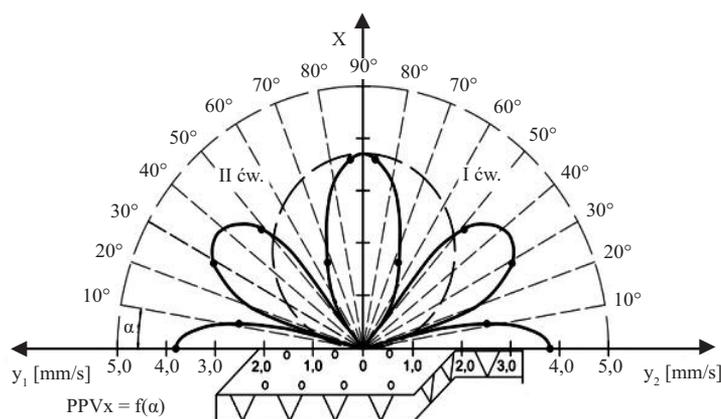
Skały zwięzłe urabia się strzelaniem za pomocą materiałów wybuchowych [MW], które powodują drgania urabianego ośrodka, a następnie gruntu poza kopalnią. Drgania te przenoszą się przez propagację fal sejsmicznych we wszystkich kierunkach i działają szkodliwie na infrastrukturę drogową i mieszkalną. Dotychczas w Polsce i na świecie uważa się, że drgania sejsmiczne powstające podczas urabiania skał MW rozchodzą się kołowo z jednakową energią w każdym kierunku [1], co nie zawsze jest prawdą [2], a podczas analizy pomiarów nie uwzględnia się warunków falowych, takich jak wartości wskaźnika rozkładu kierunkowego [Wrk] źródła drgań.

Analiza rozkładu składowej radialnej prędkości drgań w funkcji kąta kierunkowego

Rozchodzenie się fal sejsmicznych bazuje na tych samych prawach fizycznych, jakie dotyczą fal dźwiękowych i ultradźwiękowych [2]. Przykładowy eliptyczny rozkład radialnej prędkości szczytowej cząstek PPV_x zmierzony podczas ura-

biania MW złoża bazaltu na kierunku X pokazano na rysunku 1. Skała bazaltowa występująca w złożu to skała masywna, słabo zwietrzała i dlatego wykonane z niej kruszywa drogowe oraz budowlane mają bardzo dobrą jakość. Analiza rozkładu składowej radialnej PPV_x prędkości drgań w funkcji kąta kierunkowego „ α ” pokazuje, że radialna prędkość drgań w przypadku kąta kierunkowego „ α ” w przedziale $0 - 90^\circ$ przedstawia się w pierwszej i drugiej ćwiartce półokręgu jako połączony obwód trzech elipsoid i dwóch półelipsoid. Zgodnie z [2] pierwsza największa elipsoida fali podłużnej L, której dłuższa oś znajduje się na osi X, zaczyna się, gdy kąt $\alpha = 0^\circ$ i $V_x = 0$. Maksymalna wartość wektora poziomej radialnej prędkości drgań jest przy kącie 90° . Elipsoida fali podłużnej na ćwiartce I i II przechodzi przez dwie ukośne pełne elipsoidy fali poprzecznej T, o kącie kierunkowym dłuższej osi około $\alpha = 38^\circ$ w dwie półelipsoidy fali powierzchniowej R o dłuższych osiach leżących na osi wykresu Y_1 i Y_2 i kącie kierunkowym $\alpha = 0^\circ$. Elipsoidy i półelipsoidy na ćwiartce I i II są podobne. Rysunek 1 to rozkład kierunkowy [2] elipsoidalnej radialnej prędkości $PPV_x = f(\alpha)$ na ćwiartce I i symetryczny na ćwiartce II. Cienka linia prze-

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



Rys. 1. Charakterystyka kierunkowa poziomej składowej radialnej prędkości PPVx drgań w funkcji kąta kierunkowego „α”, w przypadku złoża bazaltu [2]

Fig. 1 Directional characteristics of the horizontal radial component of the PPVx vibration velocity as a function of directional angle „α”, for a basalt deposit [2]

rywana (koło) to 3,8 razy większy kształt teoretycznego jednostkowego rozkładu punktów pomiarowych kołowego rozkładu PPVx radialnej prędkości drgań. Z rysunku 1 wynika, że pomierzone wartości radialnej prędkości drgań masywu układają się nie wg rozkładu kołowego, lecz wg rozkładu elipsoidalnego. Elipsoida fali poprzecznej może zawierać główny kierunek szczelinowatości. Główne kierunki szczelinowatości w złożu przecinają się pod kątem ok. 90° [3]. Szczelinowatość ośrodka stanowi pewien rodzaj jego falowej niejednorodności. Na kierunku szczelin występuje większa prędkość fali i większa prędkość drgań ośrodka. Na kierunku otworów strzałowych fala powierzchniowa powoduje większą prędkość drgań ośrodka przy krawędzi wyrobiska, ponieważ cząsteczki skały mogą swobodnie drgać w kierunku -X i Z.

Nowy sposób pomiarów i ich analizy związany z elipsoidalnym rozkładem kierunkowym

Powszechnie stosowany jest sposób określania wartości wektora poziomej radialnej prędkości drgań gruntu PPV na podstawie korelacyjnego równania ujmującego odległość punktu pomiarowego od źródła drgań i ilości masy [kg] użytego ładunku Qz [MW] odpalanego na jedno opóźnienie milisekundowe. Wartość PPV radialnej prędkości szczytowej cząstek drgającego ośrodka określa się za pomocą następującego równania:

$$PPV = k(SD)^m \quad (1)$$

gdzie:

k oraz m – stałe, zależące od miejsca i warunków geologicznych oraz kierunku pomiarów [2];

SD – skalowana odległość zdefiniowana w następujący sposób:

$$SD = [\sqrt{D}]/W [(kg^{1/2})/m] \quad (2)$$

gdzie:

D – bezwzględna odległość pomiędzy źródłem drgań a stacją pomiarową [m];
W – maksymalny ładunek MW na jedno opóźnienie [kg].

Na podstawie równania (2) określa się, przy stałej masie ładunku materiału wybuchowego [W] dla przyjętej wartości

odległości od źródła drgań z dokładnością dochodzącą do ±40%:

- wartość wektora poziomej radialnej prędkości drgań;
- skutki oddziaływania drgań w przypadku promienia równego przyjętej wartości odległości, na całym obszarze przyległym do eksploatowanego złoża;
- bezpieczną odległość od miejsca strzelania w przypadku chronionych obiektów pod względem drgań sejsmicznych.

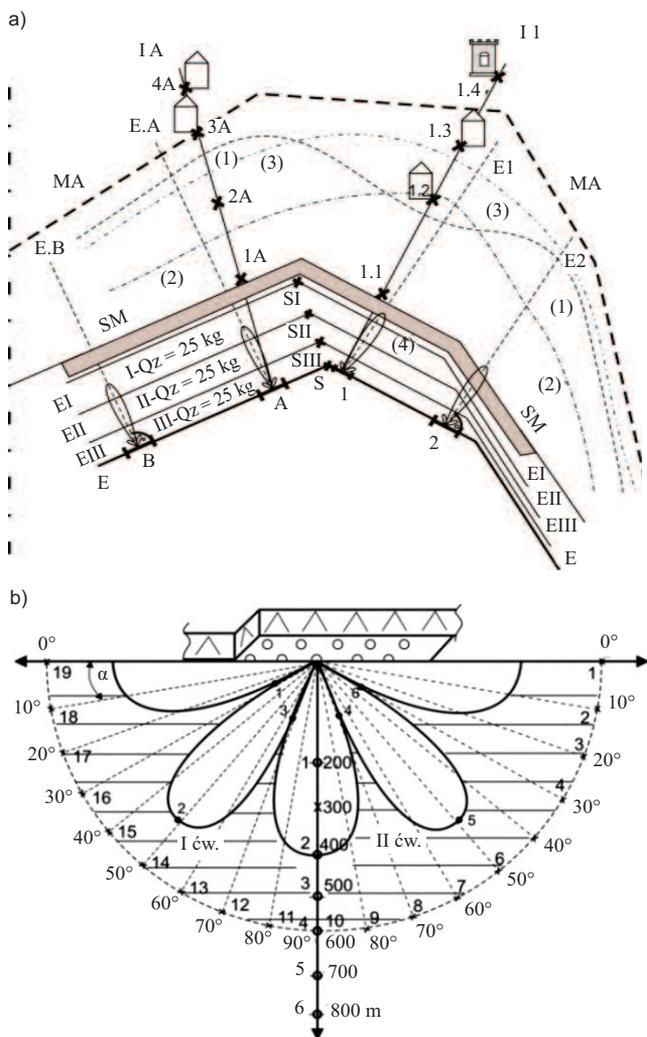
Wadą stosowanych obliczeń jest to, że nie uwzględnia się zmiany wartości wektora poziomej radialnej prędkości drgań ze zmianą kąta kierunkowego. Pomiar i ich analizę wykonuje się tylko w przypadku jednego profilu pomiarowego A lub I (rysunek 2a). W nowym sposobie pomiarów (rysunek 2b), związanych z analizą rodzaju rozkładu kierunkowego, pomiary wykonuje się na wybranych co kilkanaście stopni kątach kierunkowych, znajdujących się na połowie obwodu koła, w stałej odległości za czołem urabianego bloku skalnego. Wymaga to dodatkowej liczby czujników drgań i dodatkowego nakładu pracy. Z tego powodu nieoprawnie przyjmuje się, że obliczona z korelacyjnego równania wartość wektora poziomej radialnej prędkości drgań gruntu, przy jednakowej odległości i jednakowej masie ładunku MW, nie zależy od kąta i jest stała. W przypadku kolejnego przemysłowego urabiania skały [MW] o tych samych parametrach prac strzałowych, po pierwszych dokładnych pomiarach, można zmniejszyć ich liczbę. Można wykonywać je na kierunkach o największej lokalnej prędkości drgań (rysunek 2b).

Na rysunku 2a przedstawiono dotychczasowy sposób określania profili pomiarowych I-II i A-IA oraz doboru punktów pomiarowych 1.1, 1.2, 1.3, 1.4 i 1A, 2A, 3A, 4A w celu pomiaru drgań sejsmicznych przy rozkładzie kołowym w przypadku budynków podczas strzelania w punkcie A i I na poziomie eksploatacyjnym E, a na rysunku 2b przykładowy nowy sposób rozmieszczenia czujników drgań wg nowej metody pomiarów na złożu bazaltu, na półkołu co 10° i prostopadle do czoła bloku skalnego podczas pierwszego dokładnego badania eliptycznego rozkładu kierunkowego i pomiarów prędkości drgań fali sejsmicznej. W monografii [2] wprowadzono wskaźnik rozkładu kierunkowego Wrk, którego wielkość określa rodzaj rozkładu kierunkowego fali sejsmicznej: $Wrk < 1,75$ – rozkład kołowy; $Wrk = 1,75 - 6,0$ – rozkład przejściowy od kołowego do rozkładu kierunkowego elipsoidalnego; $Wrk > 6,0$ – rozkład kierunkowy elipsoidalny. Typ rozkładu kierunkowego fali sejsmicznej w przypadku przemysłowego urabiania skały [MW] na kierunku X można określić z zależności:

$$Wrkx = Op/\lambda x, Op = 2(L + H); Wrkx = 2(L + H)/\lambda x$$

gdzie:

Op – obwód prostokąta, czyli suma długości L i wysokości H bloku skalnego, który jest źródłem drgań; λx – długość fali sejsmicznej na kierunku X powstałej podczas urabiania bloku skalnego [MW]. Podstawiając dane analizowanego strzelania [2] otrzymano: $Wrkx$ bloku skalnego na kierunku X: $Wrkx = 2(H+L)/\lambda x = 2(18,5+3,80)/3,86 = 44,6/3,86 = 11,55$.



Rys. 2. Sposób określania profili pomiarowych: a) dotychczasowy [2]; b) przykładowy nowy sposób

Fig. 2. Method of determining the measurement profiles: a) existing method [2]; b) exemplary new method

Otrzymany wynik i rysunek 1 potwierdzają, że jest to rozkład kierunkowy elipsoidalny.

Skala wpływów dynamicznych

Skalę wpływów dynamicznych [SWD] [4] przedstawia rysunek 3 z naniesionymi liniami, które określają poszczególne strefy szkodliwości prędkości drgań. Na SWD I nanosi się wielkość największej poziomej radialnej prędkości drgań pomierzonej w budynku na kierunku X na wysokości terenu i odpowiadającą jej częstotliwość. Punkt przecięcia się tych danych określa numer strefy oraz rodzaj uszkodzenia w budynku:

■ **strefa I** – drgania nieodczuwalne przez budynki – granica A – dolna granica odczuwalności drgań przez budynki;

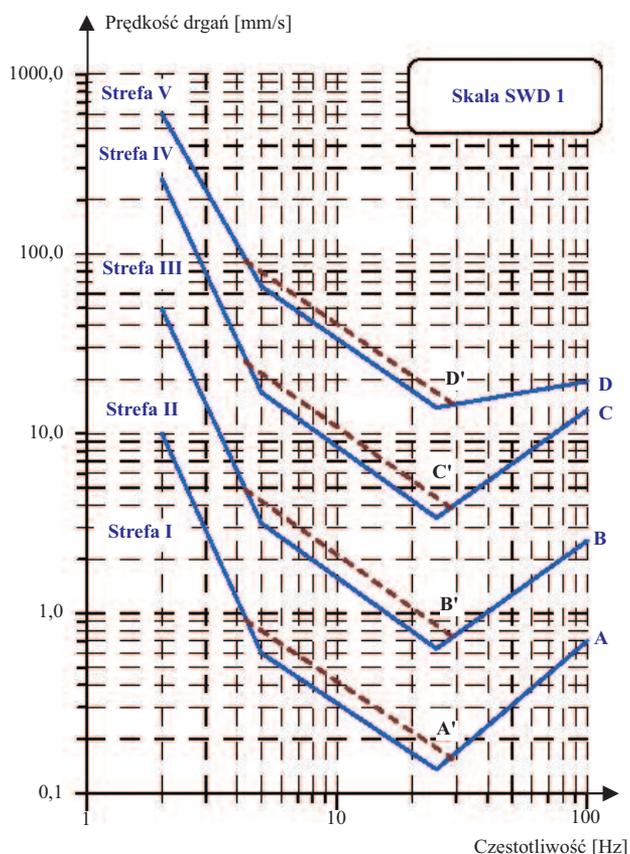
■ **strefa II** – drgania odczuwalne przez budynek i nieszkodliwe dla konstrukcji budynku. Następuje jednak przyspieszone zużycie budynku wyrażające się przez rysy w tynkach itp. – granica B – dolna granica powstawania zarysowań i spękań w elementach konstrukcyjnych;

■ **strefa III** – drgania szkodliwe dla budynku, powodujące lokalne zarysowania i spękanie, 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 działających na budynek bez widocznych uszkodzeń elementów konstrukcyjnych zapewniająca bezpieczeństwo techniczne budynku, to granica B (rysunek 3). Inna prędkość powoduje ściśle określone uszkodzenia budynków zgodnie z Polską Normą [4].



Rys. 3. Skala wpływów dynamicznych SWD I [4]

Fig. 3. The scale of dynamic influence, SWD I [4]

Niejednorodność ośrodka a niezawodność obiektu

Obiekt budowlany powinien spełniać swoje funkcje w planowanym okresie eksploatacji. Tę cechę określa się mianem niezawodności. Zasadniczo przez to pojęcie rozumie się tzw. **niezawodność techniczną**. Odnosi się ona do cech fizycznych i technicznych obiektu. Losowość różnych oddziaływań na obiekt budowlany powoduje, że ocenę niezawodności obiektu budowlanego rozpatruje się też jako **prawdopodobieństwo spełnienia stawianych wymagań** [5 ÷ 9]. Probabilistyczne miary niezawodności przypisuje się najistotniejszym

cechom obiektu budowlanego, tzn. nośności, użyteczności i trwałości [10].

Ocenę niezawodności przeprowadza się, analizując stan, w którym znajduje się obiekt budowlany. Zgodnie z normami europejskimi PN-EN przyjmuje się, że obiekt budowlany może być w dwóch stanach (rysunek 4):

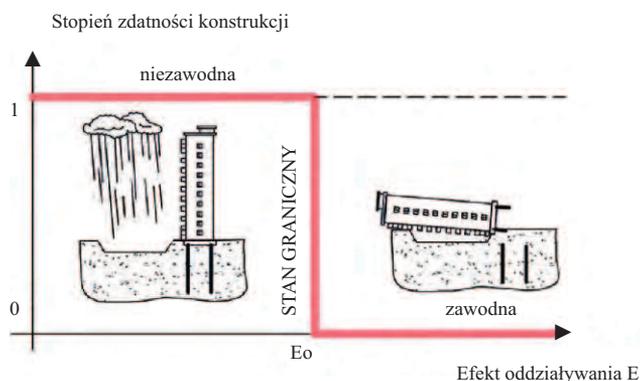
- zdatności, czyli bezpiecznym, w którym obiekt spełnia postawione mu wymagania;
- niezdatności – niebezpiecznym, gdy nie spełnia wymagań.

W PN-EN przyjęto założenie, 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 [11, 12].

Rysunek 4 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 prędkości drgań fali podłużnej (kąt 86°), fali poprzecznej (kąt 29°) i powierzchniowej (kąt 0°) na niezawodność obiektu na skali SWD I rozpatrzono efekty działania największych prędkości drgań fal i odpowiadających im częstotliwości f_x na domy dwukondygnacyjne. Z danych zawartych w [1] wynika, że w przypadku odległości 311 m od źródła drgań:

- fala podłużna ma kąt 86° , $PPV_x = 3,84$ mm/s i $f_x = 5,8$ Hz;
- fala poprzeczna prawdopodobnie związana z niejednorodnością ośrodka ma kąt 29° , $PPV_x = 3,40$ mm/s i $f_x = 13,5$ Hz;
- fala powierzchniowa ma kąt 0° , $PPV_x = 3,85$ mm/s i $f_x = 14,2$ Hz.

Nanosząc na SWD I (rysunek 3) wartości prędkości na oś Y, a częstotliwości na oś X, otrzymano punkty przecięcia się tych danych. Zarówno w przypadku prędkości drgań fali po-



Rys. 4. Definicja stanu granicznego wg [11]: E_0 – stan graniczny; oś X – efekt oddziaływań; oś Y – stopień zdatności konstrukcji. Na poziomie 1,0- E_0 stopień zdatności, konstrukcja niezawodna, na poziomie 0 stopień zdatności, konstrukcja zawodna

Fig. 4. Definition of limit state [11]: of limit state E_0 , axis X – effect of interactions E, axis Y – degree of of structural serviceability. On level 1,0- E_0 – degree of structural serviceability – reliable. On level 0 – unreliable

dłuższej, kąt 86° , fali poprzecznej kąt 29° i powierzchniowej kąt 0° punkty przecięcia znajdują się w strefie IV. Są to drgania stanowiące zagrożenie dla ludzi, powstają też liczne spękania i lokalne zniszczenie murów. Z analizy wpływu tych fal na budynek wynika, że efekty ich działania są takie same i tak samo wpływają na niezawodność obiektu w całym okresie jego użytkowania. Szkodliwość tych fal nie sumuje się. Stan graniczny zdatności konstrukcji wskutek takich drgań może zostać nagle przekroczony.

Podsumowanie i wnioski

W celu zapewnienia bezpieczeństwa technicznego budynków do dwóch kondygnacji, prędkość działających na nie drgań przy eliptycznym rozkładzie nie może przekraczać granicy B (rysunek 3). Wartość prędkości drgań zależy od rodzaju fali i kąta kierunkowego α , który powinien być uwzględniany podczas pomiarów i prognozowania prędkości drgań.

Ocenę bezpieczeństwa technicznego budynku, przy eliptycznym rozkładzie radialnej prędkości drgań w przypadku fali podłużnej, należy wykonywać przy kącie kierunkowym $\alpha = 90^\circ$. W przypadku innych kątów i innych rodzajów fal, wartości prędkości drgań powodują takie same uszkodzenia budynków. W analizowanym rozkładzie prędkości drgań, zabudowany teren powinien znajdować się pomiędzy 13° a 20° oraz $55 - 70^\circ$ kąta kierunkowego (rysunek 1).

Literatura

- [1] Opracowanie. Określenie promienia strefy bezpiecznej względem drgań parasejsmicznych dla złoza bazaltu. Inst. Górnictwa Odkr.-Poltegor. Wrocław, 2015.
- [2] Chrzan T. Akustyka inżynierska w ochronie środowiska przy urabianiu surowców skalnych materiałem wybuchowym, Poltegor Instytut, Wrocław, 2021.
- [3] Stan-Kleczek J. Wpływ spękań na anizotropię prędkości fal sejsmicznych w wybranych masywach skalnych. Zastosowanie metod statystycznych w badaniach naukowych. StatSoft Polska, www.statsoft.pl/czytelnia.html, dostęp 14.10.2012.
- [4] PN-B-02170:2016-12 Skala wpływów dynamicznych.
- [5] Biegus A. Probabilistyczna analiza konstrukcji stalowych. WN PWN, Warszawa – Wrocław 1999.
- [6] Gwóźdź M, Machowski A. Wybrane badania i obliczenia konstrukcji budowlanych metodami probabilistycznymi. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 2011.
- [7] Kowal Z. Bezpieczeństwo konstrukcji w świetle teorii niezawodności. Archiwum Inżynierii Łądowej. 1967; 4.
- [8] Kuchta K, Tylek I, Rawska-Skotniczny A. Niezawodności obiektów budowlanych. Builder science i bezpieczeństwo konstrukcji. Builder I. 2019.
- [9] Murzewski J. Wprowadzenie do teorii bezpieczeństwa konstrukcji. WN PWN, Warszawa 1963.
- [10] Tylek I, Kuchta K. Ocena istniejących konstrukcji metalowych przed i po wzmocnieniu. XXXI Ogólnopolskie Warsztaty Pracy Projektanta Konstrukcji, Szczyrk 2016.
- [11] Gulvanessian H, Calgaro J-A, Holicky M. Designers Guide to EN 1990. Eurocode: Basis of structural design, Thomas Telford, London 2002.
- [12] Lewicki B, Żurański JA. Obciążenie śniegiem w nowych normach polskich. Wiadomości Projektanta Budownictwa. 2007; 1.

Przyjęto do druku: 08.03.2023 r.