

Krystyna KUŹNIAR<sup>1</sup>  
Edward MACIĄG<sup>2</sup>  
Tadeusz TATARA<sup>3</sup>

## UNORMOWANE SPEKTRA ODPOWIEDZI OD DRGAŃ POWIERZCHNIOWYCH WZBUDZANYCH WSTRZĄSAMI GÓRNICZYMI

Praca dotyczy jednego ze sposobów opisu informacji o wymuszeniu kinematycznym – za pomocą spektrów odpowiedzi. Przedstawiono w niej propozycję opracowanego wzorcowego (standardowego) przyśpieszeniowego spektrum odpowiedzi dla najbardziej aktywnego sejsmicznie obszaru górniczego w Polsce – Legnicko-Głogowskiego Okręgu Miedziowego (LGOM). Tego typu spektrum może być wykorzystane w analizach dynamicznych. Spektrum to wyznaczono na podstawie przebiegów drgań gruntu rejestrowanych za pomocą aparatury czuwającej w okresie kilku lat na trzech stanowiskach pomiarowych. W obliczeniach pod uwagę wzięto tylko wyselekcjonowane przebiegi drgań z amplitudami nie mniejszymi od 10cm/s<sup>2</sup>, łącznie kilkaset przebiegów drgań. Zestawienie uśrednionych bezwymiarowych przyśpieszeniowych spektrów odpowiedzi sporządzonych dla każdego ze stanowisk osobno, pozwoliło na wskazanie wpływu warunków gruntowych na postać otrzymywanego spektrum. Dokonano porównania zaproponowanego wzorcowego spektrum z odpowiednim spektrum zamieszczonym w literaturze, wykazując i analizując występujące różnice. Dodatkowo porównano krzywą wzorcową spektrum uzyskaną na podstawie drgań gruntu z zaproponowaną krzywą wzorcową spektrum od jednocześnie rejestrowanych drgań fundamentów budynków (trzech typów: niskiego, średniej wysokości i wysokiego), posadowionych obok ww. stacji pomiarowych na gruncie. Krzywe te istotnie się różnią i dowodzą silnego tłumienia drgań z wyższymi częstotliwościami przez budynki.

**Słowa kluczowe:** wzorcowe spektrum odpowiedzi, wstrząsy górnicze, przebiegi drgań, badania doświadczalne

---

<sup>1</sup> Autor do korespondencji/corresponding author: Krystyna Kuźniar, Uniwersytet Pedagogiczny w Krakowie, 30-084 Kraków, ul. Podchorążych 2, tel. +48 12 662 6339, e-mail: [kkuzniar@up.krakow.pl](mailto:kkuzniar@up.krakow.pl)

<sup>2</sup> Edward Maciąg, Wydział Inżynierii Łądowej Politechniki Krakowskiej, 31-155 Kraków, ul. Warszawska 24, tel. +48 12 628 23 33, e-mail: [maciag@limba.wil.pk.edu.pl](mailto:maciag@limba.wil.pk.edu.pl)

<sup>3</sup> Tadeusz Tatar, Wydział Inżynierii Łądowej Politechniki Krakowskiej, 31-155 Kraków, ul. Warszawska 24, tel. +48 12 628 23 48, e-mail: [ttatara@pk.edu.pl](mailto:ttatara@pk.edu.pl)

## 1. Wstęp

Jednym z oddziaływań dynamicznych na konstrukcję budowlaną może być ruch podłoża, na którym ją posadowiono. Tego typu źródła drgań zwykle znajdują się poza obiektem, a wstrząsy dochodzą do konstrukcji na skutek propagacji drgań w ośrodku gruntowym. Drgania podłoża stanowią w tym przypadku wymuszenie kinematyczne, a obciążenie obiektu wynika z powstających w tym czasie sił bezwładności.

Źródła takich drgań mogą być naturalne, a więc niezależne od człowieka, albo mogą być w sposób bezpośredni lub pośredni spowodowane działalnością człowieka. W pierwszym przypadku mamy do czynienia z drganiami sejsmicznymi, których źródłem są trzęsienia ziemi (wstrząsy typu tektonicznego), wybuchy wulkanów. W przypadku drugim mamy do czynienia z tzw. drganiami parasejsmicznymi. Najsilniejszymi wśród drgań parasejsmicznych w Polsce są drgania pochodzenia górniczego. Mogą one prowadzić do uszkodzeń obiektów budowlanych. Zapewnienie bezpieczeństwa obiektów podlegających wpływom takich drgań stwarza konieczność analizy propagacji drgań w ośrodku gruntowym, analizy oddziaływania drgań na obiekty budowlane i oceny stopnia ich szkodliwości.

Wstrząsy górnicze, generując drgania budynków, oddziałują też na samych ludzi w budynkach. Mieszkańcy osiedli znajdujących się w strefach takich oddziaływań, wyraźnie tego typu drgania odczuwają. W trakcie wstrząsów, szczególnie w budynkach wysokich, zdarza się przemieszczanie mebli w mieszkaniach, kołysanie żyrandoli lub wypadanie książek z półek.

Najlepszym sposobem określenia oddziaływania wstrząsów górniczych na konstrukcje budowlane jest zarejestrowanie rzeczywistych przebiegów drgań w wybranych punktach na powierzchni ziemi oraz w budynkach. Można to realizować z wykorzystaniem monitoringu sejsmometrycznego, przez który rozumie się prowadzenie ciągłych rejestracji zjawisk sejsmicznych. Uzyskane w ten sposób rejestracje drgań bądź w formie sejsmogramów (zapis przebiegów prędkości lub przemieszczeń drgań), bądź akcelerogramów (zapis przebiegów przyspieszeń drgań), stanowią materiał wyjściowy do ich przetwarzania oraz specjalistycznej interpretacji.

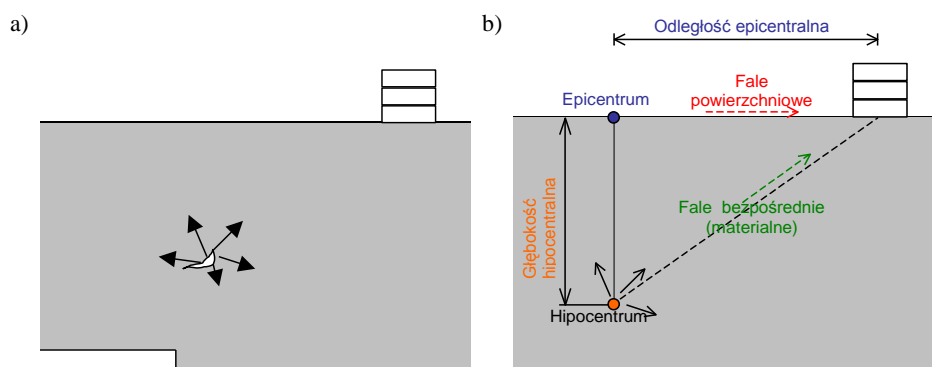
W praktyce nie jest możliwe, aby np. na etapie projektowania obiektów projektant wykorzystywał jako wymuszenie kinematyczne różne warianty przebiegów drgań podłoża, które potencjalnie mogą wystąpić w miejscu posadowienia budynku. Stosowane są tzw. wzorcowe (standardowe) przyspieszeniowe spektra odpowiedzi. Wykorzystuje się je do charakterystyki drgań powierzchniowych oraz w projektowaniu nowych obiektów, jak również do oceny szkodliwości drgań dla istniejących budynków [2, 3, 9, 10, 12].

W pracy przedstawiono propozycję opracowanego wzorcowego (standardowego) przyspieszeniowego spektrum odpowiedzi dla najbardziej aktywnego sejsmicznie obszaru górniczego w Polsce – Legnicko-Głogowskiego Okręgu Mie-

dziowego (LGOM). Dokonano porównania zaproponowanego wzorcowego spektrum z odpowiednim spektrum zamieszczonym w literaturze, wykazując i analizując występujące różnice. Dodatkowo porównano krzywą wzorcową spektrum uzyskaną na podstawie drgań gruntu z zaproponowaną krzywą wzorcową spektrum od jednocześnie rejestrowanych drgań fundamentów budynków (trzech typów: niskiego, średniej wysokości i wysokiego).

## 2. Sejsmiczność terenów górniczych

Wstrząsy górnicze, które towarzyszą podziemnej eksploatacji złóż, są skutkiem pęknięcia skał najczęściej nad wyrobiskami górniczymi. Zjawisko to występuje samorzutnie, na skutek zachwiania naturalnego stanu równowagi skał. W twardych skałach nadkładowych zjawisko to przebiega w sposób gwałtowny (por. rys. 1a). Wydziela się wtedy duża ilość energii. Powoduje ona propagowanie się do powierzchni terenu fal sejsmicznych, wzbudzających z kolei drgania obiektów budowlanych (por. rys. 1b).



Rys. 1. Schemat: a) powstawania wstrząsu górniczego; b) oddziaływania wstrząsu typu sejsmicznego na obiekt budowlany [4]

Fig. 1. Scheme: a) the formation of mining tremor; b) the influence of mining tremor on a building structure [4]

Wstrząsy górnicze wzbudzone są losowo, poza kontrolą człowieka. Poza losowym charakterem występowania, wstrząsy pochodzenia górniczego charakteryzują się większą intensywnością w stosunku do innych źródeł drgań parasejsmicznych. Energie wstrząsów górniczych mogą dochodzić nawet do  $10^{10}$  J, przy czym ze względu na oddziaływanie tych wstrząsów na powierzchnię terenu, jako wstrząsy wysokoenergetyczne (silne i bardzo silne) traktuje się wstrząsy o energii  $10^6$  J i większej [5].

Przebiegi drgań powierzchniowych od wstrząsów górniczych wykazują pewne podobieństwa w stosunku do drgań wzbudzanych ruchami tektonicznymi

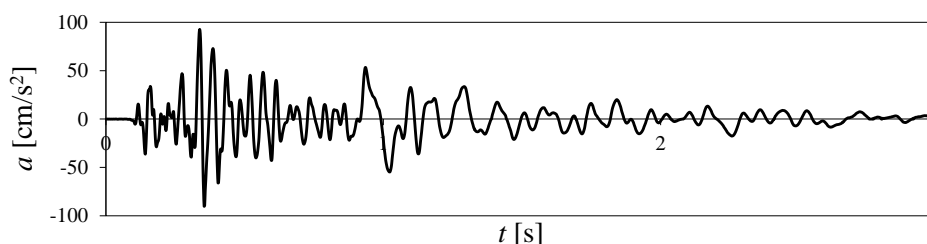
skorupy ziemskiej (trzęsieniami ziemi), ale też i różnice [14].

Parametrem, który wyraźnie odróżnia wstrząsy górnicze od trzęsień ziemi jest czas trwania intensywnej fazy przebiegów drgań [13, 14]. W przypadku trzęsień ziemi ten czas wynosi 20 s i więcej, a w przypadku wstrząsów górniczych 0,5 – 2,5 s.

Inną cechą różniącą wstrząsy górnicze i trzęsienia ziemi jest zasięg ich występowania. Intensywne drgania występują na ogół w obszarze do kilku, a nie kilkuset kilometrów, jak może być w przypadku trzęsień ziemi. Wstrząsy górnicze pojawiają się na określonych obszarach, ograniczonych zwykle do regionów górniczych.

Dominujące częstotliwości drgań powierzchniowych od trzęsień ziemi są dużo niższe niż od wstrząsów górniczych. Maksymalne wartości przyspieszeń drgań od wstrząsów górniczych osiągane są w zakresie częstotliwości 2,5–12,5 Hz, ale zdarza się dość często, że w paśmie 18–30 Hz, a nawet do 40 Hz [8]. W przypadku trzęsień ziemi jest to nie więcej niż kilka Hz.

Charakter przebiegów drgań powierzchniowych od wstrząsów górniczych jest bardzo nieregularny i złożony. Zmianie ulegają amplitudy drgań w czasie oraz częstotliwości, co przykładowo pokazano na rys. 2, a na dystansach kilkuset metrów występują znaczne wahania intensywności wstrząsów górniczych, niezależnie od różnic w lokalnej budowie geologicznej podłoża.



Rys. 2. Przykładowy przebieg poziomych drgań powierzchniowych (przyspieszeń) wzbudzonych wstrząsem górniczym o energii  $3,5E7$  J i odległości epicentralnej 655 m w LGOM

Fig. 2. Example of horizontal surface vibrations (accelerations) induced by rockburst with energy  $3,5E7$  J and epicentral distance 665 m in LGOM

Wstrząsy górotworu towarzyszące eksploatacji górniczej występują w wielu zagłębiach górniczych na świecie, np. w Wielkiej Brytanii, w Zagłębiu Ruhry w Niemczech, w Republice Południowej Afryki i w Stanach Zjednoczonych.

W Polsce powstawanie zjawisk sejsmicznych, czyli wstrząsów górniczych, związane jest z prowadzeniem eksploatacji w podziemnych kopalniach Górnośląskiego Zagłębia Węglowego (GZW) i Legnicko-Głogowskiego Okręgu Miedziowego (LGOM) oraz w odkrywkowej kopalni węgla brunatnego w Bełchatowskim Okręgu Węgla Brunatnego (BOWB).

Najbardziej aktywnym sejsmicznie jest obszar LGOM. W rejonie LGOM zalegające nad złożem skały wapienno dolomitowe i anhydryty gromadzą ener-

gię sprężystą wyzwalając ją przy pękaniu. Również znaczna głębokość eksploatacji (600 – 1100 m) i stosowany sposób eksploatacji (na zawał) sprzyjają akumulacji energii. Najsilniejsze zjawiska sejsmiczne na tym terenie mają charakter słabych trzęsień ziemi.

Na terenach GZW i LGOM sejsmiczność jest monitorowana. Przebiegi drgań powierzchniowych są rejestrowane w powierzchniowych stacjach sejsmicznych. Czujniki umieszczone są na gruncie, na fundamencie budynku oraz na jego wyższych kondygnacjach. Celem monitoringu sejsmometrycznego jest ocena parametrów drgań w określonym punkcie powierzchni – pomiar rzeczywistego poziomu drgań powodowanych wstrząsami górnictwymi [6].

### 3. Spektra odpowiedzi drgań powierzchniowych w LGOM

Spektrum odpowiedzi zawiera informacje o wymuszeniu kinematycznym, a jego idea bazuje na przyjęciu modelu obiektu w postaci oscylatora, którego drgania wymuszane są ruchem podłoża. Jest to funkcja wyrażająca maksymalne wartości odpowiedzi (przyśpieszenia, prędkości, przemieszczenia) modeli oscylatorów na tego typu wymuszenie, w zależności od częstotliwości  $f$  (ewentualnie okresów  $T = 1/f$ ) drgań własnych oscylatorów oraz założonego tłumienia [1, 7]. Rozróżnia się spektrum przemieszczeniowe  $S_d$ , prędkościowe  $S_v$  i przyśpieszeniowe  $S_a$ . Wyrażają one odpowiedź oscylatora odpowiednio w przemieszczeniach i prędkościach względnych oraz w przyśpieszeniach bezwzględnych.

Maksymalna wartość bezwzględnego przyśpieszenia oscylatora (będąca sumą względnego przyśpieszenia oscylatora i przyśpieszenia podłoża) występującego w chwili  $t_m$  należącej do przedziału czasu  $[0, t_1]$  ( $t_1$  – czas trwania drgań) nosi nazwę bezwzględnego przyśpieszeniowego spektrum odpowiedzi  $S_a$ :

$$S_a(f_i, \xi) = \max_{t \in [0, t_1]} \left| \ddot{y}(t, f_i, \xi) + \ddot{x}_g(t) \right| \quad (1)$$

gdzie:  $f_i$  – częstotliwość drgań własnych oscylatora [Hz],

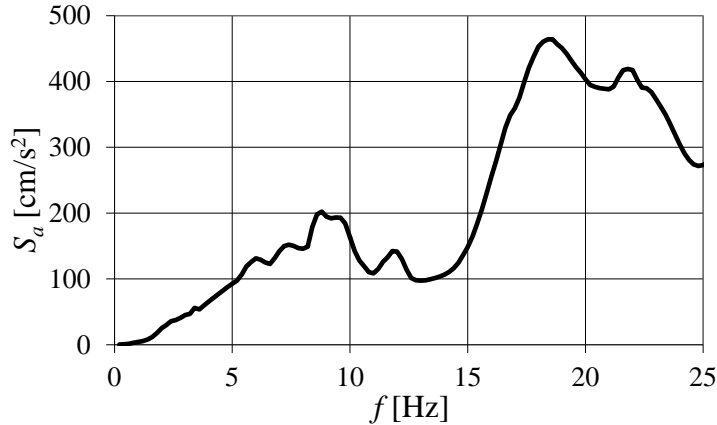
$\xi$  – ułamek tłumienia krytycznego,

$\ddot{y}(t, f_i, \xi)$  – odpowiedź oscylatora, względne przyśpieszenie drgań,

$\ddot{x}_g(t)$  – przyśpieszenie drgań podłoża.

Na rys. 3 przykładowo pokazano spektrum odpowiedzi  $S_a$  obliczone na podstawie przebiegu przyspieszeń drgań z rys. 2.

Z kolei tzw. unormowane (bezwymiarowe) przyśpieszeniowe spektrum odpowiedzi  $\beta$  powstaje jako wynik podzielenia wartości przyśpieszeniowego spektrum odpowiedzi przez maksymalną wartość przyśpieszenia drgań odpowiadającą poszczególnym akcelerogramom:



Rys. 3. Spektrum odpowiedzi  $S_a$  wyznaczone na podstawie przebiegu drgań z rys. 2

Fig. 3. Response spectrum  $S_a$  from vibrations presented in Fig. 2

$$\beta = \frac{S_a(f_i, \xi)}{a_{\max}} \quad (2)$$

gdzie:  $S_a$  – przyspieszeniowe spektrum odpowiedzi,  
 $a_{\max}$  – maksymalne przyspieszenie drgań.

Spektra odpowiedzi stosuje się przy projektowaniu konstrukcji, jak również do określania odporności dynamicznej istniejących budynków. Takie podejście dla rejonów sejsmicznych zalecają normy Eurocode8 (EC8) [16] i normy ISO [17] wykorzystują metodę spektrum odpowiedzi. Polska norma [18] również dopuszcza obliczanie sił bezwładności z uwzględnieniem przyspieszeniowego spektrum odpowiedzi  $S_a$ . Instrukcja [19] zaleca stosowanie spektrum odpowiedzi jako narzędzia, które pełni istotną rolę w analizie dynamicznej obiektu poddanego działaniu wstrząsów górniczych.

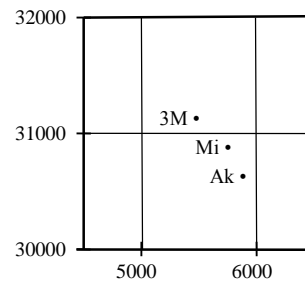
Ze względów praktycznych i ekonomicznych, w praktyce inżynierskiej nie jest możliwa rejestracja wymuszenia kinematycznego osobno dla każdego budynku i każdego wstrząsu. Dopuszcza się więc stosowanie tzw. uśrednionego spektrum odpowiedzi. Takie uśrednione spektra odpowiedzi przygotowuje się na podstawie bardzo dużej liczby zarejestrowanych przebiegów drgań, oddzielnie dla każdego regionu wstrząsów. Spektrum to ma określić spodziewaną maksymalną odpowiedź dla danych warunków lokalnych (określone źródła drgań, odległości epicentralne, rodzaj podłoża). Przy konstruowaniu spektrum uśrednionych korzysta się z pomiarów drgań od wielu wstrząsów o różnej intensywności. Z uwagi na to, że uśrednione spektrum powstaje na podstawie bardzo dużej liczby zarejestrowanych przebiegów drgań, pozwala na uogólnienie i może być trak-

towane jako znormalizowane, standardowe, wzorcowe spektrum odpowiedzi [12, 16, 17].

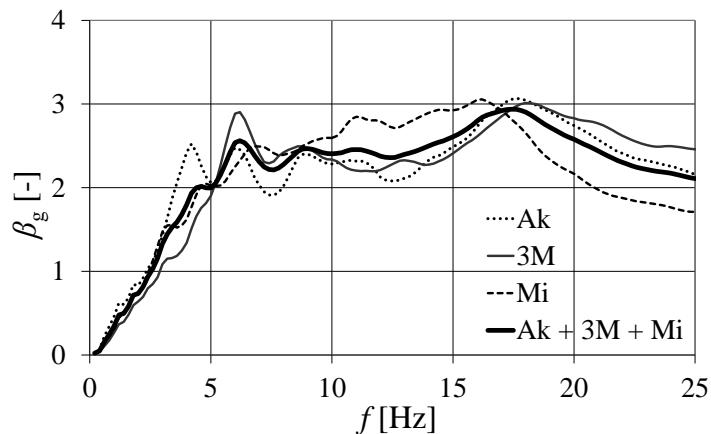
W celu scharakteryzowania drgań powierzchniowych w LGOM wykorzystano zapisy przebiegów składowych poziomych przyspieszeń drgań zarejestrowanych na trzech stacjach seismologicznych w Polkowicach. Na rys. 4 pokazano położenie stacji względem siebie w lokalnym układzie współrzędnych seismologicznych stosowanych w LGOM.

Rys. 4. Lokalizacja stanowisk pomiarowych Ak, 3M, Mi z uwzględnieniem lokalnych współrzędnych seismologicznych w LGOM

Fig. 4. Position of measuring stations Ak, 3M, Mi in the local seismological coordinates in LGOM



Dokonano selekcji zarejestrowanych przebiegów składowych poziomych  $x$ ,  $y$  przyspieszeń drgań gruntu. Kryterium selekcji była maksymalna wartość przyspieszenia przebiegu składowej drgań nie mniejsza niż  $10 \text{ cm/s}^2$ . Wykorzystując kilkaset obliczonych bezwymiarowych spektrum odpowiedzi (dla  $\xi = 3\%$ ) od składowych poziomych przebiegów przyspieszeń drgań, sporządzano uśrednione spektra, które następnie poddano iteracyjnej procedurze wygładzenia opisanej w [11]. Na rys. 5 pokazano uśrednione bezwymiarowe spektra odpowiedzi drgań

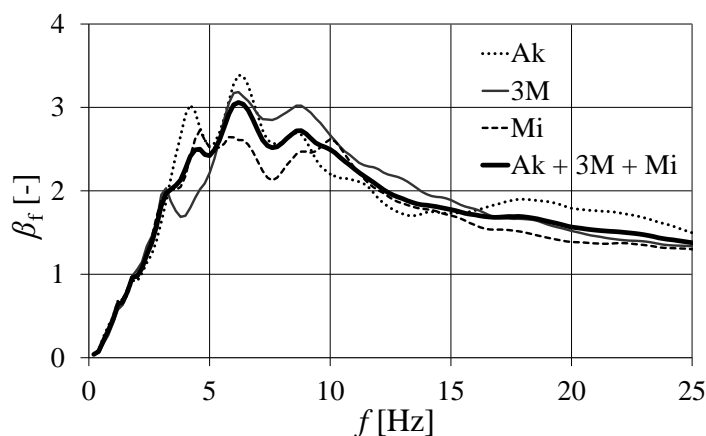


Rys. 5. Uśrednione bezwymiarowe spektra odpowiedzi drgań gruntu ze stanowisk Ak, 3M, Mi oraz wyznaczone łącznie na podstawie drgań ze wszystkich tych stanowisk

Fig. 5. Averaged dimensionless response spectra of ground vibrations from seismological stations at Ak, 3M, Mi and total spectrum designated on the basis of data from all stations

gruntu ze stanowisk Ak, 3M i Mi oraz łączne wyznaczone na podstawie przebiegów drgań pomierzonych na wszystkich ww. stanowiskach. Porównując te przebiegi uśrednionych bezwymiarowych spektrów odpowiedzi zauważa się ich różnice, co może dowodzić zmiennych warunków gruntowych na stacjach sejsmologicznych.

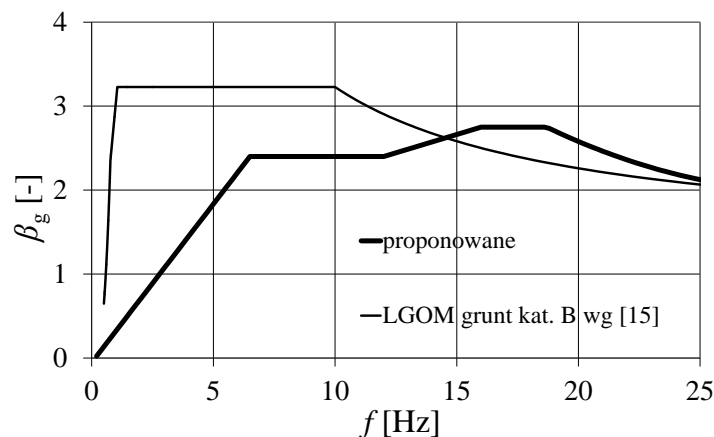
Dodatkowo na rys. 6 pokazano uśrednione bezwymiarowe spektra odpowiedzi otrzymane na podstawie drgań fundamentów budynków Ak, 3M, Mi (zarejestrowanych równocześnie z drganiami gruntu) oraz wyznaczone łącznie na podstawie drgań fundamentów budynków Ak, 3M, Mi. Porównując odpowiednie spektra z rys. 5 i rys. 6 zauważa się działanie budynku jako filtra dolnoprzepustowego. Wyraża się to spadkiem wartości spektrów obliczonych na podstawie przebiegów drgań fundamentów w zakresie częstotliwości powyżej 10 Hz.



Rys. 6. Uśrednione bezwymiarowe spektra odpowiedzi drgań fundamentów budynków Ak, 3M, Mi oraz wyznaczone łącznie na podstawie drgań ze wszystkich tych stanowisk

Fig. 6. Averaged dimensionless response spectra on the basis of foundation vibrations of buildings Ak, 3M, Mi and total spectrum designated on the basis of data from all stations

Wykorzystując uśrednione bezwymiarowe łączne spektrum odpowiedzi drgań gruntu wyznaczone na podstawie drgań pomierzonych na stanowiskach Ak, 3M, Mi, zaproponowano wzorcowe (standardowe) spektrum odpowiedzi o prawdopodobieństwie przekroczenia równym 50%, tzw. uniform risk spectrum – por. rys. 7. Opisy matematyczne gałęzi krzywych spektralnych zestawiono w tabeli 1. Zaproponowane spektrum porównane zostało ze spektrum podanym w [15] do wykorzystania w LGOM dla kategorii gruntu B (ten przypadek gruntu dominuje w obrębie Polkowic). Krzywa spektralna z [15] została przeskalowana z użyciem współczynnika  $\eta = \sqrt{5/\xi}$ , w którym przyjęto  $\xi = 3\%$  (w celu ujednoczenia tłumienia).



Rys. 7. Porównanie proponowanego dla LGOM wzorcowego (standardowego) spektrum odpowiedzi ze spektrami z [15]

Fig. 7. Comparison of the proposed standard response spectrum for LGOM with spectrum from [15]

Porównanie zaproponowanej krzywej wzorcowej z krzywą z [15] wskazuje na istotne różnice. Podane w [15] spektrum sporządzone zostało na podstawie danych pomiarowych dotyczących tylko najsilniejszych wstrząsów i przebiegów drgań z dominującymi składowymi z niskimi częstotliwościami, z myślą o spektrum przydatnym przede wszystkim do projektowania czy weryfikacji budynków wysokich z rejonu Polkowic. Proponowana krzywa z rys. 7, która powstała z wykorzystaniem kilkuset pomierzonych, różnych przebiegów drgań (z założeniem, że maksymalna wartość przyspieszenia przebiegu składowej drgań jest nie mniejsza niż  $10 \text{ cm/s}^2$ ), jest przydatna do stosowania w przypadku budynków niższych.

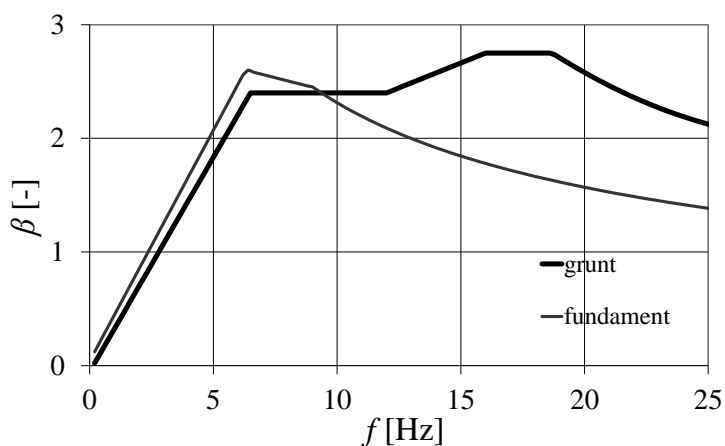
Tabela 1. Opis matematyczny proponowanego spektrum wzorcowego  $\beta_g$  z rys. 7

Table 1. The mathematical description of the proposed standard response spectrum  $\beta_g$  from Fig. 7

$f$ [Hz]	Równanie $\beta_g$
(0, 6,5]	$0,3775 \cdot f - 0,0540$
(6,5, 12,0]	2,4
(12,0, 16,0]	$0,0875 \cdot f + 1,3500$
(16,0, 18,6]	2,75
(18,6, 25,0]	$0,0063 \cdot f^2 - 0,3744 \cdot f + 7,5472$

Na rys. 8 pokazano porównanie krzywych wzorcowych spektrów uzyskanych na podstawie drgań gruntu i fundamentów. Krzywe te istotnie różnią się

i dowodzą istotnego tłumiącego wpływu drgań przez budynki. Opisy matematyczne gałęzi krzywych spektralnych uzyskanych na podstawie drgań fundamentów budynków zestawiono w tabeli 2.



Rys. 8. Porównanie proponowanego dla LGOM wzorcowego (standardowego) spektrum odpowiedzi wyznaczonego na podstawie drgań gruntu i fundamentów budynków

Fig. 8. Comparison of the proposed standard response spectrum from ground and foundation vibrations

Tabela 2. Opis matematyczny spektrum wzorcowego  $\beta_f$  z rys. 8

Table 2. The mathematical description of the proposed standard response spectrum  $\beta_f$  from Fig. 8

$f$ [Hz]	Równanie $\beta_f$
(0, 6,5]	$0,4063 \cdot f - 0,0410$
(6,5, 9,2]	$-0,0556 \cdot f + 2,9615$
(9,2, 25,0]	$8,6522 \cdot f^{-0,568}$

#### 4. Uwagi końcowe

W pracy przedstawiono propozycję wzorcowego spektrum odpowiedzi drgań gruntu do wykorzystania w projektowaniu w rejonie LGOM. Postać tego spektrum bazuje na wynikach setek pomiarów przebiegów drgań.

Opracowane wzorcowe spektra odpowiedzi na podstawie równoczesnych zapisów składowych poziomych drgań gruntu i budynków pozwoliły na doświadczalne określenie zjawiska dynamicznej interakcji grunt – budynek. Widać różnice w dominujących pasmach częstotliwości drgań, zwłaszcza w paśmie powyżej 10 Hz.

## Literatura

- [1] Chmielewski T., Zembaty Z.: Podstawy dynamiki budowli, Arkady, Warszawa 1998.
- [2] Ciesielski R., Maciąg E.: Drgania drogowe i ich wpływ na budynki, WKiŁ, Warszawa 1990.
- [3] Juhásová E.: Pôsobenie seizmických pohybov na stavebné konštrukcie, VEDA Vydavateľstvo Slovenskej Akadémie Vied, Bratislava 1985.
- [4] Kuźniar K.: Sieci neuronowe w analizie drgań budynków wywołanych wstrząsami parasejsmicznymi i sejsmicznymi, Wyd. Politechniki Krakowskiej, Kraków 2013.
- [5] Kuźniar K., Maciąg E., Tataro T.: Prognozowanie spektrów odpowiedzi drgań fundamentów budynków od wstrząsów górniczych z zastosowaniem sieci neuronowych, Prace Naukowe GIG. Górnictwo i Środowisko, nr 4/4/2010, 50-64.
- [6] Kwiatek J. (red.): Ochrona obiektów budowlanych na terenach górniczych, Wyd. GIG, Katowice 1998.
- [7] Maciąg E.: Interakcja układu budynek-podłoże podlegającego działaniom sejsmicznym i parasejsmicznym (praca przeglądowa), Mechanika Teoretyczna i Stosowana, 17, 4, 1979, 497-536.
- [8] Maciąg E.: Drgania powierzchniowe w LGOM i ich oddziaływanie na zabudowę, XXV Zimowa Szkoła Mechaniki Górniczej, Kraków 2002, 395-410.
- [9] Naem F. (ed.): The seismic design handbook, Boston, Kluwer 2001.
- [10] Sokołow W.J.: Ocena wierojatnych spektrów kolebanij grunta spektrów reakcji s ucietom łokalnych gruntowych usłowij, [w:] Kompleksnaja ocenka sejsmiczieskoj opasnosti, Woprosy inżeniernoj sejsmologii, Wypusk 32, Moskwa 1991.
- [11] Tataro T.: Działanie drgań powierzchniowych wywołanych wstrząsami górniczymi na niską tradycyjną zabudowę mieszkalną, Zeszyty Naukowe Politechniki Krakowskiej, seria Inżynieria Lądowa, nr 74, Kraków 2002.
- [12] Tataro T.: Odporność dynamiczna obiektów budowlanych w warunkach wstrząsów górniczych, Wyd. PK, Kraków 2012.
- [13] Trifunac M. B., Brady A. G.: A study on the duration of strong earthquake ground motion, Bull. Seismol. Soc. Am., 65, 1975, 581-626.
- [14] Zembaty Z.: Rockburst induced ground motion – a comparative study, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 24, 2004, 11-23.
- [15] Zembaty Z.: Prędkościowa koncepcja oceny intensywności wstrząsów górniczych dla celów projektowania budowli narażonych na wstrząsy górnicze. [w:] Zagrożenia i technologie. Praca zbiorowa pod red. J. Kabiesza, Katowice, GIG, 2012, 405 - 411.
- [16] EN 1998-1 Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance – Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings, (European standard EN 1998, January 2014).
- [17] ISO/DIS 3010, Basis for design of structures – Seismic actions on structures, wersja z 2000r.
- [18] PN-85/B-02170, Ocena szkodliwości drgań przekazywanych przez podłoże na budynki.
- [19] Wymagania techniczne dla obiektów budowlanych wznoszonych na terenach górniczych, Instrukcja 364/2000, ITB, Warszawa 2000.

## NORMALIZED RESPONSE SPECTRA FROM SURFACE VIBRATIONS INDUCED BY MINING TREMORS

### Summary

The paper deals with one of the methods of kinematic loads describing - using the re-sponse spectra. It also presents the proposition of the drawn up standard acceleration re-sponse spectrum for the most seismically active mining area in Poland – Legnica-Glogow Coppefield (LGOM). This type of spectrum can be applied for approximate dynamic analyzes. This spectrum was determined on the basis of ground vibrations recorded over several years at three measuring stations. Only the selected vibrations with amplitudes not less than  $10\text{cm/s}^2$  were taken into account in the calculations, hundreds in total. The statement of the average dimensionless acceleration response spectra prepared for each of the station separately, enables to determine the effect of soil conditions on the form of the resulting spectrum. A comparison of the proposed standard spectrum with corresponding spectra given in the literature was performed, showing and analyzing the differences. In addition, the proposed standard response spectrum prepared on the basis of ground vibrations was compared with the spectrum from foundation vibrations (for three types of buildings: low, medium-height, high). These curves are markedly different and show a strong damping of higher frequencies by buildings.

**Keywords:** standard response spectrum, mining tremors, records of vibrations, experimental tests

DOI:10.7862/rb.2014.30

*Przesłano do redakcji: 30.05.2014 r.*

*Przyjęto do druku: 04.09.2014 r.*