

Wybrane zagadnienia metodyki pomiarowej w aspekcie oceny wpływu drgań na ludzi w budynkach

Dr inż. Alicja Kowalska-Koczwara, prof. dr hab. inż. Krzysztof Stypuła, Politechnika Krakowska

1. Wprowadzenie

Drgania propagujące się przez grunt do budynku mogą nie tylko uszkadzać konstrukcję budynku czy powodować jego przyspieszone zużycie, ale także mogą wpływać na komfort ich użytkownika. Wibracje te mogą być denerwujące dla mieszkańców budynków, a w skrajnych przypadkach mogą prowadzić do zaburzeń snu, bólów głowy i stanów nerwicowych [1–3]. Szczególnie drgania z zakresu niskich częstotliwości od 5 do 25 Hz mogą być szkodliwe, ponieważ w tym zakresie znajdują się częstotliwości rezonansowe ludzkich narządów wewnętrznych [4, 5]. Wpływ drgań na ludzi przebywających w budynkach, pomimo wielu badań przeprowadzonych w przeszłości, pomimo wymagań zawartych w normach, wciąż nie jest w pełni rozpoznany ze względu na subiektywny charakter percepcji drgań przez różnych ludzi. Świadczą o tym zmiany wprowadzane w ostatnich latach w normach poszczególnych krajów oraz w międzynarodowych normach ISO [6, 7].

2. Wybór budynków i lokalizacji punktów pomiarowych

Budynki, w których drgania propagujące się przez grunt do budynku mogą mieć negatywny wpływ na ludzi w nim przebywających, z reguły mieszczą się w tak zwanych strefach wpływów dynamicznych (tabela 1). Należy jednak pamiętać, że zakres wpływów dynamicznych może być znacznie większy ze względu na warunki gruntowe lub rodzaj przejeżdżających pojazdów [8].

Tabela 1. Zakres stref wpływów dynamicznych

Źródło drgań	Zakres [m]
Linia kolejowa	65–80
Droga, linia tramwajowa	15–25
Linia płytkiego metra	40

Niezwykle ważnym aspektem pomiaru wpływu drgań na ludzi w budynkach jest wybór lokalizacji punktów pomiarowych. Pod tym względem istnieją pewne różnice w przepisach różnych krajów. Zgodnie z normą ISO [6] pomiary drgań przenoszone na ciało ludzkie powinny być mierzone

na powierzchni między ciałem a tą powierzchnią. To bardzo nieprecyzyjna definicja. Z drugiej strony w normie ISO [7] jest napisane, że drgania przenoszone na ciało ludzkie powinny być mierzone w środku sztywnych powierzchni (zwykle w odległości nie przekraczającej 10 cm od środka). Ta bardziej precyzyjna definicja wynika z zakresu normy ISO [9], która zawiera wymagania dotyczące głównie drgań o charakterze ogólnym, jednakże jest normą podstawową i z braku innych przepisów precyzujących to zagadnienie badacze właśnie na nią się powołują. Brytyjska norma [10] w tej dziedzinie nie jest tak restrykcyjna jak ISO [9]. Wskazuje środek pomieszczenia, ale zasięg strefy, w której można wykonać pomiary wpływu wibracji na ludzi, wynosi od 1/3 do 2/3 długości/szerokości stropu. Zgodnie z polską normą [11] punkty pomiarowe powinny znajdować się w co najmniej jednym pomieszczeniu na najwyższym piętrze (w przypadku drgań transportowych powierzchniowych), jak najbliżej źródła wzbudzenia. Punkt pomiarowy powinien znajdować się w środku pomieszczenia, pod warunkiem, że nie ma wskazań dla jego innej lokalizacji (np. nietypowy układ konstrukcyjny stropu). Wydaje się, że wymagania zapisane w polskiej normie znajdują się po bezpiecznej stronie, podczas gdy wymagania brytyjskiej normy powinny zostać zbadane.

3. Wybór odpowiedniego sprzętu pomiarowego

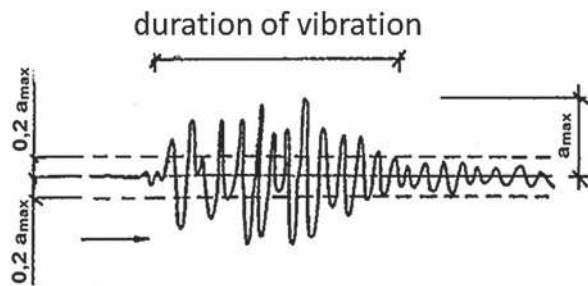
Podczas pomiarów można rejestrować przemieszczenia, prędkości i przyspieszenia drgań. Najczęściej obecnie rejestrowane są przyspieszenia drgań, co jest związane z łatwą oceną wpływu drgań na ludzi przy użyciu tego parametru. Podczas pomiarów ważne są również urządzenia, które powinny umożliwić prawidłowe rejestrowanie sygnału już od 1 Hz, a nawet poniżej tej wartości. Pomiary, choć w większości przypadków decydującą rolę odgrywa kierunek pionowy, powinny odbywać się jednocześnie w trzech kierunkach ortogonalnych: kierunek „x” przyjmuje się we wszystkich pomiarach jako prostopadły do wymuszenia, kierunek „y” jest równoległy, a „z” to kierunek pionowy. Zgodnie z normą [11] zaleca się stosowanie dysku pomiarowego, który powinien mieć masę co najmniej 30 kg i średnicę 30 cm (rys. 1).

Rys. 1. Dysk pomiarowy



4. Rejestracja i analiza sygnału

Rejestracja sygnału powinna zawierać częstotliwości w zakresie od 1 do 120 Hz, tak aby po zastosowaniu filtra dolno-przepustowego częstotliwości do 80 Hz mogły zostać uwzględnione w ocenie. Odrębnym aspektem jest czas trwania drgań, który zgodnie z [11] mieści się w zakresie, w którym wartość amplitud przyspieszenia drgań nie spada poniżej 0,2 maksymalnej wartości amplitudy w zapisanym kształcie fali (rys. 2).



Rys. 2. Ilustracja czasu trwania drgań

Norma ISO [9] stosowana głównie do pomiarów drgań o charakterze ogólnym wymaga, aby czas rejestracji sygnału wynosił co najmniej 30 minut. Norma [7] zawiera odniesienie do czasu trwania drgań, który stwierdza, że zarejestrowany sygnał powinien być wystarczający do zapewnienia racjonalnej dokładności statystycznej. Ta definicja jest bardzo szeroka i nieprecyzyjna, a czas trwania drgań ma znaczący wpływ na wyniki analizy sygnału, zwłaszcza w odniesieniu do metody RMS szeroko stosowanej i zalecanej w [7]. W niemieckim standardzie [12] analiza odbywa się w cyklach trwających 30 sekund, a następnie dane z cykli są uśredniane. Ostatnim aspektem związanym z analizą danych pomiarowych jest częstotliwość próbkowania zarejestrowanego sygnału, która zgodnie z kryterium Nyquista [15] powinna odpowiadać zasadzie, że najwyższa częstotliwość zarejestrowana w sygnale (f_N) stanowi połowę częstotliwości próbkowania (f_s):

$$f_N = \frac{f_s}{2} \quad (1)$$

Oznacza to, że przy częstotliwości odcięcia f_N równej 120 Hz częstotliwość próbkowania f_s powinna wynosić co najmniej 240 Hz. W praktyce wartość minimalna jest ustalana na 2,5-krotność najwyższej zarejestrowanej częstotliwości, tj. w przypadku wibracji u ludzi częstotliwość próbkowania powinna wynosić co najmniej 300 Hz. Im wyższa wartość f_s , tym lepsza jest jakość wyników, ale jednocześnie dłuższy jest czas analizy i większe są wymagania sprzętowe.

5. Metody oceny

Istnieją trzy najpopularniejsze metody oceny wpływu drgań na ludzi w budynkach: metoda średniokwadratowa (RMS), metoda dawki wibracji (VDV) i metoda maksymalnej wartości chwilowej drgań (MTVV). Metoda RMS nazywana jest „metodą podstawową” w normie [9], podczas gdy metody VDV i MTVV nazywane są metodami dodatkowymi. Te dwie metody, zwłaszcza VDV, są zalecane jako dodatkowe metody w sytuacjach dużych wartości współczynnika szczytu. Metoda RMS uśrednia wartości przyspieszenia w czasie trwania drgań:

$$a_w = \left[\frac{1}{T} \int_0^T a_w^2(t) dt \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

gdzie:

$a_w(t)$ – jest wartością ważoną przyspieszenia drgań w funkcji czasu [m/s^2],

T – jest czasem pomiaru [s].

Metoda MTVV również uśrednia wartości przyspieszenia, ale jest bardziej wrażliwa na okazjonalne wstrząsy i wibracje przejściowe dzięki zastosowaniu krótkiej stałej czasowej całkowania:

$$a_w(t_0) = \left[\frac{1}{\tau} \int_{t_0-\tau}^{t_0} a_w^2(t) dt \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3a)$$

$$MTVV = \max [a_w(t_0)] \quad (3b)$$

gdzie:

τ – jest czasem całkowania, zalecane jest użycie $\tau = 1$ s,

t_0 – jest czasem obserwacji (czas chwilowy).

Metoda VDV jest najlepsza do zastosowania w przypadku wystąpienia tzw. pików w zarejestrowanym sygnale, ponieważ wykorzystuje czwartą potęgę zamiast uśredniania, jak jest to stosowane w RMS i MTVV:

$$VDV = \left[\int_0^T a_w^4(t) dt \right]^{\frac{1}{4}} \quad (4)$$

W praktyce pomiarowej wpływu wibracji na ludzi wartości średnie przyspieszeń drgań są prezentowane w pasmach 1/3 oktawy. W rezultacie uzyskuje się informacje nie tylko

o przekroczeniu wartości progowych, ale także o paśmie częstotliwości, w którym to przekroczenie wystąpiło. Jest to szczególnie przydatne na etapie projektowania budynku, ponieważ można wówczas „dostroić” konstrukcję stropu lub nawet budynku w taki sposób, aby nie dochodziło do przekroczeń w poszczególnych pasmach. Metoda RMS wydaje się być najbardziej przydatną metodą. Najlepszą dodatkową metodą oceny wpływu wibracji na ludzi w budynkach, gdy w zarejestrowanym sygnale znajdują się piki, jest metoda VDV. Jego wrażliwość na wartości szczytowe w zarejestrowanym sygnale wynika ze wzoru (4), na podstawie którego jest on określany i w którym przyspieszenie drgań występuje w czwartej potęgzie. Wydaje się, że procedura określania wartości VDV jest zasadniczo podobna do procedury stosowanej w metodzie RMS. Problem pojawia się jednak na samym początku, gdy po zastosowaniu odpowiedniego filtra korekcyjnego należy zastosować wartości funkcji wagowych odpowiadające poszczególnym kierunkom drgań. Ponadto istnieją różnice w wartościach funkcji wagowych dla tych samych kierunków w różnych normach. Najlepszym przykładem jest porównanie dwóch norm, które jako pierwsze wprowadziły metodę VDV, tj. normy brytyjskiej [10] i ISO [9]. W obu normach występują różnice w wartościach funkcji wagowych w kierunku pionowym, podczas gdy w kierunkach poziomych różnice te są nieistotne.

6. Podsumowanie

Praktycznym aspektem artykułu jest metodologia pomiarowo-interpretacyjna, którą należy zastosować w ocenie wpływu drgań na ludzi przebywających w budynkach. Dodatkowymi praktycznymi wskazówkami odnoszącymi się do pomiarów drgań, tak aby wyniki oceny wpływu wibracji na ludzi były wiarygodne, jest lokalizacja punktu pomiarowego na stropie pomieszczenia w jego środku. Drugim ważnym aspektem poruszonym w artykule, zwłaszcza w kontekście dwóch różnych metod oceny, jest wpływ czasu trwania drgań na wyniki

oceny. Należy pamiętać, że VDV uwzględnia intensywność drgań wprost poprzez zastosowanie czwartej potęgi w swojej formule. Natomiast metoda RMS uwzględnia intensywność drgań poprzez współczynnik korygujący n . Stąd wpływ długości analizowanego sygnału na wynik oceny przeprowadzonej obydwojema metodami jest znaczący. Wydaje się, że zakres, w którym amplitudy przyspieszenia są większe niż 0,2 maksymalnej amplitudy, jest właściwy do zastosowania go jako czasu trwania drgań, chociaż jest on bardzo restrykcyjny.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Arnberg P. W., Bennerhult O., Eberhardt J. L., Sleep disturbances caused by vibrations from heavy road traffic, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 88 (3)1990, str. 1486–93
- [2] Croy I., Smith M. G., Persson Wayne K., Effects of Train Noise and Vibration on Human Heart Rate During Sleep: an Experimental Study, *BMJ Open* 2013;3:e002655
- [3] Findeis H., Peters E., Disturbing Effects of Low Frequency Sound Immisions and Vibrations in Residential Buildings, *Noise and Health* 6, 23, 2004, str. 29–35
- [4] Coermann R. R., The Mechanical Impedance of the Human Body in Sitting and Standing Position at Low Frequencies. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, October 4/1962, str. 227–253
- [5] Pradko F., Lee R., Kaluza V., Theory of human vibration response, S&T Reports, 1966
- [6] International Organization for Standardization, ISO 2631-1. Mechanical vibration and shock: Evaluation of human exposure to whole-body vibration – Part 1: General requirements, 1997
- [7] International Organization for Standardization, ISO 2631-2, Mechanical vibration and shock – Evaluation of human exposure to whole-body vibration – Part 2: Vibration in buildings (1 Hz to 80 Hz), 2003
- [8] Pachla F., The impact of the passenger train speed on the comfort of humans in a building close to the railway, *Vibroengineering Procedia*, wrzesień 2018, tom 19, str. 147–152
- [9] International Organization for Standardization ISO 2631-1, Evaluation of Human Exposure to Whole-Body Vibration Part 1: General requirements, 1985
- [10] British Standard BS 6472-1:2008, Guide to evaluation of human exposure to vibration in buildings. Part 1: Vibration sources other than blasting
- [11] PN-B-02171:2017-06, Evaluation of vibrations influence on people in buildings, Polish Standard, 2017
- [12] DIN 4150-2, Structural vibration, Part 2: Human exposure to vibration in buildings, 1999

Certyfikacja Krajowa

ogłasza nabór do kolejnej edycji
Ogólnopolskiego Programu Budowlanego!

DEWELOPER ROKU
2019

FIRMA
BUDOWLANA ROKU
2019

INWESTYCJA ROKU
2019

Program ma na celu wyłonienie oraz i promocję najlepszych deweloperów, inwestycji mieszkaniowych i komercyjnych, firm budowlanych, producentów i dystrybutorów materiałów budowlano-wykończeniowych oraz produktów

Nabór do programu trwa w okresie 23.09-25.10

Ogłoszenie zwycięzców, wręczenie certyfikatów i statuetek wraz z rocznym pakietem promocji odbędzie się **17 listopada** podczas finału **69. Targów Nowy DOM Nowe MIESZKANIE na PGE Narodowym**.