

Wojciech GOSK¹
Krzysztof CZECH²

OCENA KOMFORTU WIBRACYJNEGO LUDZI W BUDYNKU W ASPEKCIE ZMIANY JEGO FUNKCJI Z BIUROWEJ NA MIESZKALNĄ WEDŁUG NORM PN I ISO

W pracy przedstawiono problematykę oceny komfortu wibracyjnego ludzi w budynkach. Omówiono metody wyznaczania parametrów służących do oceny wpływu drgań na ludzi: widmo częstotliwościowe wartości skutecznej przyspieszenia lub prędkości w pasmach 1/3 oktaowych, wartość skuteczna przyspieszenia lub prędkości drgań skorygowana w pełnym zakresie analizowanych częstotliwości, dawka wibracji. Dokonano przeglądu wybranych metod umożliwiających ustalenie poziomu odczuwalności bądź szkodliwości propagowanych w otoczeniu drgań. Omówiono podejścia stosowane w wybranych normach krajowych i zagranicznych zwracając uwagę na podobieństwa i różnice. Stwierdzono, że poziomy dopuszczalności drgań są zasadniczo zbliżone w normie PN-B-02171:2017 i ISO 10137. Wybór odpowiedniego poziomu dopuszczalnych drgań zależy od przeznaczenia budynku (szpital, mieszkanie, biuro, warsztat), czasu trwania wibracji (ciągłe i przerywane albo sporadyczne) oraz pory występowania drgań (dzień, noc). Przedstawiono przykładowe wyniki oceny szkodliwości drgań na podstawie pomiarów wykonanych w budynku biurowym. Pomiar przeprowadzono za pomocą akcelerometrów zamocowanych w środku rozpiętości stropu nad pierwszą kondygnacją budynku. Założono możliwość zmiany przeznaczenia budynku z biurowego na mieszkalny. Ocenę przeprowadzono w oparciu o metodę analizy za pomocą widma częstotliwościowego wartości skutecznej przyspieszenia w pasmach 1/3 oktaowych. Komfort wibracyjny oceniono zarówno według normy PN-B-02171:2017 jak i ISO 10137. Stwierdzono przekroczenie wartości dopuszczalnych przyspieszeń drgań w analizowanym budynku. Zaproponowano wprowadzenie środków zaradczych w celu zmniejszenia poziomu drgań.

Słowa kluczowe: drgania, szkodliwość drgań, pomiar drgań, analiza tercjowa

¹ Autor do korespondencji / corresponding author: Wojciech Gosk, Politechnika Białostocka, Katedra Geotechniki i Mechaniki Konstrukcji, ul. Wiejska 45E, 15-351 Białystok; tel. +48 501704894; w.gosk@pb.edu.pl

² Krzysztof Czech, Politechnika Białostocka, Katedra Geotechniki i Mechaniki Konstrukcji, ul. Wiejska 45E, 15-351 Białystok; tel. +48 604662660; k.czech@pb.edu.pl

1. Wprowadzenie

Ocena szkodliwości drgań przekazywanych na obiekty budowlane jest jednym z aktualnych problemów inżynierii lądowej. Najczęściej analizie podlegają drgania będące wynikiem propagacji za pośrednictwem podłoża gruntowego od źródła wibracji do obiektu. Źródeł drgań może być wiele, w większości przypadków wibracje są wynikiem działalności człowieka. Przeważająca liczba opracowań, w których przeprowadzano ocenę szkodliwości drgań dotyczyła terenów zurbanizowanych. Jednym z głównych powodów tej oceny są drgania wywołane ruchem pojazdów, zarówno kołowych jak i szynowych. Drugą ważną grupę stanowią drgania wywoływane pracą maszyn budowlanych. Są to bardzo często maszyny stosowane w procesie zagęszczania gruntu. Drgania o szczególnie dużej intensywności są wzbudzane w czasie wbijania pali fundamentowych, przez co bardzo często zastosowanie tej technologii jest niedopuszczalne w sąsiedztwie bliskiej zabudowy. Istotne wartości przyspieszeń drgań generowane są również w trakcie zagłębiania i wyciągania elementów ścianek szczelnych.

Coraz częściej ocenie szkodliwości drgań na obiekty budowlane towarzyszy również ocena wpływu drgań na ludzi. O ile o wpływie drgań na budynki napisano wiele prac to znacznie mniej miejsca poświęca się temu drugiemu problemowi. W literaturze polskiej znaleźć można przede wszystkim opracowania pochodzące z Politechniki Krakowskiej. W Polsce, do momentu pojawienia się monografii [1], praktycznie nie istniały bardziej całościowe opracowania z tego zakresu.

2. Przegląd parametrów i kryteriów oceny komfortu wibracyjnego ludzi w budynkach

Nieodzownym elementem wiarygodnej oceny wpływu drgań na człowieka są właściwie przeprowadzone pomiary. Ponieważ ocena szkodliwości drgań w przeważającej mierze bazuje na wibrogramach przyspieszeń lub prędkości drgań do tego celu wykorzystywane są przede wszystkim akcelerometry i geofony. Zarejestrowane sygnały w postaci przebiegów czasowych przyspieszeń bądź prędkości drgań muszą zostać poddane odpowiedniemu cyfrowemu przetworzeniu (m.in.: filtracja dolnoprzepustowa, wyznaczenie wartości skutecznych – tzn. średnich kwadratowych wartości chwilowych, analizy tercjowe). Zgodnie z [1] najczęściej stosowane są trzy parametry będące wynikiem tego przetwarzania i służące do oceny wpływu zarejestrowanych drgań na ludzi w budynkach:

- widmo częstotliwościowe wartości skutecznej przyspieszenia lub prędkości drgań w pasmach 1/3 oktawowych (tercjowych, od 1 do 80 Hz),
- wartość skuteczna przyspieszenia lub prędkości drgań skorygowana w pełnym zakresie analizowanych częstotliwości (od 1 do 80 Hz),
- dawka wibracji.

W zasadzie najpełniejszy obraz analizy szkodliwości drgań uzyskamy, gdy w ocenie uwzględnimy wszystkie trzy powyżej wymienione elementy. Najwięcej

informacji o poziomie zagrożenia wywołanego drganiami, które oddziałują na ludzi w budynkach podlegających nadmiernym wibracjom uzyskamy na podstawie widma częstotliwościowego drgań. Dzięki takiemu podejściu możliwe jest ustalenie poziomu komfortu wibracyjnego w różnych pasmach częstotliwości oraz przedsięwzięcie odpowiednich środków zaradczych ukierunkowanych na minimalizację wpływu drgań na użytkowników budynków. Środki te charakteryzują się zróżnicowaną skutecznością w poszczególnych zakresach częstotliwości, więc informacja zawarta w widmie drgań pozwala na optymalny ich dobór.

Wartość skuteczna przyspieszenia lub prędkości drgań skorygowana w całym paśmie częstotliwości wyznaczana jest w wyniku zastosowania podczas rejestracji sygnałów odpowiedniego filtru korekcyjnego, na przykład zgodnego z normą [2]. Taka metodyka prowadzi do uzyskania jednej wartości skutecznej przyspieszenia bądź prędkości drgań, a nie ich widma jak w poprzednim przypadku. Jest to więc wartość uśredniająca cały profil częstotliwościowy, która może być wykorzystywana do identyfikacji występowania lub nie problemu negatywnego wpływu drgań na ludzi w budynkach.

Innym kryterium sumującym oddziaływania różnorodnych drgań na człowieka jest dawka wibracji, która jest w zasadzie parametrem w największym stopniu uwzględniającym spośród omawianych czas narażenia ludzi na drgania. Wiedza o wartości dawki wibracji pozwala ustalić prawdopodobieństwo wystąpienia skarg mieszkańców (mało prawdopodobne, możliwe oraz prawdopodobne skargi mieszkańców) [1].

Wpływ drgań na ludzi w budynkach jest oceniany poprzez odniesienie analizowanego parametru uzyskanego w danym miejscu pomiarowym do odpowiedniej wartości, najczęściej normowej, która to opisuje poziom odczuwalności, czy też szkodliwości wibracji na człowieka. Istnieją unormowania wydane przez instytucje krajowe jak i zagraniczne, w których zamieszczono szczegółowe informacje odnośnie poziomów odczuwalności drgań przez ludzi w budynkach. Wynika z nich, że drgania naruszające komfort wibracyjny zawsze ten próg przekraczają. Krótki przegląd najczęściej stosowanych metod oceny ewentualnego wpływu drgań na ludzi przebywających w budynkach przeprowadzono poniżej.

Ocenę wpływu drgań na ludzi przebywających w budynkach przeprowadza się na podstawie normy PN-B-02171:2017 [2] w oparciu o wartości skuteczne przyspieszenia lub prędkości drgań skorygowane w całym paśmie częstotliwościowym albo za pomocą widma częstotliwościowego wartości skutecznych przyspieszenia lub prędkości w pasmach 1/3 oktawowych (tercjowych). W obydwu przypadkach sprawdzeniu podlegają przede wszystkim warunki nieprzekraczalności wartości dopuszczalnej przyspieszenia lub prędkości drgań, niezależnie dla kierunku pionowego drgań (z) i kierunków poziomych (x i y) (por. rys. 1).

W przypadku analizy bazującej na wartościach skorygowanych dopuszczalną wartość przyspieszenia lub prędkości otrzymuje się poprzez przemnożenie odpowiedniej wielkości, uważanej za próg odczuwalności drgań przez człowieka, przez współczynnik n . Przykładowo, podane w normie [2] wartości progowe przyspieszenia dla pionowego kierunku odbioru drgań (z) oraz kierunków poziomych (x i y)

wynoszą odpowiednio 0,00500 m/s² i 0,00357 m/s². Natomiast wartość współczynnika n , będącego mnożnikiem podanej wartości progowej wynosi od 1 do 128. Przyjęcie adekwatnej do ocenianej sytuacji wartości współczynnika n zależy od tego, czy mamy do czynienia z drganiami ciągłymi czy sporadycznymi, pory dnia (dzień, noc) oraz od przeznaczenia budynku. Przykładowo, w pomieszczeniach mieszkalnych dla drgań ciągłych, wartości współczynnika n wynoszą odpowiednio 1,4 w nocy oraz 4,0 w dzień.

W przypadku analizy prowadzonej w pasmach 1/3 oktaowych o częstościach środkowych f_i [Hz] w celu oceny komfortu wibracyjnego należy skorzystać z odpowiednich nomogramów (por. rys. 1 w Rozdziale 3 pracy). Nomogramy zostały wyrażone w układzie współrzędnych: wartość skuteczna amplitudy przyspieszenia (oś pionowa) – częstotliwość drgań (oś pozioma), niezależnie dla kierunku pionowego (z) i kierunków poziomych (x i y). Kolejne dwa analogiczne nomogramy dotyczą oceny w odniesieniu do prędkości drgań (oś pionowa). Najniższej położona linia łamana traktowana jest jako próg odczuwalności drgań przez człowieka (wartość współczynnika n dla tej linii wynosi 1, por. rys. 1). Drgania o wartościach wpisujących się poniżej tej linii norma [2] opisuje jako nieodczuwalne przez człowieka. Linie położone wyżej, oznaczone wartościami od 1,4 do 128 odpowiadają adekwatnym współczynnikom n . Wartość dopuszczalna przyspieszenia bądź prędkości drgań jest więc po prostu krotnością wartości odpowiadającej progowi odczuwalności. Metodyka przyjmowania odpowiedniej wartości współczynnika n jest identyczna z omówioną wcześniej. Wygodnym sposobem przeprowadzania oceny jest graficzne nanoszenie wyników w postaci „słupków” przypisanych odpowiednim częstościom środkowym pasm 1/3 oktaowych.

Metodyka oceny szkodliwości drgań na ludzi w budynkach proponowana w normie ISO [3] jest zgodna ze sposobem analizy w pasmach 1/3 oktaowych prezentowanym w polskiej normie [2]. W omawianej normie [3] można odnaleźć w załączniku C wykresy progów odczuwalności drgań w układzie współrzędnych: wartość skuteczna amplitudy przyspieszenia (oś pionowa) – częstotliwość drgań (oś pozioma), niezależnie dla kierunku pionowego (z) i kierunków poziomych (x i y). Linie te praktycznie pokrywają się z analogicznymi liniami zawartymi w normie polskiej [2] (linie $n = 1$ na rys. 1). Pierwszą z różnic w stosunku do normy [2] jest brak wykresów opisujących progi odczuwalności wyrażone prędkościami. Zasadniczą różnicą jeżeli chodzi o zawartość wykresów pomiędzy normą ISO [3], a PN [2] jest również fakt braku linii odpowiadających wartościom współczynnika n większym od jedności (tak jak ma to miejsce w polskiej normie [2]). Linie takie korzystający z normy jest niejako zmuszony „dorysować” samodzielnie, przyjmując wartości współczynnika n podane w tabeli C.1 załącznika C opisywanej normy ISO [3]. Brak jest jakościowych różnic pomiędzy współczynnikami n zawartymi w obydwu normach. Współczynniki w normie PN są podane bardziej jednoznacznie, natomiast współczynniki w normie ISO w niektórych przypadkach wymagają przyjęcia wartości z przedziału (np. 30-90). Przy wyborze odpowiedniej wartości z przedziału pomaga obszerny komentarz pod tabelą. Można z niego wywnioskować, że o przyjęciu adekwatnej do analizowanej sytuacji

wartości omawianego współczynnika n decydują czynniki kulturowe i społeczne oraz lokalizacja budynku (strefa miejska, pozamiejska). Należy oczywiście wziąć pod uwagę, czy mamy do czynienia z drganiami sporadycznymi czy ciągłymi bądź długotrwałymi (podobnie jak w normie PN [2]).

Zarówno norma ISO [3] jak i PN [2] wprowadza dodatkowo ocenę w postaci wyznaczenia dopuszczalnej dawki wibracji (ang. VDV). Inaczej przedstawia się problem oceny na podstawie wartości skutecznych przyspieszenia i prędkości drgań skorygowanych w całym zakresie częstotliwościowym – ocena ta jest z kolei nieobecna w normie ISO [3].

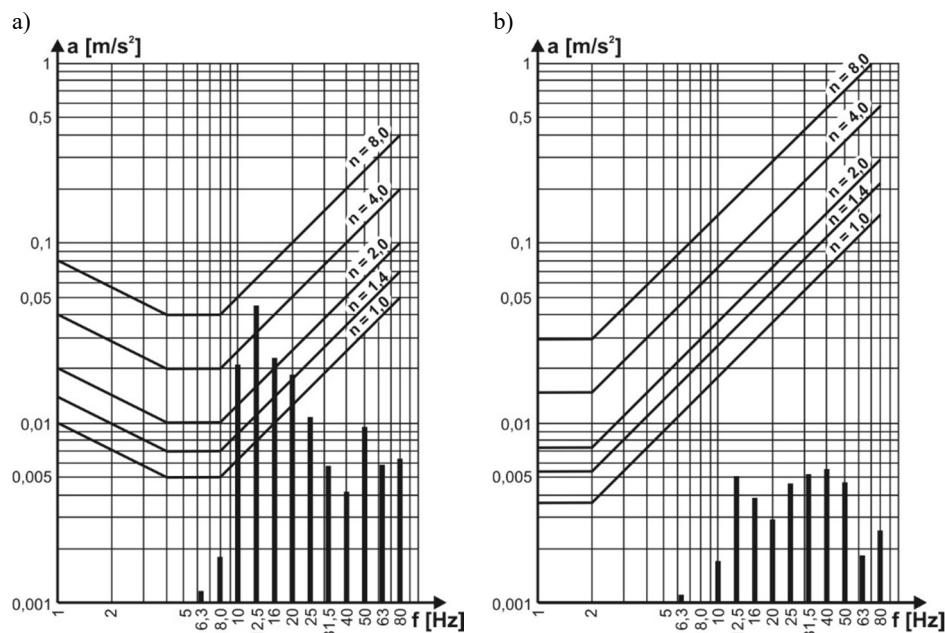
Z uwagi na ograniczenia objętościowe autorzy pracy ograniczyli się tylko do omówienia najczęściej stosowanych w Polsce procedur służących do oceny komfortu wibracyjnego ludzi w budynkach. Bardziej obszernie przedstawienie tej tematyki, rozszerzone o odpowiednie normy niemieckie DIN i brytyjskie BS, autorzy planują w kolejnych pracach.

3. Przykład oceny komfortu wibracyjnego ludzi w budynku narażonym na drgania komunikacyjne

3.1. Budynek biurowy

Ocena komfortu wibracyjnego ludzi w budynku biurowym została przeprowadzona na podstawie pomiarów drgań wywołanych poruszającymi się samochodami ciężarowymi. Przedmiotowy dwukondygnacyjny niepodpiwniczony budynek był wzniesiony w technologii tradycyjnej. Stan techniczny budynku oceniono jako dobry. W bezpośrednim sąsiedztwie obiektu, w odległości około 2,5 metra, przebiega ulica o nawierzchni z kostki granitowej. W wyniku przeprowadzonych obserwacji występujące wibracje zakwalifikowano do grupy drgań występujących w sposób ciągły i przerywany. Rejestrowanych wibracji nie można było zakwalifikować do drgań sporadycznych. Pomiary wykonano w związku ze skargami użytkowników budynku i ludności zamieszkującej w pobliżu drogi. Użyto szesnastobitowego systemu pomiarowego KSD-400 z niskoczęstotliwościowymi piezoelektrycznymi akcelerometrami firmy Dytran.

Ocena komfortu wibracyjnego ludzi w przedmiotowym budynku bazowała na widmie częstotliwościowym w pasmach tercjowych. Odniesiono się do wartości dopuszczalnych podanych w normie PN [2] i ISO [3]. Wyniki oceny komfortu wibracyjnego przedstawiono na rysunku 1. Stwierdzono, że kluczowe w ocenie komfortu wibracyjnego w analizowanym przypadku są składowe pionowe przyspieszeń drgań (rys. 1a). Składowe poziome, zarówno w kierunku x jak i w kierunku y osiągają wartości leżące stanowczo poniżej progu odczuwalności drgań przez człowieka (oznaczonego na wykresach linią $n = 1$). Z tego powodu przedstawiono na rysunku 1b tylko wyniki analizy tercjowej uzyskane dla składowej poziomej przyspieszeń drgań w kierunku x . Na rysunku nie przedstawiono rezultatów uzyskanych dla składowej y . Drgania rejestrowane w płaszczyźnie poziomej nie naruszają komfortu wibracyjnego ludzi w budynku.



Rys. 1. Wyniki oceny komfortu wibracyjnego ludzi w budynku - kierunek pionowy drgań z (a) oraz poziomy x (b): a - przyspieszenie (wartość skuteczna, RMS) [m/s^2], f - częstotliwość środkowa pasma [Hz]

Fig. 1. The results of evaluation of vibration comfort on people in buildings - vertical direction of vibrations z (a) and horizontal x (b): a - acceleration (Root Mean Square RMS) [m/s^2], f - frequency [Hz]

Odmienne przedstawia się sytuacja w przypadku składowej pionowej drgań. Należy tu wyraźnie stwierdzić naruszenie komfortu wibracyjnego ludzi w przedmiotowym budynku. W paśmie środkowym o częstotliwości drgań 12,5 Hz przekroczona jest linia oznaczona jako $n = 4$, będąca granicą komfortu wibracyjnego ludzi przebywających w budynku o przeznaczeniu biurowym. Uzyskana wartość skuteczna przyspieszenia drgań jest niedopuszczalna jeśli chodzi o ludzi przebywających w analizowanym budynku, zarówno według normy PN jak i normy ISO. Wniosek generalny jest taki, że należy podjąć stosowne działania w kierunku zmniejszenia poziomu drgań.

3.2. Budynek mieszkalny

Dokonując zmiany funkcji budynku z biurowej na mieszkalną wymagania odnośnie dopuszczalnych wartości przyspieszeń drgań wzrastają. W przypadku pasma środkowego o częstotliwości 20 Hz przekroczona jest nieznacznie linia oznaczona jako $n = 1,4$. Linia ta jest granicą komfortu wibracyjnego w budynku mieszkalnym w przypadku drgań ciągłych i przerywanych dla pory nocnej. Próg ten jest zdefiniowany identycznie zarówno w normie PN [2] jak i ISO [3]. W przypadku częstotliwości środkowych 10 i 16 Hz przekroczono linię oznaczoną

jako $n = 2$. Według normy PN w pasmach tych komfort wibracyjny, jaki powinien być zagwarantowany w ciągu dnia, nie został naruszony. Norma ISO nie jest w przypadku omawianych częstotliwości już tak jednoznaczna, gdyż dopuszcza wartości n z przedziału od 2 do 4. Wydaje się być generalnie bardziej ostrożna. Wybór odpowiedniej wartości z tego przedziału norma ISO uzależnia od czynników społecznych, kulturowych i psychologicznych oraz od oczekiwanego poziomu komfortu. W przypadku pasma środkowego 12,5 Hz przekroczona jest linia oznaczona jako $n = 4$. Pasma to najbardziej wpływa na ocenę generalną gdyż używano tam wartość przyspieszenia drgań niedopuszczalną jeśli chodzi o ludzi przebywających w budynkach nawet za dnia, zarówno według normy PN jak i ISO. Wniosek generalny jest w przypadku budynku mieszkalnego taki, że należy podjąć również działania zaradcze zmniejszające poziom drgań.

4. Wnioski

Ocena komfortu wibracyjnego ludzi w budynkach za pomocą normy PN-B-2171:2017 [2] w oparciu o analizę w pasmach tercjowych zasadniczo w niczym nie odbiega od metody proponowanej w normie ISO 10137 [3] wydanej w roku 2007. Z punktu widzenia prawnego norma polska jest podstawą do oceny komfortu wibracyjnego ludzi w budynkach, gdyż jest wymieniona w załączniku rozporządzenia [4]. Norma [2], w związku z wprowadzeniem do niej współczynnika dawki wibracji VDV, została w znacznym stopniu zharmonizowana z normą ISO [3]. Jest więc spójna z systemem norm europejskich.

Zmiana funkcji budynku z biurowej na mieszkalną zasadniczo nie wpłynęła na ocenę komfortu wibracyjnego ludzi, gdyż w obydwu przypadkach poziom drgań dopuszczalnych był przekroczony. O ile w budynku biurowym to przekroczenie było niewielkie i dotyczyło tylko pasma o częstotliwości środkowej 12,5 Hz, to w przypadku analizy przeprowadzonej przy założeniu funkcji mieszkalnej budynku naruszenie komfortu wibracyjnego było o wiele bardziej istotne, gdyż dotyczyło także pasm o częstotliwościach środkowych 10, 16 i 20 Hz.

W odniesieniu do problemu związanego z użytkowaniem budynku i stwierdzonym nadmiernym poziomem drgań zaproponowano działania naprawcze. W pierwszym etapie zalecono wprowadzić ograniczenia odnośnie ruchu pojazdów kołowych typu ciężkiego. Na decyzję o sposobie ostatecznego rozwiązania problemu miały wpływ wymagania konserwatora zabytków, który nie wyraził zgody na wymianę nawierzchni na asfaltową. Zasugerowano więc przeprowadzenie naprawy nawierzchni z kostki granitowej poprzez jej rozebranie i ponowne staranne ułożenie na nowej podbudowie. Prace takie przeprowadzono. Z informacji uzyskanych od administracji lokalnej wynika, że wykonana naprawa okazała się skuteczna. Drgania komunikacyjne naruszające komfort wibracyjny ludzi przebywających w przedmiotowym budynku w znacznym stopniu zostały zredukowane.

Literatura

- [1] Kawecki J., Stypuła K.: Zapewnienie komfortu wibracyjnego ludziom w budynkach narażonych na oddziaływania komunikacyjne, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 2013.
- [2] PN-B-02171:2017. Ocena wpływu drgań na ludzi w budynkach.
- [3] ISO 10137. Bases for design of structures - Serviceability of buildings and walkways against vibrations, 2007.
- [4] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie z dnia 12 kwietnia 2002 r. (Dz.U. Nr 75, poz. 690 z późniejszymi zmianami).

Badania zostały zrealizowane w ramach pracy nr S/WBiŚ/6/2013 i sfinansowane ze środków na naukę MNiSW

EVALUATION OF VIBRATION COMFORT OF PEOPLE IN BUILDING IN THE ASPECT OF CHANGING ITS OFFICE FUNCTION ON THE RESIDENT FUNCTION ACCORDING TO PN AND ISO STANDARDS

Summary

The paper presents the problem of the vibration comfort evaluation of people in buildings. It was presented the methods of determining the parameters for assessing the influence of vibration on humans: frequency spectrum of weighted root mean square acceleration or velocity in the 1/3 octave-bands, weighted RMS acceleration or velocity corrected in the full range of analyzed frequencies and vibration dose values. A review of selected methods to determine the level of perceptibility or harmfulness of vibration propagated in environment was made. There were discussed methods used in selected national and foreign standards noting the similarities and differences. It has been found that the levels of acceptability vibrations are substantially similar in the standard PN-B-02171:2017 and ISO 10137. Choosing an appropriate level of vibration limit depends on the place (hospital, flat, office, workshop), the duration of the vibration (continuous and intermittent or occasional) and the time of the vibrations (day, night). It was shown the examples of the results of assessing the harmfulness of vibration on the basis of measurements executed in an office building. Measurements were carried out using accelerometers mounted in the middle of the floor above the first storey of the building. It was assumed ability to change the use of the building from office on residential. The evaluation was based on the analysis method using a frequency spectrum of weighted root mean square acceleration in the 1/3 octave-bands. Vibration comfort was evaluated according to standards PN-B-02171:2017 and ISO 10137. It was found exceeding the limit values of vibration acceleration in the analyzed building. It was suggested to introduce changes to reduce the level of vibration.

Keywords: vibrations, harmfulness of vibrations, vibration measurement, one-third octave band

Przesłano do redakcji: 20.12.2017 r.

Przyjęto do druku: 29.12.2017 r.