

## PROJEKTOWANIE BUDYNKÓW Z UWZGLĘDNIENIEM WPŁYWU DRGAŃ KOMUNIKACYJNYCH NA LUDZI W BUDYNKACH

Janusz KAWECKI\* Krzysztof STYPUŁA\*\*

\*Politechnika Krakowska, Instytut Mechaniki Budowli,  
ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków, jkawec@usk.pk.edu.pl

\*\*Politechnika Krakowska, Instytut Mechaniki Budowli,  
ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków, kstypula@usk.pk.edu.pl

**Streszczenie:** Podano procedurę uwzględnienia w projektowaniu budynków wpływu drgań komunikacyjnych na ludzi w budynku. Podano przykład zastosowania praktycznego tej procedury. Kryteria oceny przyjęto z [2].

**Słowa kluczowe:** drgania komunikacyjne, wpływ drgań na ludzi.

### 1. WSTĘP

Zapisy zawarte w §3 ustawy [1] określają warunki realizacji programu zrównoważonego rozwoju, który zobowiązuje do zapewnienia jakości życia człowieka na poziomie, na jaki pozwala obecny rozwój cywilizacyjny i bez szkody dla przyszłych pokoleń. Podobnie w art. 5 ust. 1 ustawy „Prawo budowlane” zapisano, iż obiekt budowlany należy projektować i budować zgodnie z zasadami wiedzy technicznej zapewniając spełnienie wielu wymagań, wśród których wymieniono oprócz bezpieczeństwa konstrukcji i użytkowania również ochronę przed hałasem i drganiami oraz odpowiednie warunki zdrowotne i ochrony środowiska.

Tak więc wśród wielu różnych kryteriów oceny zapewnienia odpowiedniej jakości życia człowiekowi przebywającemu w budynku występują również te, które odnoszą się do ochrony przed drganiami. Drgania bowiem generowane pracą różnych urządzeń mogą niekorzystnie wpływać na środowisko człowieka. Mogą nie tylko doprowadzać do uszkodzeń budynków ale również naruszać warunki wymaganego komfortu w pomieszczeniach, w których przebywają ludzie.

Z wielu źródeł drgań występujących w bezpośrednim sąsiedztwie budynków rozpatruje się w niniejszej pracy wpływy dynamiczne generowane źródłami typu komunikacyjnego. Przejeżdżające po drodze kolejowej pojazdy generują hałas i drgania mechaniczne. Chociaż

obydwa te oddziaływania występują najczęściej razem, to jednak ich wpływ na środowisko analizowany jest odrębnie. Różnią się one bowiem zakresem częstotliwości i drogą propagacji. Wpływa to również na stosowane metody pomiarowe i kryteria ocen diagnostycznych odnoszące się do każdego z tych działań (por. [2, 3]).

Drgania wywołane przejazdami pojazdów kołowych przenoszą się przez podłoże do budynku, wzbudzając (jako tzw. wymuszenie kinematyczne) drgania jego konstrukcji, generując siły bezwładności obciążające dodatkowo konstrukcję i wywołując ruch budynku, działając na ludzi w nim przebywających.

W analizach związanych z oceną wpływu drgań na budowlę i ludzi wyróżnia się trzy podstawowe elementy: źródło drgań, drogę propagacji drgań oraz odbiornik drgań. W sytuacjach prezentowanych, w niniejszej pracy źródłem drgań będzie transport kołowy po powierzchni ziemi, odbiornikiem drgań człowiek przebywający w budynku, biernie odbierający drgania (tzn. nie mający bezpośredniego wpływu na źródło drgań).

W dotychczasowych procedurach stosowanych podczas projektowania budynków coraz częściej uwzględnia się również działania dynamiczne przekazywane przez podłoże. Występuje to wówczas, gdy poziom drgań przejmowanych przez budynek generuje siły bezwładności o wymaganej do uwzględnienia wartości. Wpływ tych działań dynamicznych uwzględnia się w warunkach nośności elementów konstrukcji. Występują jednak sytuacje, w których warto uwzględnić już w fazie projektowania wpływ drgań na ludzi przebywających w budynku. Wymagania w tym zakresie są bowiem często bardziej ostre niż wynikające z wpływu tych drgań na konstrukcję budynku.

## 2. SYTUACJE DIAGNOSTYCZNE I PROJEKTOWE

W tabeli 1 (za [4]) zestawiono główne przypadki diagnostyczne i projektowe odnoszące się do człowieka odbierającego drgania w zależności od stanu w jakim podczas opracowywania diagnozy i projektu znajdowało się źródło drgań i budynek odbierający drgania, w którym znajduje się człowiek.

Tabela 1. Przypadki diagnostyczne i projektowe w zależności od sytuacji źródła drgań i budynku

Oznaczenie przypadku	Źródło drgań	Obiekt odbierający drgania, człowiek w budynku:	Określenie przypadku
A	eksploatowane	zrealizowanym	diagnoza
B	projektowane	zrealizowanym	diagnoza z prognozą
C	eksploatowane	projektowanym	projektowanie
D	projektowane	projektowanym	projektowanie z prognozą

Najczęściej diagnoza dynamiczna dotyczy przypadku „A”. W wykonaniu oceny diagnostycznej wykorzystuje się tu wyniki uzyskane podczas bezpośrednich pomiarów drgań w miejscu odbioru ich przez człowieka i stosuje odpowiednie kryteria oceny. Przypadek „B” zaliczany jest również do diagnozy, ale w ocenach wpływów dynamicznych uwzględnia się tu prognozowane parametry drgań generowanych przez projektowane źródło. Wyznaczenie prognozowanych drgań wymaga dysponowania zbiorem wielu wiarygodnych wyników pomiarów przeprowadzonych w warunkach zbliżonych do objętych diagnozą. Zbiór taki stanowi bazę danych pomiarowych. Od obszerności tej bazy oraz precyzji identyfikowania odpowiednich parametrów opisu zależy w dużym stopniu wiarygodność diagnozy.

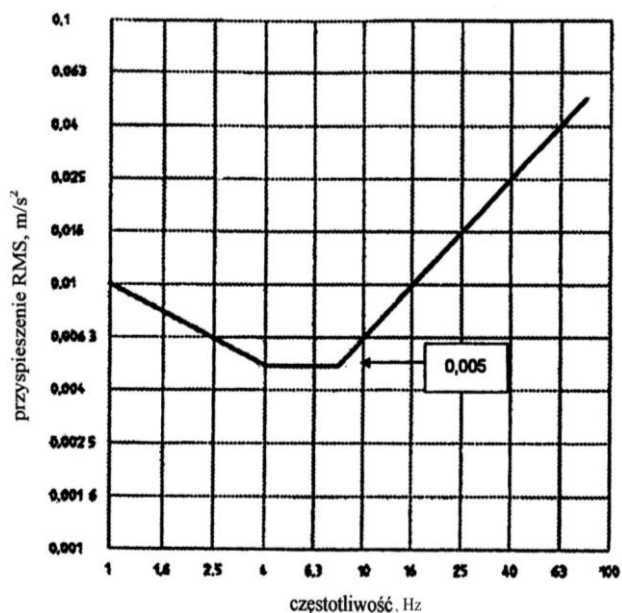
Przypadki „C” i „D” zalicza się do zadań projektowania, ale procedury wyznaczania parametrów charakteryzujących źródło drgań są zbliżone do stosowanych w przypadku „B”. W podobny sposób korzysta się też z bazy danych.

## 3. KRYTERIA OCENY WPLYWÓW DYNAMICZNYCH NA LUDZI

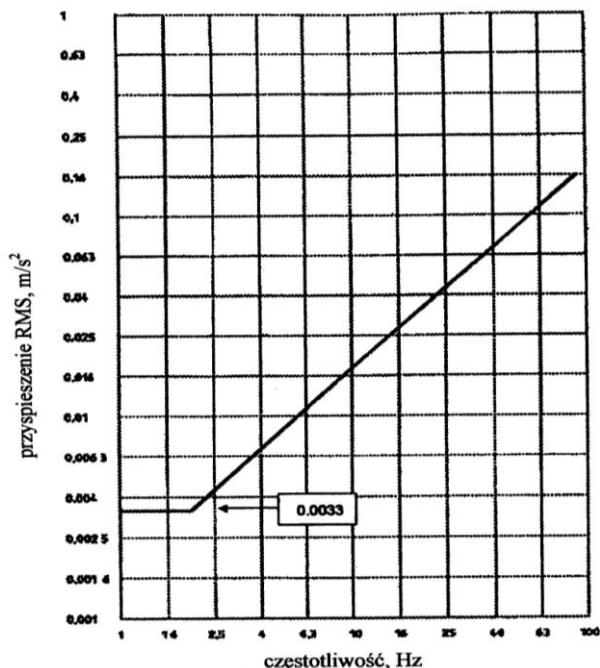
Kryteria stosowane w ocenie wpływu drgań na ludzi przebywających w budynkach zawarte są w normie [5]. Norma określa dopuszczalne wartości parametrów drgań mechanicznych zapewniające wymagany komfort w różnych warunkach przebywania ludzi w pomieszczeniach mieszkalnych, biurach, warsztatach pracy oraz w pomieszczeniach o przeznaczeniu specjalnym (np. szpitale, precyzyjne laboratoria itp.). Ocenie podlegają drgania w paśmie od 1 do 80 Hz.

Ocenę wpływu drgań na ludzi przeprowadza się na podstawie wartości parametrów określonych w normie [5] w zależności od zastosowanej metody oceny. Dopuszcza się ocenę na podstawie pomiaru wartości skorygowanej przyspieszenia (lub prędkości) drgań w całym paśmie częstotliwości albo na podstawie pomiaru widma wartości skutecznej (RMS) przyspieszenia (lub prędkości) drgań w pasmach 1/3 oktaowych.

Na rys. 1 i 2 podano za [5, 6] linie wyznaczone wartościami RMS przyspieszenia drgań odpowiadającymi progowi odczuwalności drgań przez człowieka. Linia podana na rys. 1 odpowiada sytuacji, w której człowiek odbiera drgania w kierunku „z” tzn. wzdłuż osi kręgosłupa, na rys. 2 zaś - sytuacji, w której człowiek odbiera drgania w kierunku „x, y” tzn. prostopadłym do osi kręgosłupa.



Rys. 1. Linia oznaczająca próg odczuwalności drgań w kierunku osi kręgosłupa



Rys. 2. Linia oznaczająca próg odczuwalności drgań przekazywanych na człowieka w kierunku prostopadłym do osi kręgosłupa.

Wartości parametrów drgań przekazywanych na człowieka można wyznaczyć na podstawie pomiarów przeprowadzonych w miejscu odbioru drgań. Można je również wyznaczyć na podstawie obliczenia przeprowadzonego na modelu budynku poddanym prognozowanemu wymuszeniu kinematycznemu.

Wartości parametrów otrzymane z pomiarów albo obliczeń porównuje się z wartościami zapewniającymi wymagany komfort. Przy wyznaczaniu tych wartości uwzględnia się wpływ wielu czynników. Za najważniejsze z nich uznano w normie [5]:

- przeznaczenie pomieszczenia w budynku,
- porę występowania drgań,
- charakter drgań i ich powtarzalność,
- kierunek działania drgań i pozycję ciała człowieka podczas odbioru drgań.

Przeznaczenie pomieszczenia, pora występowania drgań oraz charakter drgań i ich powtarzalność wpływają na wartość współczynnika „n” określonego w tabelicy 5 zamieszczonej w normie [5]. Kierunek działania drgań w nawiązaniu do pozycji ciała człowieka podczas odbioru drgań wpływa na wybór linii wiążących wartości przyspieszeń z częstotliwościami drgań (rys. 1 albo 2).

Przy przeprowadzaniu oceny na podstawie wartości skorygowanej sprawdza się spełnienie warunku zapisanego niżej, w którym skorygowana wartość przyspieszenia drgań ( $a_k$ ) odpowiadająca analizowanemu

kierunkowi drgań (wzdłuż kręgosłupa, prostopadle do linii kręgosłupa) powinna spełniać warunek:

$$a_k \leq a_{k1} \cdot n \quad (1)$$

gdzie:

- $a_{k1}$  - skorygowana wartość przyspieszenia odpowiadająca progowi odczuwalności drgań przez człowieka przyjęta z tabelicy 2 podanej w normie [5],
- $n$  - wartość współczynnika uwzględniającego wpływ przeznaczenia pomieszczenia, pory występowania drgań, charakteru drgań i ich powtarzalności.

Przy przeprowadzaniu oceny wpływu drgań na ludzi na podstawie widma wartości skutecznej przyspieszenia drgań w pasmach 1/3 – oktaowych żąda się, aby wartość skuteczna przyspieszenia  $a(f_i)$  w każdym paśmie 1/3 - oktaowym o częstotliwości środkowej  $f_i$  odpowiadająca analizowanemu kierunkowi drgań spełniała warunek:

$$a(f_i) \leq a_1(f_i) \cdot n \quad (2)$$

gdzie:

- $a_1(f_i)$  - wartość przyspieszenia odpowiadająca progowi odczuwalności drgań przez człowieka, przyjmowana z tabelicy 3 podanej w normie [5], w danym paśmie 1/3- oktaowym o częstotliwości środkowej  $f_i$ ,
- $n$  - wartość współczynnika uwzględniającego wpływ przeznaczenia pomieszczenia, pory występowania drgań, charakteru drgań i ich powtarzalności.

#### 4. PROCEDURA UWZGLĘDNIENIA W BUDYNKACH PROJEKTOWANYCH WPLYWU DRGAŃ KOMUNIKACYJNYCH

Zastosowanie kryteriów oceny opisanych w p. 3 niniejszej pracy wymaga dysponowania informacjami o parametrach opisujących działanie projektowanego źródła drgań (por. [7]). Można je pozyskać na podstawie przeprowadzenia pomiarów in situ (diagnoza typu A opisana w tabelicy 1). Zespoły badawcze realizując pomiary dynamiczne podczas wykonywania zadań diagnostycznych pozyskują wiele informacji o propagacji drgań w podłożu, przekazywaniu ich z podłoża na fundament budynku oraz na konstrukcję w miejscach odbioru tych drgań przez człowieka. W ten sposób powstaje zbiór wyników badań, który odpowiednio opracowany może stanowić bazę danych pomiarowych odpowiadających różnym sytuacjom. Informacje zawarte w bazie wyników mogą być z powodzeniem wykorzystywane przy określaniu prognozowanych parametrów drgań w sytuacjach, gdy źródło drgań jeszcze nie występuje i jest w fazie projektowania (przypadki B i

D ujęte w tabeli 1). Dysponent obszernej bazy danych pomiarowych może z powodzeniem scharakteryzować drgania, które będą przekazywane na budynek w przyszłości podczas wystąpienia prognozowanego źródła drgań. W przypadku C ujętym w tabeli 1 część informacji o drganiach przekazywanych na budynek może być pozyskana podczas pomiarów wykonanych w miejscu lokalizacji projektowanego budynku. Jednakże do wyznaczenia drgań przejmowanych przez projektowany budynek istotne informacje można pozyskać również z odpowiednio rozbudowanej bazy danych pomiarowych.

Niniejsza praca – jak to zaznaczono we wstępie - odnosi się do budynków projektowanych (przypadki C i D ujęte w tablicy 1). Opis wibrogramów stanowiących wymuszenie kinematyczne modeli takich budynków można pozyskać z bezpośrednich pomiarów uzupełnionych analizą informacji zebranych w bazie danych pomiarowych (przypadek C) albo tylko z bazy danych pomiarowych (przypadek D).

Biorąc powyższe pod uwagę można przedstawić procedurę uwzględnienia w projektowaniu budynków wpływu drgań na ludzi w nim przebywających. Podano ją poniżej w odniesieniu do przypadków C i D.

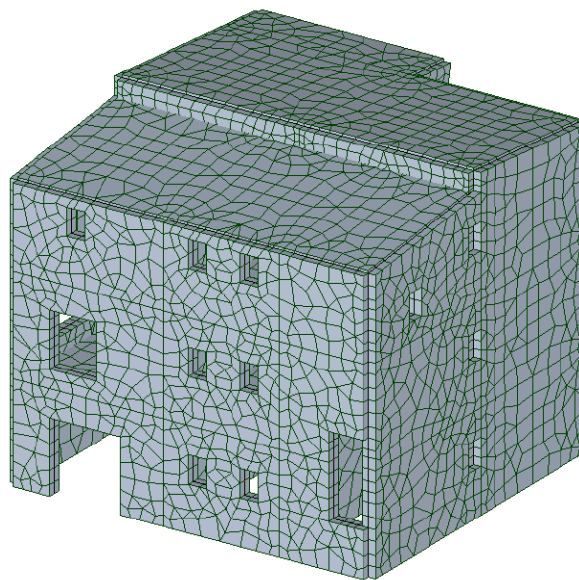
- Źródło drgań istnieje (przypadek C):
  - wykonuje się pomiar drgań podłoża w miejscu przyszłej lokalizacji budynku;
  - wyznacza się parametry wymuszenia kinematycznego budynku (wibrogramy) z wykorzystaniem informacji o wynikach pomiarów zawartych w bazie danych pomiarowych odpowiadających podobnym sytuacjom;
  - po ukształtowaniu modelu obliczeniowego budynku wyznacza się opis ruchu budynku w miejscach odbioru drgań przez człowieka;
  - w odniesieniu do wyznaczonych analitycznie wibrogramów stosuje się odpowiednie kryteria oceny wpływu drgań na ludzi w budynku;
  - przy niespełnieniu odpowiednich wymagań wprowadza się zmiany w konstrukcji w taki sposób, aby uzyskać spełnienie warunku dotyczącego zapewnienia wymaganego komfortu ludziom przebywającym w budynku..
- Źródło drgań jest projektowane (przypadek D):
  - na podstawie analizy zbioru zawartego w bazie danych pomiarowych wyznacza się najbardziej prawdopodobny opis wymuszenia drgań budynku i przykłada się ten opis do modelu projektowanego budynku,
  - wyznacza się drgania w budynku w miejscach odbioru tych drgań przez człowieka;

- wyznaczone parametry drgań stosuje się w ocenie ich wpływu na człowieka stosownie do przyjętego kryterium oceny;
- przy niespełnieniu odpowiednich wymagań wprowadza się zmiany w konstrukcji i obliczenia powtarza aż do osiągnięcia celu, którym jest spełnienie przez konstrukcję projektowanego budynku wymagań odnośnie do wpływu drgań na ludzi w nim przebywających.

W odniesieniu do zadań projektowania (przypadek C) i projektowania z prognozą (przypadek D) działanie polega na takim zaprojektowaniu budynku, aby spełniał również wymagania odnośnie do zapewnienia ludziom przebywającym w pomieszczeniach budynku warunków niezbędnego komfortu. Zapewnienie spełnienia wymagań jeszcze w fazie projektowania budynku jest łatwiejsze i tańsze od wprowadzania odpowiednich zmian w konstrukcji już zrealizowanego obiektu.

## 5. PRZYKŁAD

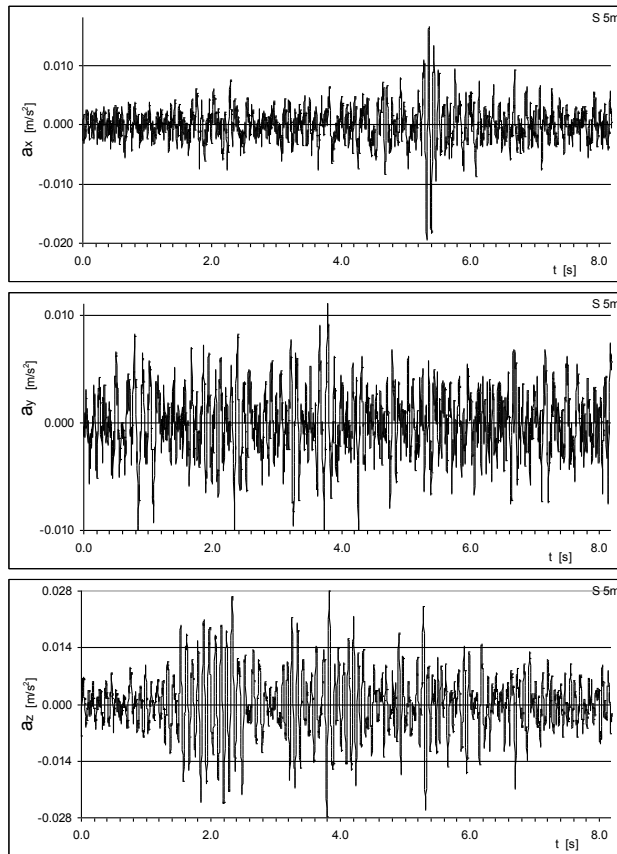
Jako przykład przedstawiono wyniki obliczeń wykonane w fazie projektowania budynku murowanego o dwóch kondygnacjach nadziemnych zlokalizowanego w odległości 5 metrów od pasa jezdni. Zbudowano stosując metodę MES model budynku przedstawiony na rys. 3.



Rys. 3. Model MES projektowanego budynku

Tak przyjęty model budynku poddano wymuszeniu kinematycznemu w postaci wibrogramu opracowanego na podstawie przedstawionych na rys. 4 zapisów

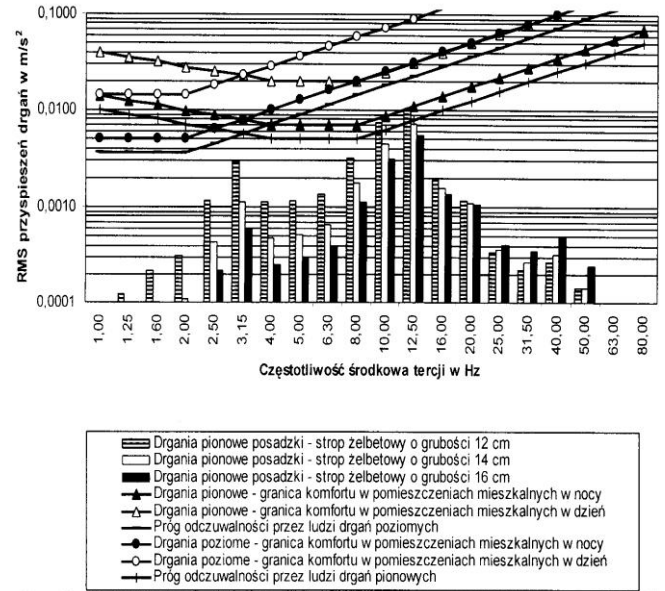
przyspieszeń drgań fundamentu budynku, zaczerpniętych z bazy danych pomiarowych.



Rys. 4. Przebiegi czasowe przyspieszeń drgań fundamentu budynku (składowe: x, y i z) wywołanych przejazdem ciężkiego samochodu w odległości 5 m

Przykładowe opracowanie wyników obliczeń w postaci stosowanej w kryterium oceny przyjętym w [5] podano na rys. 5. W obliczeniach modelu budynku w początkowej fazie projektowania przyjęto strop żelbetowy pierwszej kondygnacji o wysokości 12 cm. Wyniki obliczeń (por. rys. 5 – wykresy poziomo zakreskowane) wykazały, iż prognozowane drgania pionowe stropu żelbetowego o grubości 12 cm w pasmach 10 i 12,5 Hz mogą naruszać warunki niezbędnego komfortu w pomieszczeniu mieszkalnym (n=1,4). Zwiększono więc grubość stropu najpierw o 2 cm a następnie o 4 cm w stosunku do wymiaru początkowego. Zastosowana zmiana spowoduje redukcję drgań doprowadzając je do sytuujących się wyraźnie poniżej górnej linii ograniczającej obszar zapewnienia niezbędnego komfortu ludziom przebywającym na tym stropie. W przypadku trzeciego wariantu można doprowadzić do tak znaczącej redukcji drgań przekazywanych na człowieka przebywającego w

rozpatrywanym pomieszczeniu, że będą one sytuowały się poniżej progu odczuwalności drgań przez człowieka.



Rys. 5. Wyniki analizy drgań prognozowanych w miejscu odbioru ich przez człowieka przebywającego w budynku

Już powyższy przykład świadczy jednoznacznie o tym, iż warto odpowiednie analizy przeprowadzać w fazie projektowania budynku.

**Podziękowanie:** Niniejsza praca powstała jako rezultat realizacji grantu rozwojowego Nr PB 0596/R/TO2/07/02.

### THE DESIGN OF BUILDINGS TAKING INFLUENCE OF TRANSPORT VIBRATIONS ON PEOPLE IN BUILDINGS INTO CONSIDERATION

**Summary:** The procedure of design of buildings taking influence of transport vibrations on people in buildings into consideration is given in the paper. Also an example of application this procedure in practice is presented. Evaluation criteria were taking from polish standard PN-88/B-02171 „Evaluation of vibration influence on people in buildings”.

**Keywords:** transport vibrations, the influence of vibrations on people

### Literatura:

[1] Ustawa: Prawo ochrony środowiska z dnia 27.04.2001; Dz. U. z 2001 r., Nr 62, poz. 627.  
 [2] Engel Z., Ochrona środowiska przed drganiami i hałasem, Wyd. Naukowe PWN, Warszawa 1993.

[3] Ciesielski R., Kawecki J., Maciąg E., Stypuła K., Ocena diagnostyczna skutków wpływów drgań na budynek i ludzi w budynkach, Inżynieria i Budownictwo, 1993, nr 9, s. 390-394.

[4] Kawecki J., Diagnostyka wpływu drgań komunikacyjnych, na budynki i ludzi w budynkach, Transport Miejski i Regionalny, 2006, nr 11, s.17-27.

[5] PN-88/B-02171: Ocena wpływu drgań na ludzi w budynkach.

[6] ISO/CD 10137.2; Bases for design of structures – Serviceability of buildings and walkways against vibration; 2005

[7] Ciesielski R., Kawecki J., Maciąg E., Ocena wpływu wibracji na budynki i ludzi w budynkach (diagnostyka dynamiczna), Wyd. ITB, Warszawa 1993.