



Politechnika Krakowska
im. Tadeusza Kościuszki

Polskie wytyczne dotyczące narażenia ludzi na wibracje w budynkach

dr hab. inż. Filip Pachla, prof. PK

Katedra Mechaniki Budowli i Materiałów
e-mail: filip.pachla@pk.edu.pl

dr hab. inż. Alicja Kowalska-Koczwara, prof. PK

Katedra Mechaniki Budowli i Materiałów
e-mail: alicja.kowalska@pk.edu.pl

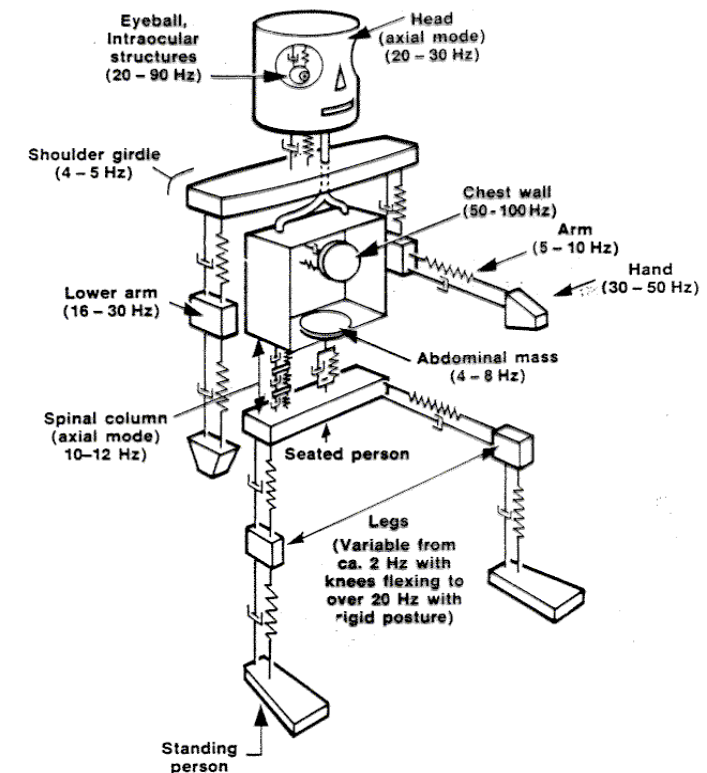
Wstęp

Data	Badacze	Charakter drgań	Zastosowanie	Szczegóły
1931	Reiher & Meister	Drgania ustalone	Ogólne	Kryteria ewaluacyjne
1966	Lenzen	Drgania ustalone	Biura	Zmodyfikowane kryteria ewaluacyjne skal Reiher & Meister
1970	HUD	Drgania impulsowe	Biura	Kryteria projektowe dla budynków przemysłowych
1974	ISO	Różne	Różne	Kryteria ewaluacyjne
1974	Wiss & Parmelee	Chód człowieka	Biura	Kryteria ewaluacyjne
1974	McCormick	Drgania impulsowe	Biura	Kryteria projektowe przy użyciu zmodyfikowanych skal Reiher & Meister
1975	Murray	Drgania impulsowe	Biura	Kryteria projektowe przy użyciu zmodyfikowanych skal Reiher & Meister
1976	Allen & Rainer	Drgania impulsowe	Biura	Kryteria projektowe przy użyciu zmodyfikowanych skal ISO
1981	Murray	Drgania impulsowe	Biura	Kryteria projektowe oparte na danych eksperymentalnych
1984	Ellingwood & Talin	Chód człowieka	Pomieszczenia komercyjne	Kryteria projektowe
1985	Allen, Rainer & Pernica	Tłum	Salę wykładowe	Kryteria projektowe przy użyciu zmodyfikowanych skal ISO
1986	Ellingwood et al.	Chód człowieka	Pom. Komercyjne	Kryteria projektowe
1988	Ohlsson	Chód człowieka	Mieszkania/Biura	Lekkie stropy
1989	ISO 2631-2	Różne	Budynki	Kryteria ewaluacyjne
1989	Clifton	Drgania impulsowe	Biura	Kryteria projektowe
1989	Wyatt	Chód człowieka	Biura/Mieszkania	Kryteria projektowe oparte na ISO 2631-2
1990	Allen	Drgania ustalone	Siłownie	Kryteria projektowe dla sal gimnastycznych
1993	Allen & Murray	Chód człowieka	Biura/Pom. Komercyjne	Kryteria projektowe oparte na ISO 2631-2
1997	Murray, Allen & Ungar	Różne	Różne	Kryteria projektowe dla wrażliwego sprzętu
2004	AIJ-GEH-2004	Różne	Różne	Kryteria projektowe dla bardzo niskich częstotliwości
2006	Tamura et al.	Wiatr	Biura/Pom. komercyjne	Badania doświadczalne odczuwalności różnych aspektów drgań przez ludzi

Symptomy	Częstotliwość [Hz]
Ogólne uczucie dyskomfortu	4 – 9
Bóle głowy	13 – 20
Objawy dolnej szczęki	6 – 8
Wpływ na mowę	13 – 20
„Gula w gardle”	12 – 16
Bóle w klatce piersiowej	5 – 7
Bóle brzucha	4 – 10
Chęć oddania moczu	10 – 18
Zwiększone napięcie mięśniowe	13 – 20
Wpływ na ruch oddechowy	4 – 8
Skurcze mięśni	4 – 9

Model Coerrmana

Human body resonance frequencies



M.E. Gierke, R.R. Coerman, The biodynamics of human response to vibration and impact, *Indust. Med. and Surg* 32, 1963, 30–32

Norma PN-B-02171:2017 – wpływ drgań na ludzi w budynkach

PN-B-02171:1988 – Poprzednia wersja normy

Przedmiot normy:

Ocena zapewnienia komfortu wibracyjnego ludziom przebywającym w budynkach i odbierającym drgania w sposób bierny.

Bierny odbiór drgań:

człowiek odbierający drgania nie obsługuje źródeł drgań i nie ma bezpośredniego wpływu na pracę źródeł drgań

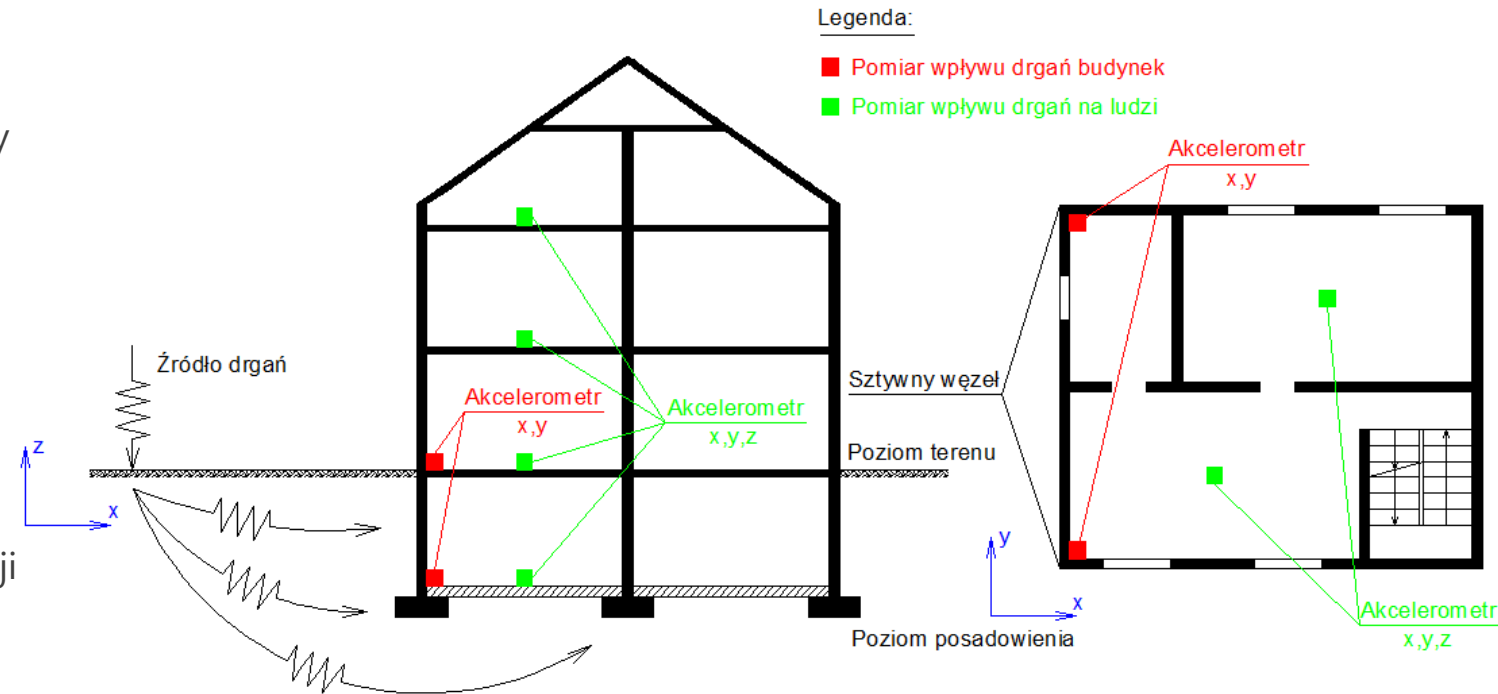


Źródła drgań: w obrębie budynków lub poza nimi, w odległości stałej lub zmiennej w czasie.

Podstawa oceny: wartości parametrów opisujących drgania w miejscu ich bezpośredniego przekazywania na ludzi, wyznaczane na podstawie pomiarów drgań albo obliczeń.

Lokalizacji punktów pomiarowych

- Zgodnie z normą ISO 2631-1 pomiary drgań przenoszone na ciało ludzkie powinny być mierzone na powierzchni między ciałem a tą powierzchnią
- Zgodnie ISO 2631-2 drgania przenoszone na ciało ludzkie powinny być mierzone w środku sztywnych powierzchni (zwykle w odległości nie przekraczającej 10 cm od środka)
- Brytyjska norma BS 6472-1 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 **PN-B-02171:2017-06** 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).



Wybór odpowiedniego sprzętu pomiarowego

- Podczas pomiarów ważne są również urządzenia, które powinny umożliwić prawidłowe rejestrowanie sygnału już od 0,5 Hz.
- 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 to kierunek pionowy.
- Zgodnie z normą PN-B-02171:2017-06 zaleca się stosowanie dysku pomiarowego, który powinna mieć masę co najmniej 30 kg i średnicę 30 cm



SEISMIC ICP® ACCELEROMETERS

- Structural Testing of Bridges and Civil Structures
- Floor and Foundation Vibration Monitoring
- Semiconductor Manufacturing
- Earthquake Detection
- Building Vibration Monitoring
- Optical Instruments and Robotics
- Site Surveys for Sensitive Equipment or Processes



FEATURES AND BENEFITS OF SEISMIC ICP® ACCELEROMETERS

- Detect the slightest motion with highly sensitive sensing elements
- Sensitivities from 1000 mV/g to 10 V/g
100 mV/(m/s²) to 1 V/(m/s²)
- Measurements as low as 0.000001 g
0.0000098 m/s²



Model 393B05
10 V/g
1.0 V/(m/s²)
0.5 to 750 Hz
4 µg resolution



Model 393A03
1000 mV/g
102 mV/(m/s²)
0.3 to 4000 Hz
10 µg resolution



Model 393B31
10 V/g
1.0 V/(m/s²)
0.07 to 300 Hz
1 µg resolution

Model 356B18 — High sensitivity

- 1000 mV/g [102 mV/(m/s²)] sensitivity
- 0.3 Hz to 5000 Hz frequency range
- 25 gram (0.88 oz) lightweight aluminum housing
- ± 5 g range (49 m/s²) amplitude range
- 50 µg (0.5µm/s²) resolution

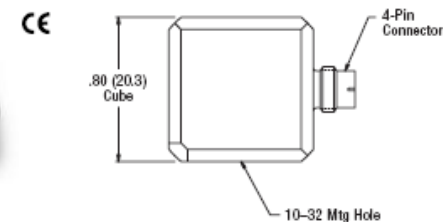
Recommended cables and accessories — see page 4.2

Select an ICP® sensor signal conditioner from those featured in section 3

Options: A, J, M, T — see pages xvii to xx for option information



Actual Size



Rejestracja i analiza sygnału

- Rejestracja sygnału powinna zawierać częstotliwości w zakresie od 1 do 120 Hz, tak aby po zastosowaniu filtra dolnoprzepustowego częstotliwości do 100 Hz mogły zostać uwzględnione w ocenie
- Odrębnym aspektem jest czas trwania drgań, który zgodnie z polską normą mieści się w zakresie, w którym wartość amplitud przyspieszenia drgań nie spada poniżej 0,2 maksymalnej wartości amplitudy w zapisanym kształcie fali
- Ostatnim aspektem związanym z analizą danych pomiarowych jest częstotliwość próbkowania zarejestrowanego sygnału, która zgodnie z kryterium Nyquista powinna odpowiadać zasadzie, że najwyższa częstotliwość zarejestrowana w sygnale (f_N) stanowi połowę częstotliwości próbkowania (f_s)



$$f_N = \frac{f_s}{2}$$

Wybrane metody oceny wpływu drgań na ludzi w budynkach

Metody oceny zapewnienia komfortu wibracyjnego ludziom w budynkach

Ocenę wpływu drgań mechanicznych na ludzi przebywających w budynkach przeprowadza się na podstawie analizy wibrogramów uzyskanych w wyniku pomiaru drgań, albo w wyniku obliczenia (prognozy) w miejscu przekazywania drgań na człowieka.

Analizę wykonuje się w celu wyznaczenia jednej z trzech wartości:

- wartości skutecznej przyspieszenia/prędkości drgań w pasmach 1/3-oktawowych,
- wartości skorygowanej przyspieszenia/prędkości drgań w całym rozważanym paśmie częstotliwości,
- dawki wibracji.

Wybrane metody oceny wpływu drgań na ludzi w budynkach

Metody oceny zapewnienia komfortu wibracyjnego ludziom w budynkach

Za podstawową metodę oceny uważa się **ocenę na podstawie wartości skutecznej parametru drgań w pasmach 1/3-oktawowych**.

Można ją stosować w odniesieniu do drgań pomierzonych albo obliczonych w miejscu odbioru ich przez człowieka.

W wyniku oceny uzyskuje się nie tylko informacje o tym, czy poziom drgań narusza wymagania odnośnie do zapewnienia ludziom w budynkach niezbędnego komfortu wibracyjnego, ale również informacje o tym w jakich pasmach częstotliwości podane wymagania zostały naruszone.

Pomocniczym parametrem oceny jest **dawka wibracji**. Za pomocą tego parametru ocenia się prawdopodobieństwo wystąpienia skarg ludzi na uciążliwość drgań.

Wybrane metody oceny wpływu drgań na ludzi w budynkach

Ocena na podstawie wartości skutecznej parametru drgań

Wartości skuteczne przyspieszenia/prędkości drgań w pasmach 1/3 – oktaowych o częstotliwości środkowej f , zapewniające ludziom w budynkach niezbędny komfort wibracyjny, należy wyznaczać wg wzorów:

$$a_{\text{dop}}(f) = a_1(f) \cdot n$$

$$v_{\text{dop}}(f) = v_1(f) \cdot n$$

w których:

$a_1(f)$ lub $v_1(f)$ – wartość skuteczna przyspieszenia/prędkości odpowiadająca progowi odczuwalności drgań przez człowieka przyjęta z normy.

Wybrane metody oceny wpływu drgań na ludzi w budynkach

Ocena na podstawie wartości skutecznej parametru drgań w pasmach 1/3 - oktaowych

Wartości współczynnika n



Przeznaczenie pomieszczenia w budynku	Pora występowania drgań	Wartość n w zależności od charakteru drgań i ich powtarzalności	
		drgania występujące stale oraz krótkotrwałe o powtarzalności zdarzeń większej niż 10 w czasie doby	drgania krótkotrwałe o powtarzalności zdarzeń nie przekraczającej 10 w czasie doby
Sale operacyjne w szpitalach, precyzyjne laboratoria i pomieszczenia podobnego przeznaczenia ¹⁾	dzień noc	1	1
Szpitale, sale chorych w normalnych warunkach i pomieszczenia podobne-go przeznaczenia	dzień	2	8
	noc	1	4
Mieszkania, internaty i pomieszczenia podobnego przeznaczenia	dzień	4	32 ²⁾
	noc	1,4	4
Biura, urzędy, szkoły i pomieszczenia podobnego przeznaczenia	dzień noc	4	64 ²⁾
Warsztaty pracy i pomieszczenia podobnego przeznaczenia	dzień noc	8 ³⁾	128

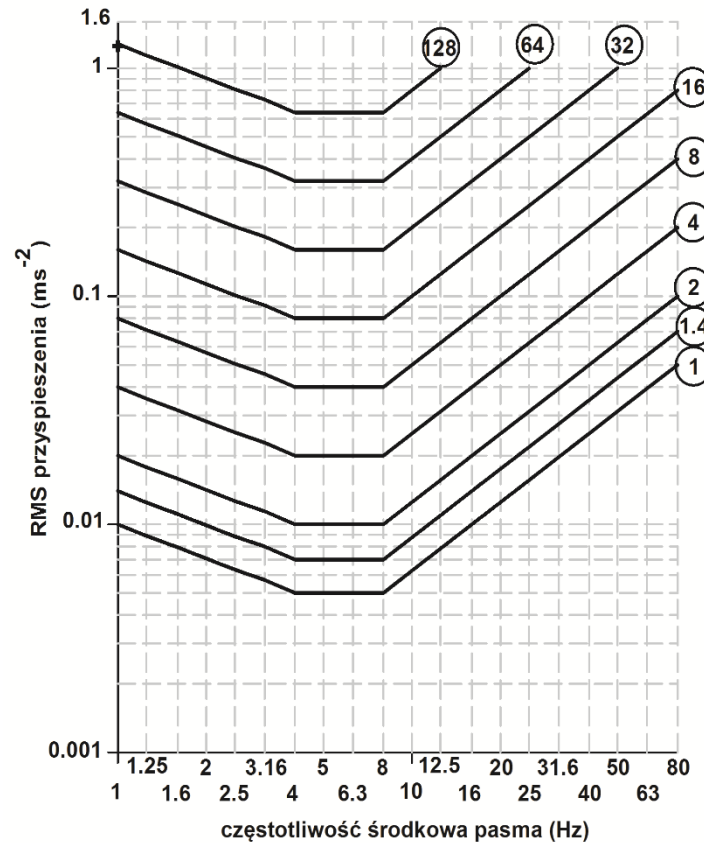
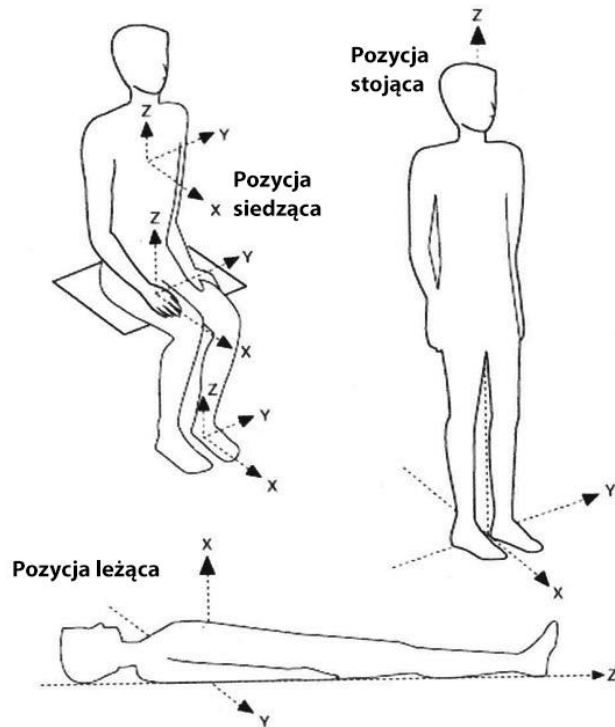
1) Wartość współczynnika n dotyczy czasu, w którym w salach operacyjnych odbywają się operacje albo w laboratoriach - bardzo precyzyjne czynności.

2) Współczynnik n może być podwojony ($n = 64$ i $n = 128$), jeżeli dotyczy drgań krótkotrwałych uprzednio zapowiedzianych np. sygnałami ostrzegawczymi, komunikatami.

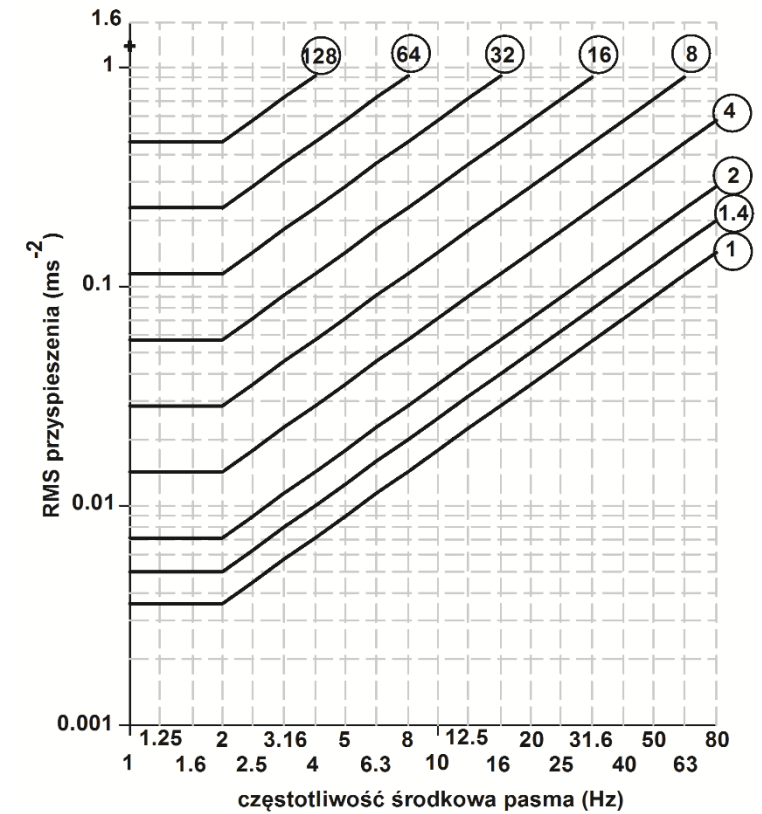
3) Współczynnik n może być podwojony ($n = 16$) w warsztatach pracy przemysłu ciężkiego, np.: mechanicznych, odlewniczych.

Wybrane metody oceny wpływu drgań na ludzi w budynkach

Ocena na podstawie wartości skutecznej parametru drgań w pasmach 1/3 - oktaowych



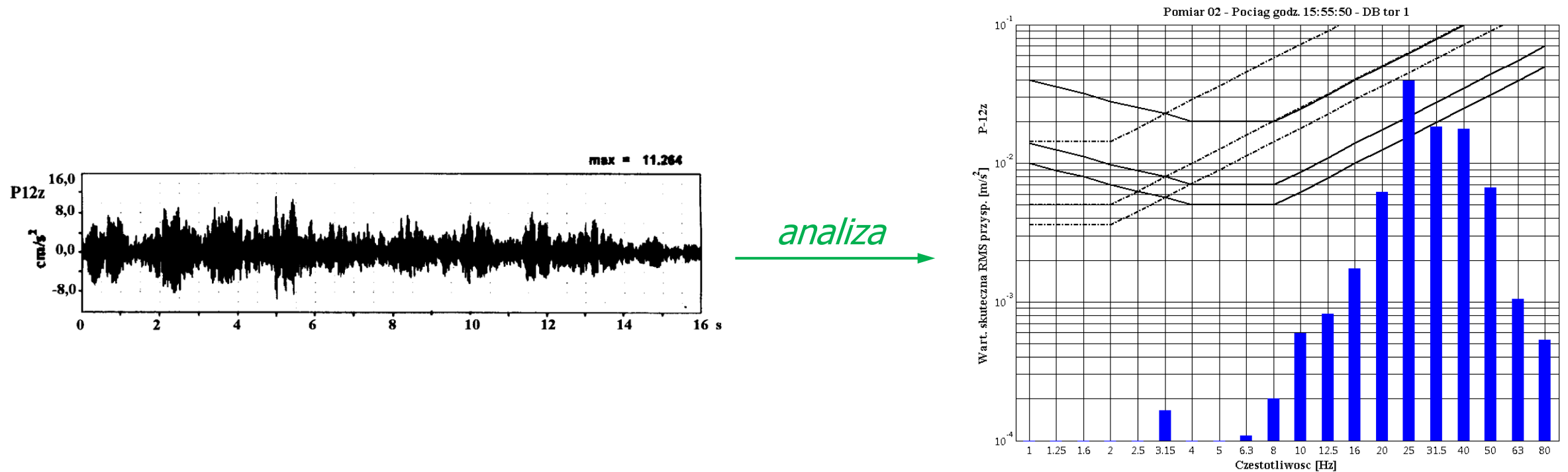
linia progu odczuwalności
i linie komfortu dla kierunku z



linia progu odczuwalności
i linie komfortu dla kierunków x i y

Wybrane metody oceny wpływu drgań na ludzi w budynkach

Ocena na podstawie wartości skutecznej parametru drgań w pasmach 1/3 - oktawowych



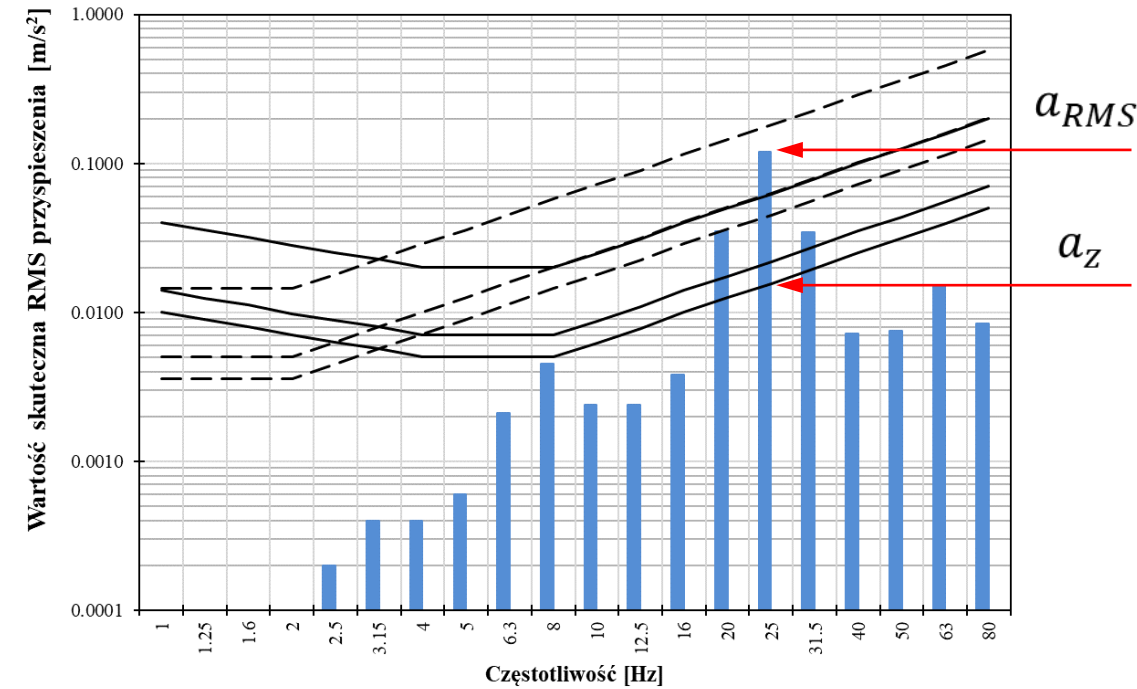
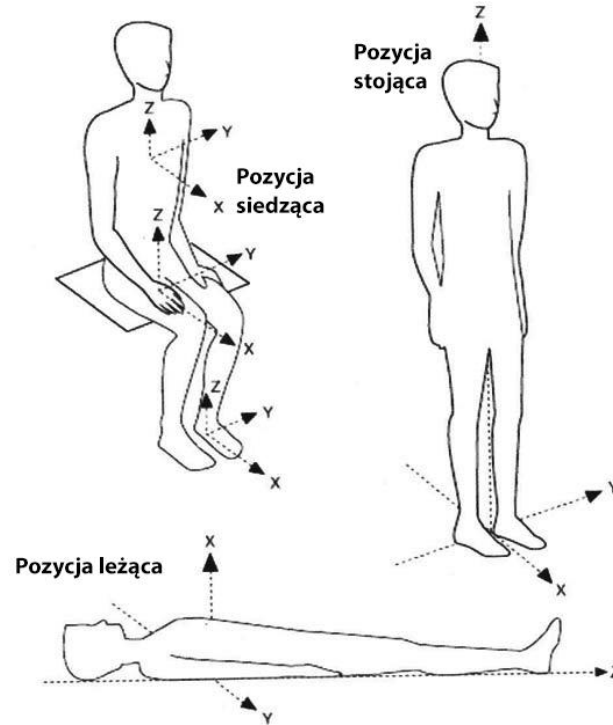
Przykładowe wyniki analizy wpływu drgań na ludzi w budynku

Wybrane metody oceny wpływu drgań na ludzi w budynkach

$$WODL = \max\left(\frac{a_{RMS}}{a_z}\right)$$

$$WODL = \max\left(\frac{a_{RMS}}{a_x}\right)$$

$$WODL = \max\left(\frac{a_{RMS}}{a_y}\right)$$



- WODL (Wskaźnik Odczuwalności Drgań przez Ludzi)**

największa spośród występujących w poszczególnych pasmach 1/3-oktawowych wartość stosunku: skutecznych wartości prędkości/przyspieszenia drgań wyznaczonych w wyniku analizy wibrogramu w pasmach 1/3-oktawowych do wartości skutecznej prędkości/przyspieszenia drgań odpowiadającej progowi odczuwalności drgań przez człowieka w tym samym paśmie częstotliwości.

Wybrane metody oceny wpływu drgań na ludzi w budynkach

- **Dawka wibracji** jest traktowana jako parametr dostarczający dodatkowych informacji o prawdopodobieństwie wystąpienia skarg użytkowników pomieszczeń w budynku na odczuwane przez nich drgania.

$$VDV_{dzień/noc} = \left(\sum_{k=1}^{k=N} VDV^4 \right)^{0,25}$$

Wartości VDV [m/s^{-1,75}] do oceny prawdopodobieństwa wystąpienia skarg ludzi w budynkach

Miejsce odbioru drgań	Pora dnia	Niskie prawdopodobieństwo wystąpienia skarg użytkowników	Możliwe wystąpienie skarg użytkowników
Szpitala, sale operacyjne, precyzyjne laboratoria	Dzień i noc	0,1	0,2
Mieszkania	Dzień	0,2	0,4
	Noc	0,13	0,26
Biura	Dzień i noc	0,4	0,8
Warsztaty	Dzień i noc	0,8	1,6

Wybrane metody oceny wpływu drgań na ludzi w budynkach

- **Współczynnik szczytu** (z ang. *crest factor*)

$$CF = \frac{|a_W|_{PEAK}}{a_{WRMS}}$$

$$CF < 6$$



RMS

$$6 \leq CF \leq 9$$

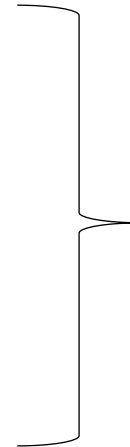


RMS + VDV

$$CF > 9$$



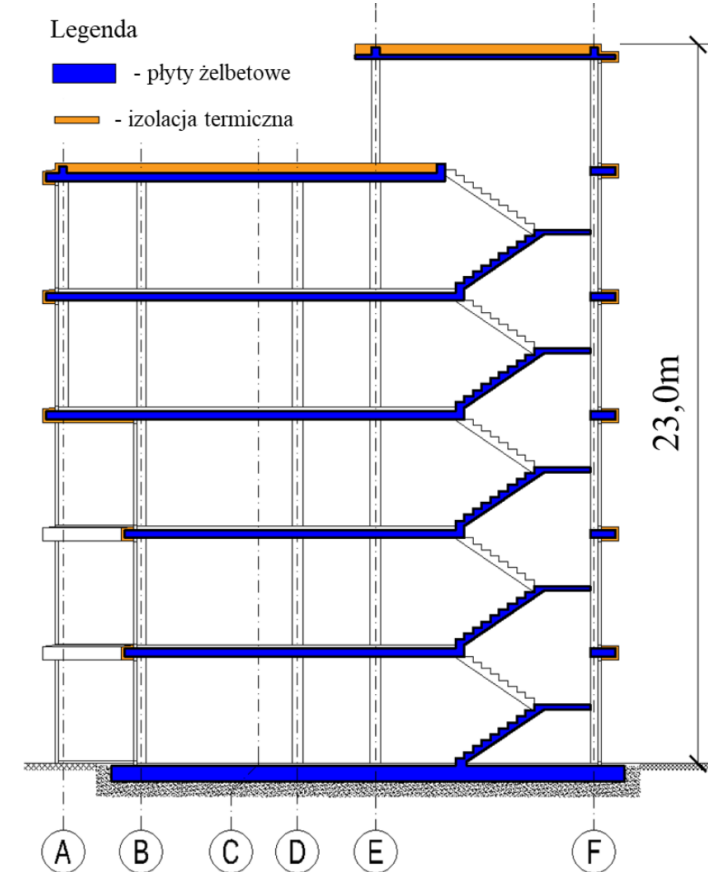
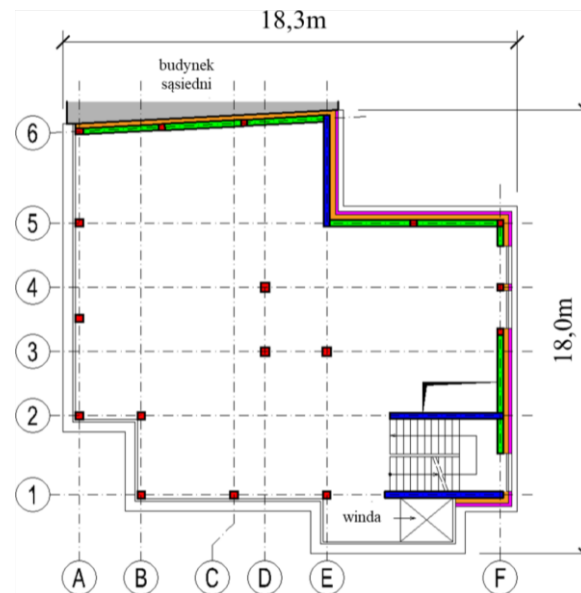
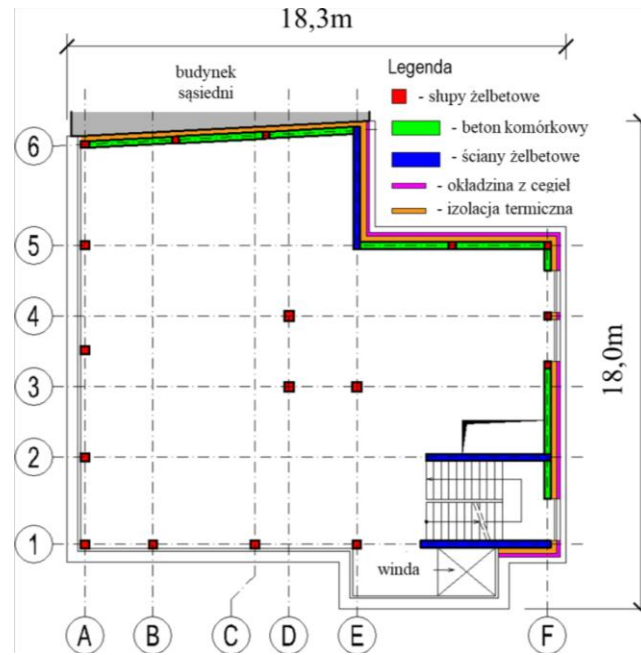
VDV



Norma australijska

AS 2670.2 (1990)

Przykład pomiarowy (24h)



Przykład pomiarowy (24h)



Nr pomiaru	Pora dnia	CF [-]	WODL [-]	VDV [m/s ^{1.75}]
1	Dzień	6,35	5,76	0,58
2	Dzień	6,70	3,92	0,45
3	Dzień	6,82	11,81	0,94
4	Dzień	9,11	10,80	0,97
5	Dzień	10,65	4,91	0,58
6	Noc	5,33	4,03	0,50
7	Noc	5,45	2,26	0,38
8	Noc	5,09	1,61	0,32
9	Noc	5,94	1,06	0,32
10	Noc	5,01	4,32	0,46
11	Noc	5,39	5,19	0,57
12	Dzień	7,33	2,39	0,46



Politechnika Krakowska
im. Tadeusza Kościuszki

Dziękuję za uwagę

dr hab. inż. Filip Pachla, prof. PK

Katedra Mechaniki Budowli i Materiałów

e-mail: filip.pachla@pk.edu.pl