

Wpływ drgań na budynki i ludzi w budynkach - normy i sporządzanie opinii

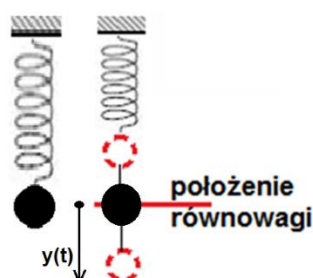
Prof. dr hab. inż. Krzysztof Stypuła
Politechnika Krakowska im. T. Kościuszki, Wydział Inżynierii Lądowej, Instytut Mechaniki
Budowli, e-mail: kstypuła@pk.edu.pl

1. Wstęp

W praktyce postępowań sądowych pojawiają się od czasu do czasu sprawy dotyczące uszkodzeń budynków na skutek oddziaływania drgań (najczęściej wywołanych przejazdami pojazdów lub robotami budowlanymi), jak również dotyczące nadmiernego wpływu drgań na ludzi w budynkach (naruszenia komfortu wibracyjnego). Sądy miewają kłopot ze znalezieniem odpowiednich biegłych, a w dodatku niektórzy z biegłych, podejmujących się tych spraw, nie mają odpowiedniej wiedzy i doświadczenia ani właściwej aparatury pomiarowej, aby sporządzić rzetelną opinię. Toteż nie dziwi fakt, że niejednokrotnie biegli wydają w takich sprawach przeciwstawne opinie i sprawy takie mogą toczyć się latami. Część takich spornych spraw trafia ostatecznie do Instytutu Mechaniki Budowli Politechniki Krakowskiej, jako do wiodącego ośrodka w Polsce w zakresie badań wpływu drgań na budynki i na ludzi w budynkach, zatrudniającego autorów obu polskich norm [8 i 9] z tego zakresu. Lekkość, z jaką niektórzy biegli, nie mając odpowiedniego doświadczenia, podejmują się wykonania takich opinii, jest o tyle karygodna, że opinie te często decydują o wypłaceniu lub niewypłaceniu odszkodowań nieraz o dużej wartości. Biorąc to pod uwagę, oraz fakt nowelizacji wspomnianych norm, przedstawiono poniżej garść informacji dotyczących postępowania w takich sprawach. Więcej na ten temat można znaleźć w literaturze przedmiotu np. [1 - 7].

2. Przedmiot rozważań – drgania

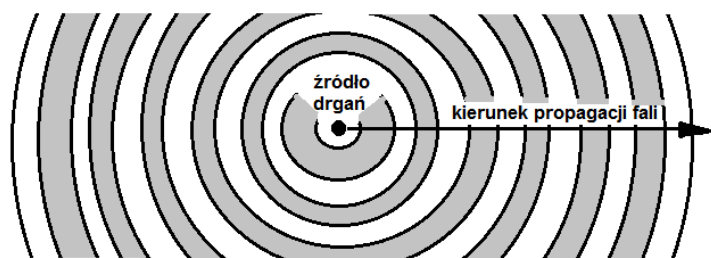
Drgania mechaniczne (zwane też wibracjami) są to zachodzące w czasie mechaniczne zaburzenia (zmiany położenia cząstek ośrodka), oscylujące wokół pewnego położenia równowagi (rys. 1).



Rys. 1. Wychylenia cząsteczki ośrodka podczas drgań

Rozprzestrzeniają się one w ośrodku sprężystym jako tzw. **fale sprężyste**, a miejsca lub procesy związane z ich powstawaniem nazywa się **źródłami fal** lub **źródłami drgań**. Rozchodzenie się fal sprężystych polega na wzbudzaniu drgań cząstek coraz bardziej odległych od źródła drgań. Jedna cząsteczka wprowadzona w ruch wywołuje ruch cząsteczkę sąsiednią (na skutek działania sił międzycząsteczkowych), ta wprowadza w ruch kolejną i tak ruch przekazuje się coraz dalej, podczas

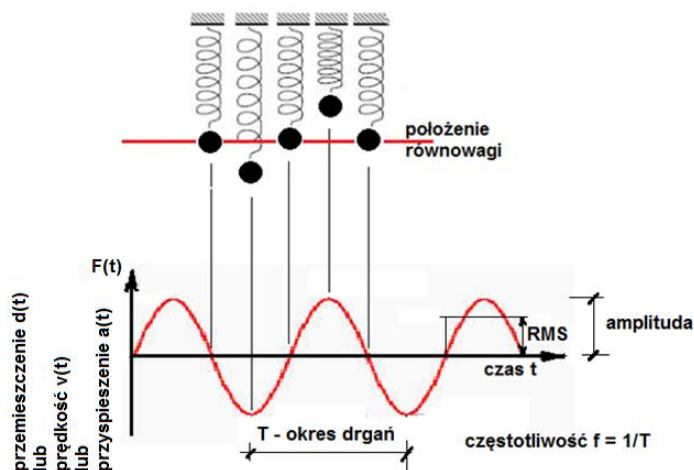
gdy punkt położenia równowagi każdej z cząstek nie przemieszcza się (pozostaje na swoim dotychczasowym miejscu). Proces ten nosi nazwę **propagacji fali**.



Rys. 2. Propagacja fali

Do opisu wspomnianych zaburzeń mechanicznych wykorzystuje się jedną z trzech wielkości fizycznych: przemieszczenie d (ang. displacement), prędkość v (ang. velocity) lub przyspieszenie a (ang. acceleration). Wykres zmian jednej z powyższych wielkości fizycznych w zależności od czasu t nosi nazwę **przebiegu czasowego drgań** lub **wibrogramu** (w sejsmice sejsmogramu) – rys. 3.

Drgania harmoniczne (rys. 3), charakteryzujące się jedną stałą częstotliwością drgań (stałym okresem drgań), zaliczane są do drgań prostych, w odróżnieniu od drgań złożonych zawierających składowe o różnych częstotliwościach. Najmniejszy odcinek czasu, po którym powtarzają się wartości charakteryzujące ruch T , nosi nazwę **okresu drgań**. Jest to czas, w którym odbywa się jeden pełny cykl drgań. Odwrotność okresu drgań T , oznaczana przez f (od ang. frequency), nosi nazwę częstotliwości drgań. **Częstotliwość drgań f** jest to liczba cykli drgań w ciągu 1 sekundy.



Rys. 3. Przykładowy wibrogram drgań harmonicznych

Większość drgań złożonych, z jakimi spotyka się w praktyce, da się opisać jako sumę nakładających się kilku składowych drgań harmonicznych o różnych częstotliwościach. Wykorzystuje się ten fakt w analizach rzeczywistych przebiegów czasowych drgań, poszukując składowych harmonicznych drgań w różnych pasmach częstotliwości (analiza modalna).

Wartość szczytowa przyspieszenia/prędkości drgań to największa w czasie trwania drgań złożonych bezwzględna wartość przyspieszenia/prędkości drgań.

Wartość maksymalna przyspieszenia/prędkości drgań w danym paśmie częstotliwości to największa bezwzględna wartość prędkości drgań w danym paśmie 1/3-oktawowym w czasie trwania drgań.

Wartość skuteczna przyspieszenia/prędkości drgań w danym paśmie częstotliwości to wartość średniokwadratowa, RMS, w danym paśmie 1/3-oktawowym w czasie trwania drgań. Wartość RMS (ang. root mean square) wyznaczana jest jako pierwiastek kwadratowy ze średniej arytmetycznej kwadratów wartości rzędnych funkcji $F(t)$.

3. Uregulowania prawne

Pośród aktów prawnych dotyczących zagadnień ochrony przed drganiami wymienić można następujące ustawy:

- Ustawa „Prawo ochrony środowiska” z dnia 27 kwietnia 2001 (Dz. U. z 2001, Nr 62, poz. 627)
- „Ustawa o dostępie do informacji o środowisku i jego ochronie oraz o ocenach oddziaływania na środowisko” z dnia 9 listopada 2000 (Dz.U. z 2000r. Nr 109, poz. 1157)
- „Ustawa o zapobieganiu szkodom w środowisku i ich naprawie” z dnia 13 kwietnia 2007 (Dz.U. z 2007 roku, Nr 75, poz. 493) – odpowiedzialność za szkody
- Ustawa „Prawo budowlane” z dnia 7 lipca 1994 r. (Dz.U. 1994 Nr 89 poz. 414).

W pierwszej z tych ustaw, w art. 3 stwierdzono m.in., że ilekroć w ustawie „Prawo ochrony środowiska” jest mowa o:

...

4) *emisji - rozumie się przez to wprowadzane bezpośrednio lub pośrednio, w wyniku działalności człowieka, do powietrza, wody, gleby lub ziemi:*

a) *substancje,*

b) *energii, takie jak ciepło, hałas, **wibracje** lub pola elektromagnetyczne.*

...

49) *zanieczyszczeniu - rozumie się przez to emisję, która może być szkodliwa dla zdrowia ludzi lub stanu środowiska, może powodować szkodę w dobrach materialnych, może pogarszać walory estetyczne środowiska lub może kolidować z innymi, uzasadnionymi sposobami korzystania ze środowiska...*

Tak więc, w świetle wspomnianej ustawy drgania (wibracje) są emisją zanieczyszczeń do środowiska, czyli są zanieczyszczeniem środowiska, podobnie jak hałas i zanieczyszczenia wody, gleby i powietrza. Dlatego wszystkie zawarte w tej ustawie wymagania odnoszące się do emisji zanieczyszczeń dotyczą także emisji drgań.

Warto przytoczyć kilka dalszych artykułów wspomnianej ustawy:

- **Art. 6**

1. *Kto podejmuje działalność mogącą negatywnie oddziaływać na środowisko, jest obowiązany do zapobiegania temu oddziaływaniu.*

2. *Kto podejmuje działalność, której negatywne oddziaływanie na środowisko nie jest jeszcze w pełni rozpoznane, jest obowiązany, kierując się przezornością, podjąć wszelkie możliwe środki zapobiegawcze.*

- **Art. 7**

1. *Kto powoduje zanieczyszczenie środowiska, ponosi koszty usunięcia skutków tego zanieczyszczenia.*

2. *Kto może spowodować zanieczyszczenie środowiska, ponosi koszty zapobiegania temu zanieczyszczeniu.*

- **Art. 137**

Przeciwdziałanie zanieczyszczeniom polega na zapobieganiu lub ograniczaniu wprowadzania do środowiska substancji lub energii.

- *Art. 139*

Przestrzeganie wymagań ochrony środowiska związanych z eksploatacją dróg, linii kolejowych, linii tramwajowych, lotnisk oraz portów zapewniają zarządzający tymi obiektami.

- *Art. 147a*

1. Prowadzący instalację oraz użytkownik urządzenia są obowiązani zapewnić wykonanie pomiarów wielkości emisji lub innych warunków korzystania ze środowiska przez:

1) akredytowane laboratorium w rozumieniu ustawy z dnia 30 sierpnia 2002 r. o systemie oceny zgodności (Dz. U. z 2004 r. Nr 204, poz. 2087, z późn. zm.) lub

2) laboratorium posiadające uprawnienia do badania właściwości fizykochemicznych, toksyczności i ekotoksyczności substancji i preparatów nadane w trybie ustawy z dnia 11 stycznia 2001 r. o substancjach i preparatach chemicznych (Dz. U. Nr 11, poz. 84, z późn. zm.)

w zakresie badań, do których wykonywania są obowiązani.

Warto zaznaczyć, że ustawa zalicza do instalacji m.in. budowle niebędące urządzeniami technicznymi ani ich zespołami, których eksploatacja może spowodować emisję. Z powyższych zapisów wynika, że zarządca infrastruktury transportu drogowego lub szynowego (linii kolejowej, tramwajowej, metra itp.) jest m.in. zobowiązany do zapobiegania emisji drgań lub jej ograniczania. A także, że ww. zarządcy powinni, zgodnie z art. 147a, zlecać pomiary drgań i oceny ich wpływu na środowisko (na budynki, ludzi w budynkach i wrażliwe urządzenia) laboratorium posiadającym akredytację do tego typu pomiarów i ocen.

Kwestie odpowiedzialności za szkody w środowisku szerzej reguluje „Ustawa o zapobieganiu szkodom w środowisku i ich naprawie” z dnia 13 kwietnia 2007 (Dz.U. z 26 kwietnia 2007 roku, Nr 75, poz. 493).

W przypadku nowych inwestycji (budowy lub przebudowy) powinno być prowadzone postępowanie w zakresie oceny ich oddziaływań na środowisko, w ramach którego w odniesieniu do określonych inwestycji wymagane jest sporządzenie raportu lub oceny oddziaływania na środowisko.

Kwestie te reguluje „Ustawa o dostępie do informacji o środowisku i jego ochronie oraz o ocenach oddziaływania na środowisko” z dnia 9 listopada 2000 (Dz.U. z 2000 r. Nr 109, poz. 1157).

Również ustawa „Prawo budowlane” z dnia 7 lipca 1994 r. (Dz.U. 1994 Nr 89 poz. 414) zobowiązuje projektantów i wykonawców obiektów budowlanych do uwzględnienia wpływu drgań. W art. 5 tej ustawy znajduje się zapis:

1. Obiekt budowlany wraz ze związanymi z nim urządzeniami budowlanymi należy, biorąc pod uwagę przewidywany okres użytkowania, projektować i budować w sposób określony w przepisach, w tym techniczno-budowlanych, oraz zgodnie z zasadami wiedzy technicznej, zapewniając:

1) spełnienie wymagań podstawowych dotyczących:

...

e) ochrony przed hałasem i drganiami,

f) oszczędności energii i ...

Także w Rozporządzeniu Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie (Dz. U. Nr 75, poz. 690 z późn. zm.) paragraf 11 zawiera zapis:

1. Budynek z pomieszczeniami przeznaczonymi na pobyt ludzi powinien być wznoszony poza zasięgiem zagrożeń i uciążliwości określonych w przepisach odrębnych, przy czym dopuszcza się wznoszenie budynków w tym zasięgu pod warunkiem zastosowania środków technicznych

zmniejszających uciążliwości poniżej poziomu ustalonego w tych przepisach bądź zwiększających odporność budynku na te zagrożenia i uciążliwości, jeżeli nie jest to sprzeczne z warunkami ustalonymi dla obszarów ograniczonego użytkowania, określonych w przepisach odrębnych.

2. Do uciążliwości, o których mowa w ust. 1, zalicza się w szczególności:

- 1) szkodliwe promieniowanie i oddziaływanie pól elektromagnetycznych,
- 2) hałas i **drżania** (wibracje),
- 3) ...

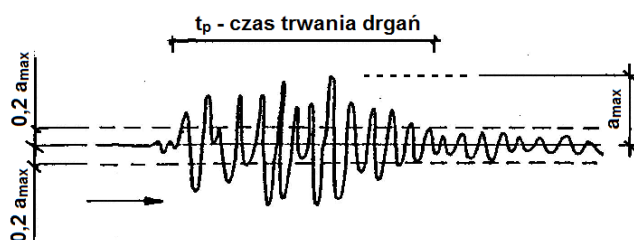
Załącznik 1 do tego rozporządzenia, zatytułowany „WYKAZ POLSKICH NORM POWOŁANYCH W ROZPORZĄDZENIU”, wymienia w zakresie diagnostyki wpływu drgań dwie normy:

- PN-85/B-02170. Ocena szkodliwości drgań przekazywanych przez podłoże na budynki.
- PN-88/B-02171. Ocena wpływu drgań na ludzi w budynkach.

Normy te (opracowane w Instytucie Mechaniki Budowli Politechniki Krakowskiej) obecnie zostały znowelizowane i mają odpowiednio oznaczenia: PN-B-02170:2016 [8] i PN-B-02171:2017 [9].

4. Czas trwania drgań według norm PN-B-02170 i PN-B-02171

W obu normach jednoznacznie zdefiniowano czas trwania drgań: analiza poszczególnych składowych wibrogramu powinna dotyczyć tego wycinka, w którym wartości amplitud ocenianego parametru drgań są większe niż 0,2 wartości szczytowej (maksymalnej) – rys. 4.



Rys. 4. Interpretacja czasu trwania drgań

W zależności od czasu trwania drgań w ciągu doby wyróżnia się:

- drżania krótkotrwałe – łączny czas trwania w ciągu doby nie przekracza 3 min,
- drżania długotrwałe - łączny czas trwania w ciągu doby większy od 3 min, a nie przekracza 30 min,
- drżania występujące stale - łączny czas trwania w ciągu doby przekracza 30 min.

5. Ocena wpływu drgań na konstrukcję budynku zgodnie z PN-B-02170

Drgania mechaniczne (wibracje) powodują powstawanie sił bezwładności, stanowiących dodatkowe obciążenie, uwzględniane przez konstruktora w obliczeniach wytrzymałościowych konstrukcji budynku.

5.1. Kryteria pominięcia w obliczeniach budynku wpływu drgań przekazywanych przez podłoże

Zgodnie z PN-B-02170 w projektowaniu budynków można pominąć wpływ drgań przekazywanych przez podłoże, jeśli amplituda przyspieszeń składowych poziomych drgań podłoża w miejscu posadowienia budynku nie przekracza wartości $0,05 \text{ m/s}^2$.

Kierując się tym kryterium przyjęto, że w przypadku przeciętnych warunków geotechnicznych występujących na drodze propagacji od źródła drgań do budynku oraz płaskiego ukształtowania terenu, można w obliczeniach projektowych budynku pominąć oddziaływanie drgań przekazywanych przez podłoże na budynek, jeżeli projektowany budynek będzie znajdował się w odległości większej niż:

- 25 m od osi toru kolejowego,
- 15 m od osi toru tramwajowego albo od osi najbliższego pasa drogi kołowej I kategorii lub ulicy przelotowej,
- 20 m od źródła drgań wywołanych pracami budowlanymi (wbijanie pali i ścianek szczelnych, wibromłoty itp.),
- 60 m od trasy poruszania się drogowych walców wibracyjnych.

W przypadku innych źródeł drgań (np. prace strzałowe w kamieniołomach) można ten wpływ pominąć poza obszarem tzw. strefy wpływu sejsmicznego (ustalonej np. na podstawie pomiarów).

Należy podkreślić, że podane warunki pominięcia wpływu na konstrukcję budynku drgań przekazywanych przez podłoże nie mogą być stosowane w opiniach diagnostycznych, to znaczy: nie wolno ich stosować w ocenie wpływu drgań na istniejące budynki. Co więcej, kryterium to nie dotyczy także możliwości pominięcia wpływu drgań na ludzi w budynkach, czy to istniejących, czy też projektowanych.

5.2. Ocena pełna wpływu drgań przekazywanych przez podłoże na konstrukcję budynku

Norma PN-B-02170 dopuszcza dwie metody oceny wpływu na konstrukcję budynku drgań przekazywanych przez podłoże: ocenę pełną i ocenę przybliżoną.

Ocena pełna ma zastosowanie do budynków każdego typu. Polega na wyznaczeniu z pomiarów lub z obliczeń sił bezwładności, obciążeniu modelu budynku tymi siłami (rys. 5) w odpowiednich kombinacjach z siłami statycznymi i sprawdzeniu nośności poszczególnych elementów konstrukcji budynku zgodnie z normami budowlanymi z zakresu projektowania konstrukcji budowlanych.

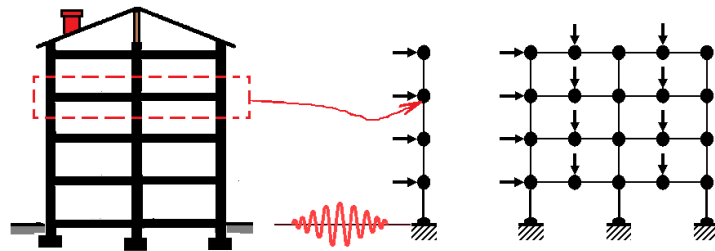
Wyznaczenie sił bezwładności możliwe jest na podstawie:

- a) bezpośredniego pomiaru przyspieszeń drgań (mnożąc pomierzone przyspieszenie drgań przez masę, która drga, otrzymuje się siłę bezwładności działającą na tę masę),
- b) wyznaczania w dziedzinie czasu odpowiedzi modelu budynku na wymuszenie kinematyczne z zastosowaniem bezpośredniego całkowania równań ruchu - metoda THA (Time History Analysis),
- c) wyznaczania odpowiedzi modelu budynku na wymuszenie kinematyczne z użyciem spektrum odpowiedzi - metoda MRSM (Modal Response Spectrum Analysis).

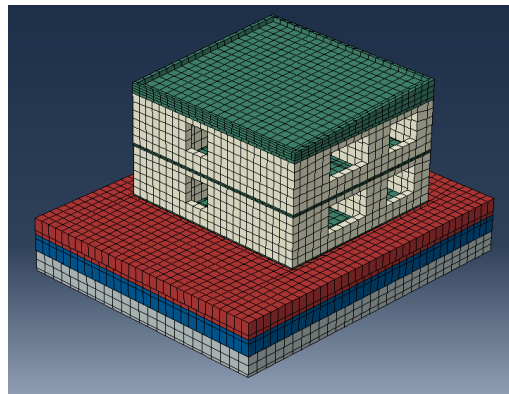
W ujęciu podstawowym przyjmuje się przestrzenny model budynku zbudowany według zasad metody elementów skończonych (MES) – rys. 6. Siły bezwładności oraz wywołane nimi przemieszczenia i naprężenia w elementach konstrukcji wyznacza się w modelu budynku według zasad dynamiki budowli przyjmując wymuszenie kinematyczne.

W odniesieniu do budynków o prostych układach konstrukcyjnych dopuszcza się stosowanie płaskich modeli obliczeniowych, w których występują masy skupione w poziomie stropów kolejnych kondygnacji. W modelu budynku kilkukondygnacyjnego wydziela się zwykle część

budynku pomiędzy płaszczyznami poziomymi przechodzącymi w połowie wysokości kondygnacji poniżej stropu i powyżej stropu – rys. 5.



Rys. 5. Uprozczone modele konstrukcji obciążone siłami bezwładności



Rys. 6. Przykładowy model MES budynku dwukondygnacyjnego

W ujęciu uproszczonym norma dopuszcza taki stopień uproszczenia modelu obliczeniowego budynku, aby wystarczająco dokładnie model pozwalał wyznaczać odpowiedź budynku w przedziale okresów drgań obejmującym znaczące wartości wielkości wymuszenia kinematycznego. Jeśli więc w wymuszeniu kinematycznym występuje dominująca częstotliwość drgań f_g , to minimalną liczbę (j) kolejnych częstotliwości drgań własnych, potrzebną do opisu charakterystyki dynamicznej budynku, należy przyjmować z uwzględnieniem informacji podanych w Tabelicy 1.

Tablica 1¹. Minimalna liczba (j) kolejnych częstotliwości drgań własnych potrzebna do opisu charakterystyki dynamicznej budynku [8]

Warunki dotyczące częstotliwości drgań własnych budynku		j
f_1	f_2	
$f_g \leq 0,85 f_1$	—	1
$f_g > 0,85 f_1$	$f_g \leq 0,85 f_2$	2
—	$f_g > 0,85 f_2$	3

¹ Zamieszczona tu Tablica 1 jest zgodna z erratą udostępnioną na stronie PKN, bowiem Tablica 1 zamieszczona pierwotnie w normie zawiera błędne zwroty nierówności.

5.3. Ocena przybliżona wpływu drgań przekazywanych przez podłoże na konstrukcję budynku

Przybliżoną ocenę wpływu drgań przekazywanych przez podłoże na niektóre typy budynków można wykonać, korzystając ze skal SWD-I i SWD-II (SWD - Skala Wpływów Dynamicznych). Skale te można stosować w odniesieniu do budynków z elementów murowych (tzn. z elementów przeznaczonych do ręcznego układania) oraz budynków z elementów prefabrykowanych (wielki blok, wielka płyta).

Skala SWD-I odnosi się do budynków o kształcie zwartym o małych wymiarach zewnętrznych rzutu poziomego (nieprzekraczających 15 m), jedno- lub dwukondygnacyjnych i o wysokości nieprzekraczającej żadnego z wymiarów rzutu poziomego.

Skala SWD-II odnosi się do budynków nie wyższych niż pięć kondygnacji, których wysokość jest mniejsza od podwójnej najmniejszej szerokości budynku oraz do budynków niskich (do 2 kondygnacji), lecz niespełniających warunków podanych dla skali SWD-I.

W znowelizowanej normie PN-B-02170 zamieszczone są obie skale w układzie częstotliwość-przyspieszenie drgań (rys. 7) lub częstotliwość-prędkość drgań. Ocenie podlegają wartości szczytowe (maksymalne) przyspieszeń (lub prędkości) składowych poziomych drgań pomierzonych w poziomie fundamentu (1) lub terenu (2) w sztywnym węźle konstrukcji od strony źródła drgań (rys. 8).

Na skalach SWD występuje pięć stref szkodliwości oddzielonych czterema liniami granicznymi:

- *strefa I* - drgania pomijalne w ocenie wpływu drgań na budynek;

linia A - dolna granica uwzględnienia wpływów dynamicznych na budynek; przy drganiach poniżej tej granicy można nie uwzględniać wpływów dynamicznych.

- *strefa II* - drgania nieszkodliwe dla konstrukcji; można jednak spodziewać się przyspieszonego zużycia budynku i pierwszych rys w wyprawach, tynkach, zarysowania w narożnikach ścian i w fasetach itp.;

linia B - granica sztywności budynku, dolna granica powstawania zarysowań i spękań w elementach konstrukcyjnych,

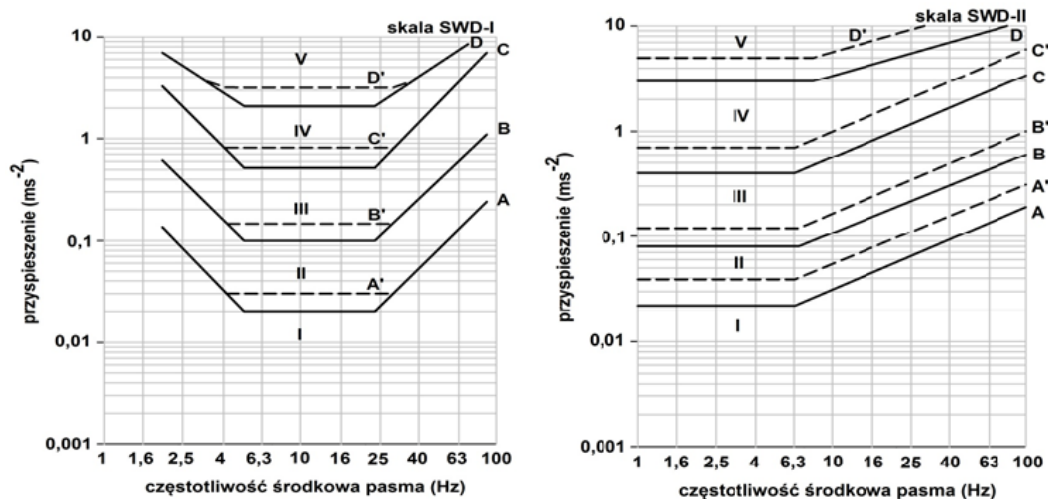
- *strefa III* - drgania szkodliwe dla budynku, powodują lokalne zarysowania i spękania, przez co osłabiają konstrukcję budynku i zmniejszają jego nośność oraz odporność na dalsze wpływy dynamiczne; może nastąpić odpadanie wypraw i tynków, mogą powstawać zarysowania na stykach elementów konstrukcyjnych itp.;

linia C - granica wytrzymałości pojedynczych elementów budynku, dolna granica ciężkich szkód budowlanych;

- *strefa IV* - drgania o dużej szkodliwości dla budynku, stanowią zagrożenie dla bezpieczeństwa ludzi; powstają liczne spękania, lokalne zniszczenia ścian i innych pojedynczych elementów konstrukcyjnych budynku; istnieje możliwość spadania przedmiotów zawieszonych, odpadanie płyt wypraw sufitów, odpadanie gzymsów, spadanie dachówek, wysunięcia się belek stropowych z łożysk itp.; wymagane możliwie szybkie usunięcie źródła drgań lub zmniejszenie jego wpływów;

linia D - granica stateczności konstrukcji, dolna granica awarii całego budynku; drgania powyżej tej granicy mogą spowodować awarię budynku i zagrażają bezpieczeństwu życia ludzkiego,

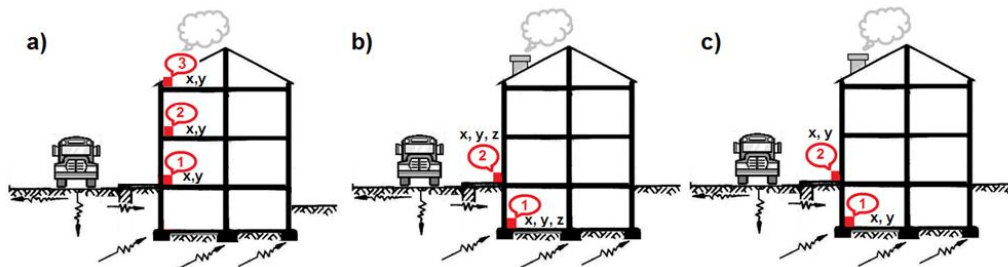
- *strefa V* - drgania powodują awarię budynku przez walenie się ścian, spadanie stropów itp.; pełne zagrożenie bezpieczeństwa życia ludzkiego; w przypadku groźby powstania drgań tego typu budynek nie może być użytkowany.



Rys. 7. Skale SWD-I i SWD-II podane we współrzędnych: częstotliwość środkowa pasma 1/3-oktawowego – maksymalne przyspieszenie drgań w tym paśmie (wg. [8])

5.4. Zasady wykonania pomiarów drgań

Czujniki należy mocować bezpośrednio do konstrukcji budynku w sztywnych węzłach konstrukcji, od strony źródła drgań. Na rys. 8 podano zasady, jakimi należy się kierować rozmieszczając punkty pomiarowe.

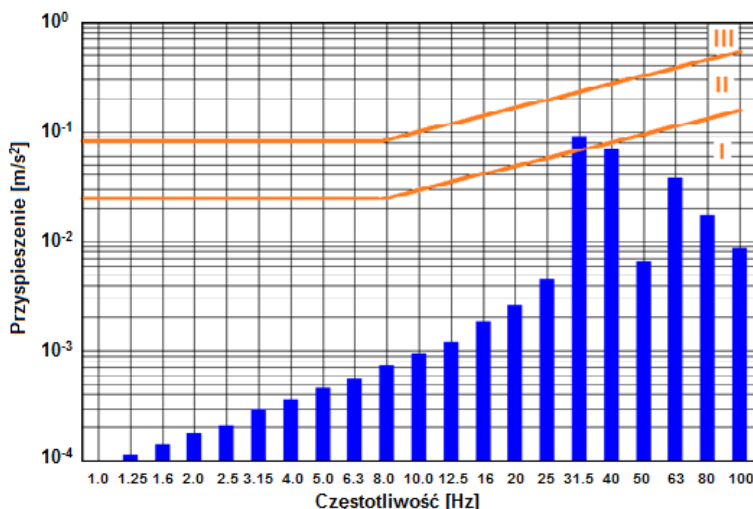


Rys. 8. Zasady rozmieszczenia punktów pomiarowych i składowe mierzone drgań (x, y, z):
a) przy wyznaczaniu poziomych sił bezwładności na poszczególnych kondygnacjach na podstawie pomiaru przyspieszeń; b) przy wyznaczaniu parametrów wymuszenia kinematycznego w istniejącym budynku (ocena pełna); c) przy stosowaniu skal SWD do oceny wpływu drgań na konstrukcję budynku

5.5. Wskaźnik Odczuwalności Drgań przez Budynek – WODB

W znowelizowanej normie PN-B-02170 wprowadzono pojęcie wskaźnika WODB. Jest to największa spośród wyznaczonych w poszczególnych pasmach 1/3-oktawowych wartości stosunku maksymalnych wartości prędkości lub przyspieszenia drgań wyznaczonych w wyniku analizy wibrogramu w pasmach 1/3-oktawowych do wartości prędkości albo przyspieszenia odpowiadającej dolnej granicy uwzględnienia wpływów dynamicznych na budynki objęte skalami SWD w tym samym paśmie częstotliwości. Należy podawać wartość wskaźnika WODB łącznie z wartością częstotliwości środkowej pasma 1/3 oktawowego, w którym ten stosunek wyznaczono.

Na rys. 9 zamieszczono wynik oceny wpływu drgań za pomocą skali SWD-II oraz określono wartość WODB z tej analizy.

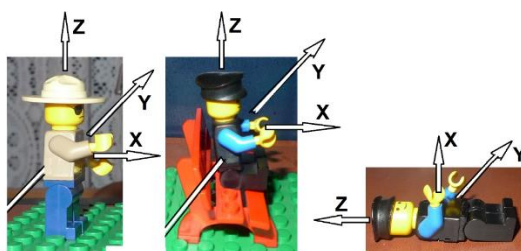


Rys. 9. Ocena wpływu tych drgań na budynek za pomocą skali SWD-II, w tym przypadku wskaźnik WODB o wartości ok. 1,29 uzyskano w paśmie o częstotliwości środkowej 31,5 Hz

6. Ocena wpływu drgań na ludzi w budynku zgodnie z PN-B-02171

Przedmiotem normy jest ocena wpływu drgań (zapewnienia komfortu wibracyjnego) na ludzi przebywających w budynkach i odbierających drgania w sposób bierny. Bierny odbiór drgań ma miejsce wtedy, gdy człowiek odbierający drgania nie obsługuje źródeł drgań i nie ma bezpośredniego wpływu na pracę źródeł drgań. Źródła te mogą znajdować się w obrębie budynków lub poza nimi.

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) drgań w miejscu przekazywania drgań na człowieka. Oceny dokonuje się odrębnie dla kierunków poziomych X i Y (kierunki prostopadłe do kręgosłupa człowieka) i pionowego Z, rozumianego jako kierunek wzdłuż kręgosłupa – rys. 10.



Rys. 10. Kierunki odbioru drgań przez człowieka w zależności od pozycji ciała

Ocenę przeprowadza się na podstawie wartości jednego z następujących parametrów:

- skorygowanej w dziedzinie częstotliwości wartości skutecznej przyspieszenia/prędkości drgań,
- wartości skutecznej przyspieszenia/prędkości drgań w pasmach 1/3-oktawowych.

Pomocniczym parametrem oceny jest dawka wibracji, za pomocą której ocenia się prawdopodobieństwo wystąpienia skarg ludzi przebywających w budynku na oddziaływujące na nich drgania.

6.1. Ocena na podstawie wartości skorygowanej RMS

Jest to ocena diagnostyczna, polegająca na umieszczeniu w torze pomiarowym filtra korekcyjnego, podanego w PN-EN ISO 8041:2008 (wartości opisujące filtr korekcyjny podano także w Tabelicy 1 normy PN-B-02171). W wyniku korekcji otrzymuje się jedną wartość w całym paśmie częstotliwości od 1 do 80 Hz. Jest to jedynie informacja o tym, czy i w jakim stopniu zostały naruszone wymagania odnośnie do zapewnienia ludziom w budynku warunków odpowiadających niezbędnemu komfortowi wibracyjnemu.

Wówczas wpływ drgań na ludzi należy oceniać stosując wzór:

$$a_k \leq a_{kdop} \quad \text{lub} \quad v_k \leq v_{kdop} \quad (1)$$

w którym:

$$a_{kdop} = a_{k1} \cdot n \quad \text{lub} \quad v_{kdop} = v_{k1} \cdot n \quad (2)$$

a_k (lub v_k) - skorygowana wartość skuteczna przyspieszenia (lub prędkości) drgań otrzymana na podstawie analizy wibrogramu - pomierzonego albo obliczonego w miejscu odbioru drgań przez człowieka,

a_{k1} (lub v_{k1}) – skorygowana wartość skuteczna przyspieszenia (lub prędkości) drgań odpowiadająca progowi odczuwalności drgań przez człowieka odczytana z Tabelicy 2 (Tabelica 5 w PN-B-02171),

n - współczynnik uwzględniający wpływ na wymagany komfort wibracyjny charakteru i powtarzalności drgań, przeznaczenia pomieszczenia oraz pory występowania drgań (dzień, noc) – odczytany z Tabelicy 3.

Tablica 2. (Tabelica 5 normy PN-B-02171 [9]) - Skorygowane wartości skuteczne odpowiadające progowi odczuwalności drgań

Opis wielkości	Kierunek odbioru drgań przez człowieka	
	z	x i y
Skorygowana wartość skuteczna przyspieszenia a_{k1}, ms^{-2}	0,00500	0,00357
Skorygowana wartość skuteczna prędkości v_{k1}, ms^{-1}	0,00010	0,00028

Tablica 3. (Tablica 3 normy PN-B-02171 [9]) - Wartości współczynnika n

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

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

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

³⁾ Współczynnik n należy podwoić ($n=16$) w warsztatach pracy przemysłu ciężkiego, np. mechanicznych, odlewniczych

6.2. Ocena na podstawie wartości RMS w pasmach 1/3-oktawowych

Jest to podstawowa metoda oceny. W jej wyniku uzyskuje się nie tylko informacje o tym, czy poziom drgań narusza wymagania w zakresie zapewnienia ludziom w budynkach niezbędnego komfortu wibracyjnego, ale również informacje o tym, w których pasmach częstotliwości te wymagania zostały naruszone.

Wpływ drgań na ludzi należy oceniać stosując wzór:

$$a_{\text{rms}}(f) \leq a_{\text{dop}}(f) \quad \text{lub} \quad v_{\text{rms}}(f) \leq v_{\text{dop}}(f) \quad (3)$$

w którym:

$$a_{\text{dop}}(f) = a_1(f) \cdot n \quad \text{lub} \quad v_{\text{dop}}(f) = v_1(f) \cdot n \quad (4)$$

$a_{rms}(f)$ lub $v_{rms}(f)$ - wartość skuteczna przyspieszenia (lub prędkości) drgań otrzymana w paśmie o częstotliwości środkowej f na podstawie analizy wibrogramu - pomierzonego albo obliczonego w miejscu odbioru drgań przez człowieka,

$a_I(f)$ lub $v_I(f)$ – wartość skuteczna przyspieszenia (lub prędkości) drgań odpowiadająca progowi odczuwalności drgań przez człowieka w paśmie o częstotliwości środkowej f odczytana z Tablicy 4 (Tablice 2 i 4 w PN-B-02171),

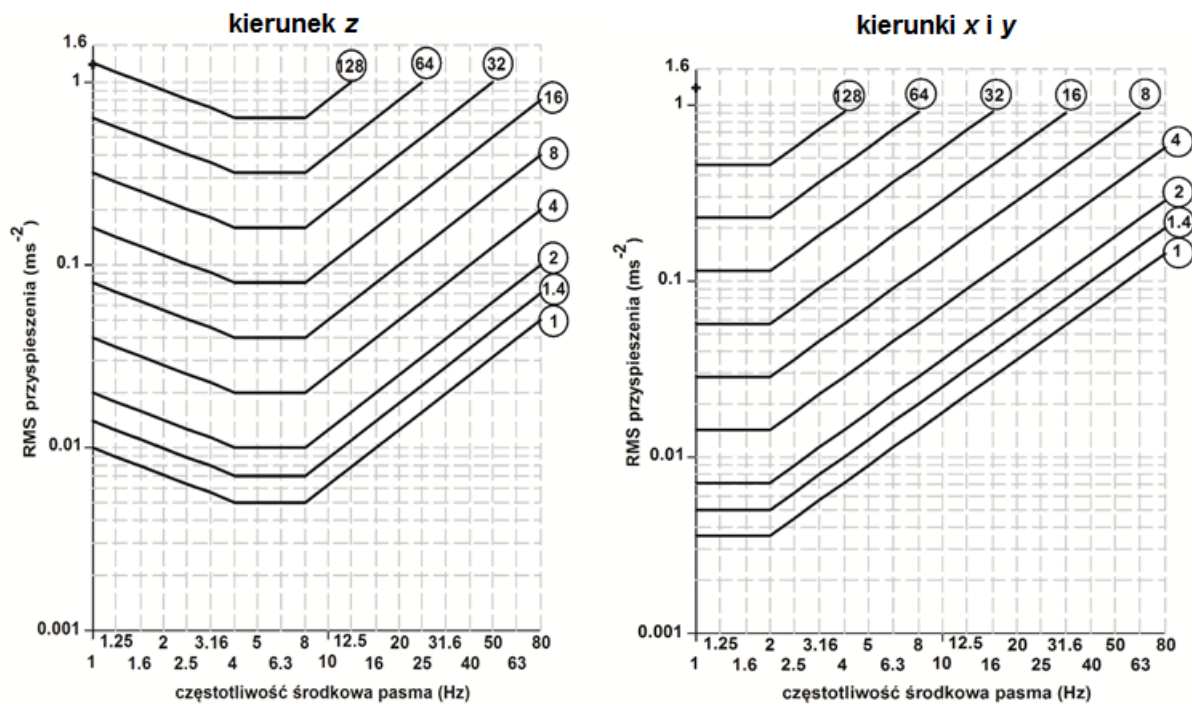
n - współczynnik uwzględniający wpływ na wymagany komfort wibracyjny charakteru i powtarzalności drgań, przeznaczenia pomieszczenia oraz pory występowania drgań (dzień, noc) – odczytany z Tablicy 3.

Wzór (3) powinien być spełniony w każdym paśmie 1/3-oktawowym o częstotliwości środkowej f .

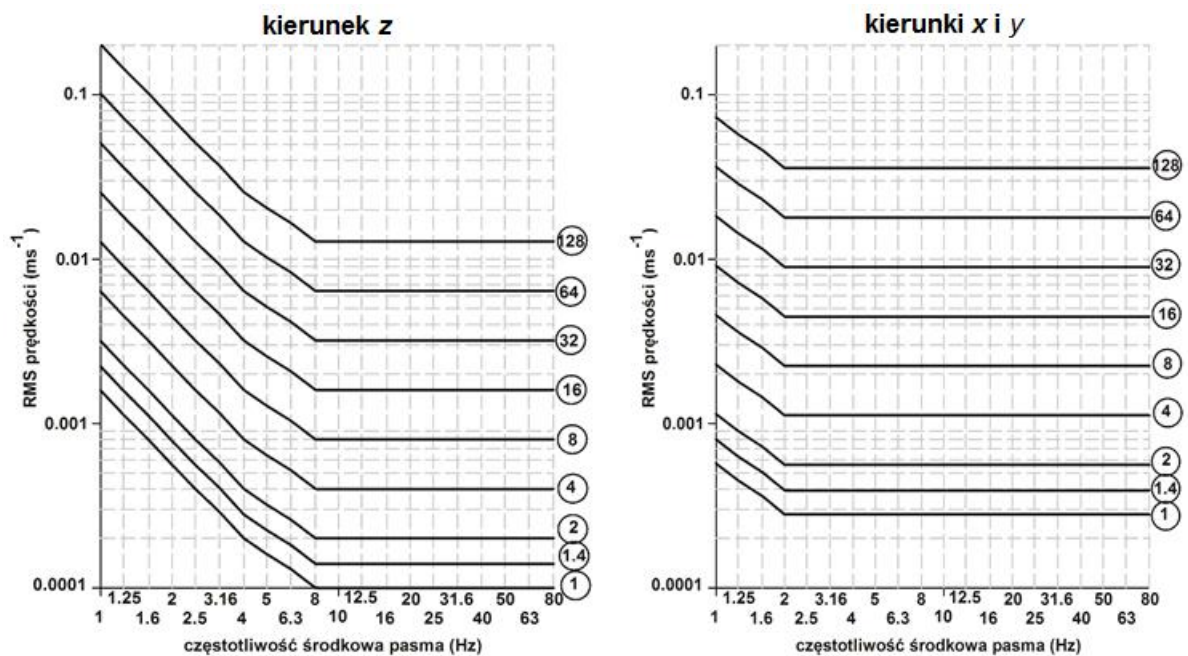
Tablica 4. Wartości skuteczne przyspieszenia lub prędkości drgań odpowiadające progowi odczuwalności drgań w pasmach 1/3-oktawowych (wg PN-B-02171 [9])

Częstotliwość środkowa pasma, f , Hz	Wartość skuteczna przyspieszenia a_I , ms ⁻² , przy odbiorze przez czło- wieka drgań z kierunku		Wartość skuteczna prędkości v_I , ms ⁻¹ przy odbiorze przez człowieka drgań z kierunku	
	z	x i y	z	x i y
1	0,010 00	0,003 57	0,001 59	0,000 57
1,25	0,008 90	0,003 57	0,001 13	0,000 45
1,6	0,007 91	0,003 57	0,000 79	0,000 36
2	0,007 07	0,003 57	0,000 56	0,000 28
2,5	0,006 32	0,004 46	0,000 40	0,000 28
3,15	0,005 70	0,005 70	0,000 29	0,000 28
4	0,005 00	0,007 14	0,000 20	0,000 28
5	0,005 00	0,008 93	0,000 16	0,000 28
6,3	0,005 00	0,011 40	0,000 13	0,000 28
8	0,005 00	0,014 30	0,000 10	0,000 28
10	0,006 25	0,017 90	0,000 10	0,000 28
12,5	0,007 81	0,022 50	0,000 10	0,000 28
16	0,010 00	0,028 60	0,000 10	0,000 28
20	0,012 50	0,035 70	0,000 10	0,000 28
25	0,015 60	0,044 60	0,000 10	0,000 28
31,5	0,019 73	0,056 39	0,000 10	0,000 28
40	0,025 00	0,071 40	0,000 10	0,000 28
50	0,031 30	0,089 30	0,000 10	0,000 28
63	0,039 40	0,113 00	0,000 10	0,000 28
80	0,050 00	0,143 00	0,000 10	0,000 28

Wartości przyspieszenia lub prędkości drgań odpowiadające progom odczuwalności drgań przez ludzi oraz granicom komfortu przedstawiono na rys. 11 i 12.



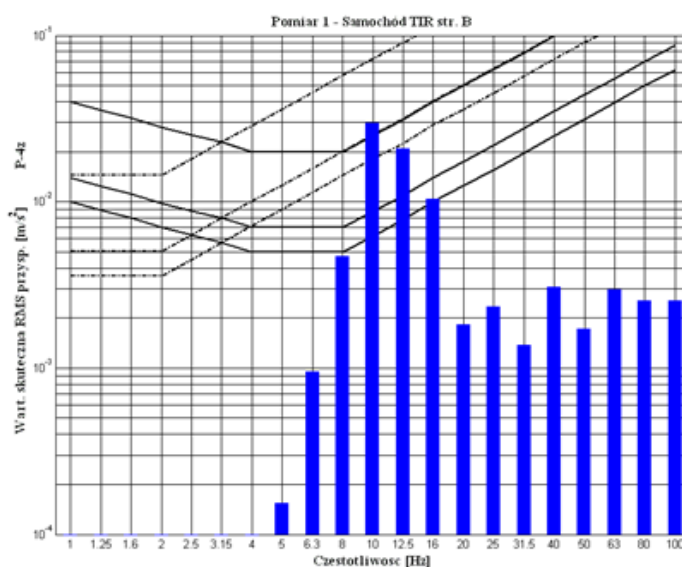
Rys. 11. Wartości skuteczne przyspieszenia drgań a_{rms} - linie progu odczuwalności i linie komfortu (wg PN-B-02171 [9])



Rys. 12. Wartości skuteczne prędkości drgań v_{rms} - linie progu odczuwalności i linie komfortu (wg PN-B-02171 [9])

6.3. Wskaźnik Odczuwalności Drgań przez Ludzi – WODL

Wskaźnik WODL (Wskaźnik Odczuwalności Drgań przez Ludzi) jest to 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.



Rys. 13. Przykładowe wyniki oceny wpływu drgań na ludzi na podstawie analizy wartości RMS przyspieszeń drgań w pasmach 1/3-oktawowych

Na rys. 13 przedstawiono przykładowe wyniki oceny wpływu drgań na ludzi na podstawie analizy wartości RMS przyspieszeń drgań w pasmach 1/3-oktawowych. Maksymalna pomierzona wartość RMS przyspieszeń drgań wyniosła $0,030 \text{ m/s}^2$ w paśmie o częstotliwości środkowej 10 Hz. Ponieważ w tym paśmie częstotliwości progowi odczuwalności drgań przez ludzi odpowiada wartość $0,006 \text{ m/s}^2$ stąd wskaźnik $\text{WODL} = 0,030 / 0,006 = 5,0$. Oznacza to, że pomierzone drgania nie zapewniają ludziom komfortu wibracyjnego ani w nocy (WODL nie powinien przekraczać w nocy wartości 1,4), ani w porze dziennej (WODL nie powinien przekraczać w dzień wartości 4,0). Wartość wskaźnika WODL podaje się wraz z częstotliwością środkową pasma częstotliwości, w której ta wartość została osiągnięta.

7. Co powinna zawierać opinia korzystająca z pomiarów drgań in situ

Podstawą dokonania oceny wpływu drgań na budynki i ludzi w budynkach powinny być pomiary drgań wykonane in situ.

Zawartość opinii jest zależna od celu jej sporządzenia. Najczęściej opinia taka powinna zawierać:

- Podstawy opracowania
 - Pismo zlecające wykonanie opinii
 - Akta sądowe
 - Inna dokumentacja
 - Protokół z pomiarów

- Normy, wytyczne i inne przepisy prawne
- Cel i zakres opinii
- Opis badanego budynku
 - Konstrukcja
 - Wymiary
 - Odległość od źródeł drgań
- Opis pomiarów
 - Cel i zakres pomiarów
 - Zastosowana aparatura
 - Rozmieszczenie punktów pomiarowych z rysunkami rozmieszczenia i ewentualnie zdjęciami
 - Przebieg pomiarów
- Wyniki pomiarów
 - Zestawienie wyników z poszczególnych rejestracji
 - Analizowane przebiegi czasowe drgań
 - Wyniki analiz wpływu drgań na budynki oraz na ludzi w budynkach
- Analiza wyników pomiarów z końcową oceną.

W opinii lub w protokole pomiarowym powinien być certyfikat akredytacji PCA do wykonywania pomiarów drgań zgodnie z normami PN-B-02170 i PN-B-02171, a także świadectwa kalibracji czujników pomiarowych.

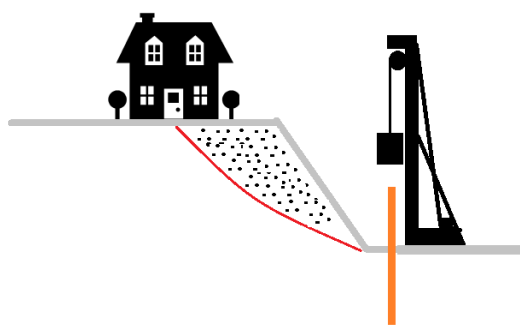
8. Algorytm postępowania w przypadku prac budowlanych generujących drgania

Najczęściej problem ochrony przed drganiami dotyczy takich prac budowlanych, jak: przejazdy ciężkich pojazdów budowy, wbijanie lub wwibrowywanie w grunt pali fundamentowych lub grodzie ścianek szczelnych, wiercenie pali z wwibrowywaniem zbrojenia, praca drogowych walców wibracyjnych, uderzenia koparki w grunt w pobliżu istniejących budynków itp.

W takich przypadkach należy wykonać kolejno następujące prace:

- Inwentaryzacja uszkodzeń budynków znajdujących się w strefie wpływu robót
- Prognoza wpływu na te budynki drgań wywołanych pracami budowlanymi
- Pomiary kontrolne drgań:
 - określenie dopuszczalnych parametrów pracy urządzeń wywołujących drgania
 - monitorowanie podczas budowy wpływu drgań na sąsiednią zabudowę w sposób ciągły lub okresowy – sporządzenie raportu.

Należy brać pod uwagę, że uszkodzenia budynków podczas prowadzenia prac budowlanych mogą być nie tylko wynikiem oddziaływania drgań na konstrukcję budynku, ale także na grunt pod budynkiem. Na rys. 14 przedstawiono sytuację uruchomienia pod wpływem drgań nawodnionej skarpy obciążonej budynkiem. Podobnie drgania generowane pracą walców drogowych mogą wpływać nie tylko na zagęszczenie warstw podbudowy i nawierzchni drogowej, ale także na zagęszczenie podłoża pod sąsiednimi budynkami, co w efekcie może prowadzić do osiadań tych budynków.



Rys. 14. Schemat uruchomienia obciążonej budynkiem skarpy pod wpływem drgań wywołanych wbijaniem ścianki szczelnej

9. Wnioski

Wykonywanie opinii z zakresu ocen wpływu drgań na budynki i na ludzi w budynkach wymaga zarówno doświadczenia, jak i przygotowania w zakresie wykonywania pomiarów drgań. Znowelizowane normy PN-B-02170 z 2016 r. i PN-B-02171 z 2017 r. zawierają wymagania dotyczące zakresu i czułości aparatury pomiarowej oraz sposobu wykonania pomiarów.

W zagadnieniach wpływów dynamicznych nie wolno zaufać zwykłej tzw. „intuicji inżynierskiej”, bo ta jest z reguły ukształtowana przez doświadczenia związane z obciążeniami statycznymi. Nie można też, jak to się niestety zdarzało, kierować się własnymi odczuciami co do odczuwalności drgań i na tej podstawie wyrokować, czy drgania mogły, czy też nie mogły spowodować uszkodzeń budynku. Należy pamiętać, że poziom drgań odczuwanych przez człowieka jest o rząd wielkości niższy od poziomu drgań mających wpływ na konstrukcję budynku. Podstawą oceny wpływu drgań na budynki i na ludzi w budynkach powinien być pomiar drgań i odpowiednia analiza pomierzonych drgań.

Przystępując do sporządzania opinii, należy dokładnie zapoznać się z treścią ww. norm i ściśle stosować się do zawartych w nich zapisów, aby nie popełnić istotnych błędów tak w zakresie wykonywania pomiarów, jak i interpretacji uzyskanych wyników.

Przykłady najczęściej popełnianych błędów znajdzie czytelnik m.in. w pracach [1 i 3].

Literatura

1. Kawecki J., Stypuła K.: *Błędy w diagnozach dotyczących oceny wpływów dynamicznych na budynki*. Mat. XXIII Konf. naukowo-techn. Awarie Budowlane, Szczecin-Międzyzdroje 2007, s. 267-274.
2. Kawecki J., Stypuła K.: *Wpływ drgań generowanych podczas robót drogowych na zabytkowe obiekty budowlane (diagnoza a posteriori)*. Czasopismo Techniczne, Budownictwo 2-B/2009, zeszyt 9, rok 106, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 2009, s. 183-189.
3. Kawecki J., Stypuła K.: *Jeszcze raz o błędach w diagnozach dotyczących oceny wpływów dynamicznych na budynki oraz ludzi w budynkach*. Awarie Budowlane : zapobieganie, diagnostyka, naprawy, rekonstrukcje: XXVI Konferencja Naukowo-Techniczna, Szczecin-Międzyzdroje, 21-24 maja 2013. s. 243-250.
4. Kawecki J., Stypuła K., *Oczekiwane rezultaty znowelizowania norm PN-B-02170 i PN-B-02171* // W: Awarie budowlane: zapobieganie, diagnostyka, naprawy, rekonstrukcje:

- monografia / red. nauk. Maria Kaszyńska; Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie. Wydział Budownictwa i Architektury. – Szczecin : Wydaw. Uczelniane Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie, 2017. – S. 403-409
5. Stypuła K.: *Nowe inwestycje a ochrona środowiska przed drganiami*. Izolacje nr 10/2008 (130), s. 44-48.
 6. Stypuła K.: *Wpływ drgań komunikacyjnych na budynki i przebywających w nich ludzi*. Materiały Budowlane nr 3/2009, s. 120 – 131.
 7. Stypuła K., *Uszkodzenia budynków jako efekt oddziaływań parasejsmicznych pochodzenia transportowego i budowlanego. Morfologia - diagnostyka – zabezpieczanie*. Naprawy i wzmocnienia konstrukcji budowlanych : geotechnika : XXXII Ogólnopolskie Warsztaty Pracy Projektanta Konstrukcji, Wisła 7-10 marca 2017 r. T.2, Wykłady, referaty firmowe i informacje techniczno-promocyjne. Oddz. Małopolski PZITB, Kraków, 2017, s. 223-242.
 8. PN-B-02170. Ocena szkodliwości drgań przekazywanych przez podłoże na budynki.
 9. PN-B-02171. Ocena wpływu drgań na ludzi w budynkach.