

WPŁYW DRGAŃ NA PROJEKTOWANIE BUDYNKÓW



prof. dr hab. inż. Krzysztof Stypuła
dr inż. Krzysztof Kozioł
Politechnika Krakowska

Czyli co należy wiedzieć, projektując budynki w pobliżu źródeł drgań komunikacyjnych – dróg, linii kolejowych, linii tramwajowych i metra.

Coraz częściej wykorzystuje się pod zabudowę tereny sąsiadujące z takimi źródłami tzw. drgań komunikacyjnych (vel transportowych), jak drogi kołowe, linie kolejowe, linie tramwajowe czy, w przypadku Warszawy, tunele metra. Drgania te mogą wywierać wpływ na konstrukcję budynków oraz na przebywających w nich ludzi (rys. 1), a niekiedy także na wrażliwe na drgania maszyny i urządzenia.

Rodzą się wówczas pytania:

- Czy i w jakich sytuacjach musimy uwzględnić wpływ drgań na projektowany budynek, a w jakich nie?
- W jaki sposób uwzględnić ten wpływ?
- Jakie przyjmuje się kryteria poprawności zaprojektowanych rozwiązań?
- Jakie sposoby ochrony przed drganiami można zastosować?

Odpowiedzi na te pytania nie zawsze są proste, o czym świadczy sporo realizacji niespełniających wymagań w zakresie ochrony przed drganiami.

Autorzy zdobyli bogate doświadczenie, zajmując się od wielu lat problematyką pomiarów drgań budowli, diagnostyką dynamiczną i projektowaniem obiektów budowlanych z uwzględnieniem wpływów dynamicznych, a także projektowaniem wibroizolacji budynków i wibroizolacji nawierzchni szynowych [1, 2, 5]. W latach 2000–2016 autorzy brali udział w wykonaniu analiz i prognoz wpływu drgań metra na ponad 30 nowo projektowanych budynków, wpływu drgań kolejowych w przypadku kilkunastu projektowanych budynków, a w około kilkunastu kolejnych przypadkach obliczenia dotyczyły wpływu drgań tramwajowych. Opisywane budynki posiadały od kilku do kilkudziesięciu kondygnacji. Oprócz tego zespół z udziałem autorów wykonał pomiary drgań i analizy (prognozy) dynamiczne istniejących budynków dla ponad 160 obiektów przy I i II linii metra w Warszawie oraz kilkudziesięciu budynków wzdłuż linii kolejowych i tramwajowych oraz dróg kołowych. Do tego dodać można obliczenia wibroizolacji w nawierzchni szynowej w kolejowym tunelu śred-



Rys. 1. Ideogram zagadnienia

nicowym w Warszawie (pierwsza w Polsce realizacja systemu EBS), na bielańskim odcinku I linii warszawskiego metra, na kilku liniach tramwajowych w Warszawie i Krakowie oraz na dworcach kolejowych: Katowice Osobowa (ochrona przed drganiami Galerii Katowickiej), Kraków Główny i podziemny dworzec Łódź Fabryczna.

Autorzy biorą także udział w nowelizacji obu polskich norm z zakresu wpływu drgań na budynki (PN-B-02170) oraz na ludzi w budynkach (PN-B-02171).

Institut Mechaniki Budowli Politechniki Krakowskiej posiada w swojej strukturze akredytowane Laboratorium Badania Odształceń i Drgań Budowli oraz dysponuje obszerną bazą danych pomiarowych, pomocnych w prognozowaniu wpływów drgań transportowych.

Biorąc pod uwagę te doświadczenia, przedstawiono poniżej kilka wskazówek dla projektantów obiektów narażonych na wpływ drgań komunikacyjnych.

Kiedy należy uwzględnić wpływ drgań – strefy wpływu

Zaczynając od kwestii konieczności uwzględnienia wpływu drgań, należy przywołać przepisy, z których wynika ta konieczność. Jest to przede wszystkim: Rozporządzenie 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.). I tak w paragrafie 11 napisano:

§ 11. 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 uciążliwość 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:

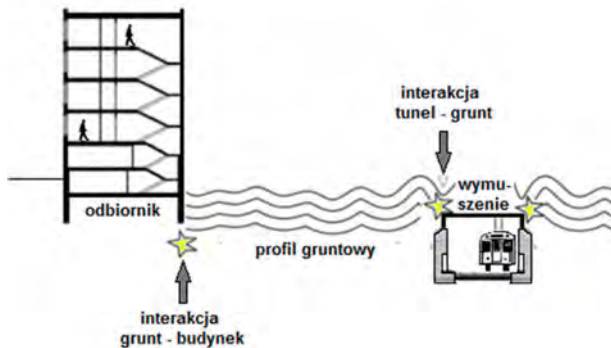
- 1) szkodliwe promieniowanie i oddziaływanie pól elektromagnetycznych;
- 2) hałas i drgania (wibracje);
- 3) zanieczyszczenie powietrza;
- 4) zanieczyszczenie gruntu i wód;
- 5) powodzie i zalewanie wodami opadowymi;
- 6) osuwiska gruntu, lawiny skalne i śnieżne;
- 7) szkody spowodowane działalnością górnictwem.

Doprecyzowanie wymagań dotyczących uwzględnienia drgań dochodzących z zewnątrz do budynku zawierają paragrafy 325 i 326 ust. 1:

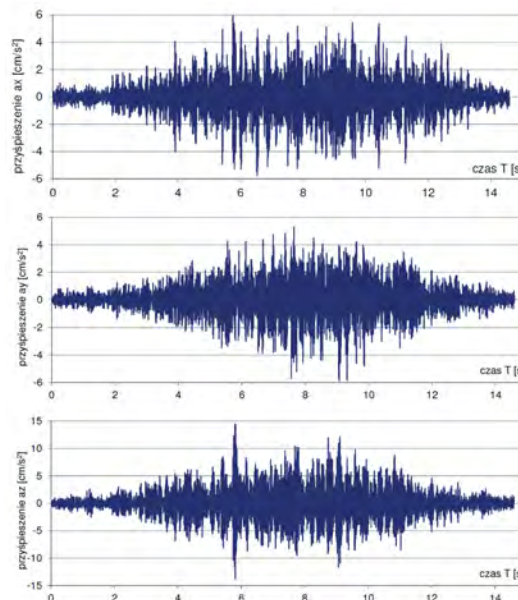
§ 325. 1. Budynki mieszkalne, budynki zamieszkania zbiorowego i budynki użyteczności publicznej należy sytuować w miejscach najmniej narażonych na występowanie hałasu i drgań, a jeżeli one występują i ich poziomy będą powodować w pomieszczeniach tych budynków przekroczenie dopuszczalnego poziomu hałasu i drgań, określonych w Polskich Normach dotyczących dopuszczalnych wartości poziomu dźwięku w pomieszczeniach oraz oceny wpływu drgań na budynki i na ludzi w budynkach, należy stosować skuteczne zabezpieczenia.

2. Budynki z pomieszczeniami wymagającymi ochrony przed zewnętrznym hałasem i drganiami należy chronić przed tymi uciążliwościami poprzez zachowanie odpowiednich odległości od ich źródeł, usytuowanie i ukształtowanie budynku, stosowanie elementów amortyzujących drgania oraz osłaniających i ekranujących przed hałasem, a także racjonalne rozmieszczenie pomieszczeń w budynku oraz zapewnienie izolacyjności akustycznej przegród zewnętrznych określonej w Polskiej Normie dotyczącej wymaganej izolacyjności akustycznej przegród w budynkach oraz izolacyjności akustycznej elementów budowlanych.

§ 326. 1. Poziom hałasu oraz drgań przenikających do pomieszczeń w budynkach mieszkalnych, budynkach zamieszkania zbiorowego i budynkach użyteczności publicznej, z wyłączeniem budynków, dla których

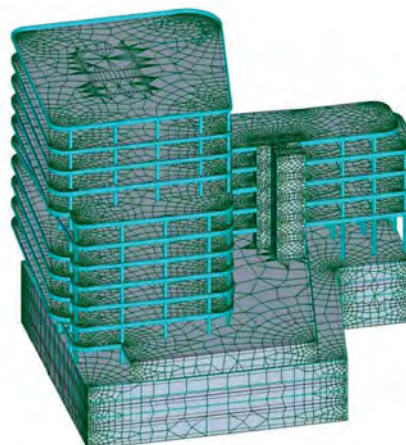


Rys. 2. Schemat modelu do analizy propagacji drgań od źródła drgań do budynku



Rys. 3. Przykład wymuszenia kinematycznego wywołanego przejazdami metra w tunelu – składowe przyspieszenia drgań:

- a_x – składowa pozioma prostopadła do tunelu metra,
- a_y – składowa pozioma równoległa do tunelu metra,
- a_z – składowa pionowa



Rys. 4. Przykład modelu MES budynku do analizy dynamicznej



Rys. 5. Wyznaczenie czasu trwania drgań zgodnie z normami PN-B-02170 i PN-B-02171 (wg [1])

jest konieczne spełnienie szczególnych wymagań ochrony przed hałasem, nie może przekraczać wartości dopuszczalnych, określonych w Polskich Normach dotyczących ochrony przed hałasem pomieszczeń w budynkach oraz oceny wpływu drgań na ludzi w budynkach, wyznaczonych zgodnie z Polskimi Normami dotyczącymi metody pomiaru poziomu dźwięku A w pomieszczeniach oraz oceny wpływu drgań na ludzi w budynkach.

Zamieszczony na końcu cytowanego Rozporządzenia Załącznik nr 1 zatytułowany WYKAZ POLSKICH NORM POWOŁANYCH W ROZPORZĄDZENIU przywołuje jako obowiązujące (w odniesieniu do zagadnienia wpływu drgań poruszonego w wyżej wymienionych paragrafach) dwie polskie normy¹:

- PN-B-02170:1985 Ocena szkodliwości drgań przekazywanych przez podłoże na budynki,
- PN-B-02171:1988 Ocena wpływu drgań na ludzi w budynkach.

Kiedy zatem należy uwzględnić wpływ drgań w projektowaniu budynków położonych w pobliżu źródeł drgań komunikacyjnych (transportowych)? W punkcie 6.2 normy PN-B-02170:1985 podano warunki pominięcia wpływu drgań w obliczeniach konstrukcji budynku:

W projektowaniu budynków można pominąć wpływ drgań przekazywanych przez podłoże, jeśli amplituda przyspieszeń ruchu poziomego podłoża w miejscu posadowienia budynku spełnia warunek:

$$a_p \leq 0,05 \text{ ms}^{-2}$$

Gdzie a_p jest to wartość szczytowa przyspieszenia drgań podłoża stanowiących wymuszenie kinematyczne budynku. I dalej zapisano w normie:

Na tej podstawie przyjmuje się, że w obliczeniach projektowych można pominąć oddziaływanie drgań przekazywanych przez podłoże na budynek, jeżeli budynek znajduje się:

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

Należy pamiętać, że są to zasięgi strefy wpływu drgań na konstrukcję budynku, nieuwzględniające wpływu drgań na ludzi w budynku ani na ewentualne urządzenia wrażliwe na drgania, jak np. serwery i stacje komputerowe, mikroskopy elektronowe, urządzenia do nanotechnologii, precyzyjne obrabiarki itp. Czyli nawet jeśli zostanie spełniony powyższy warunek, to należy rozważyć wpływ drgań na ludzi oraz ewentualnie na wspomniane urządzenia.

Jeśli chodzi o zasięg strefy wpływu drgań na ludzi w budynkach, to zależy od rodzaju i typu źródła drgań, od warunków gruntowo-wodnych, konfiguracji terenu i konstrukcji budynku zasięg ten może wynosić przeciętnie:

- a) linia kolejowa o ruchu towarowym lub mieszanym towarowo-pasażerskim – ok. 80 m (w szczególnych przypadkach do 100, a nawet 120 m),
- b) linia kolejowa o ruchu pasażerskim – ok. 65 m,
- c) linia tramwajowa – ok. 25 m (w szczególnych przypadkach do 30, a nawet 35 m),
- d) linia metra płytkiego – 40 m,
- e) droga kołowa – ok. 25 m.

Zasięg strefy wpływu drgań na urządzenia wrażliwe na drgania należy określać indywidualnie, zależnie od rodzaju urządzenia, które ma być chronione przed drganiami.

Zasady i kryteria projektowania budynków z uwzględnieniem wpływu drgań transportowych

Pierwszym krokiem powinno być ustalenie tzw. wymuszenia kinematycznego, czyli prognozowanych drgań fundamentów budynku, które wymszą drgania całej konstrukcji obiektu. Wymuszenie to można uzyskać:

- na podstawie pomiarów drgań gruntu w miejscu przyszłego posadowienia projektowanego budynku, przy czym należy uwzględnić funkcję przejścia na styku grunt–budynek,
- na podstawie bazy danych pomiarowych uzyskanych w podobnych warunkach co do źródła drgań, budowy geotechnicznej podłoża i warunków wodnych.

W pierwszym przypadku na skutek interakcji dynamicznej grunt–budynek następować będzie po wybudowaniu budynku redukcja drgań fundamentów budynku (np. maksymalnych wartości przyspieszenia drgań) w stosunku do drgań gruntu pomierzonych przed wybudowaniem budynku. Przykładowo redukcja składowej pionowej drgań generowanych przez transport szynowy może dochodzić nawet do 90%. Zmienia się także spektrum częstotliwościowe drgań. Nieuwzględnienie zatem wspomnianej funkcji przejścia przy określaniu wymuszenia kinematycznego projektowanego budynku może narazić inwestora na znaczne, niczym nieuzasadnione zwiększenie kosztów zabezpieczeń przed wpływami dynamicznymi.

Natomiast w przypadku korzystania z bazy danych pomiarowych należy zbudować model propagacji od źródła drgań do projektowanego obiektu (rys. 2) i na podstawie danych z bazy określić wymuszenie kinematyczne w postaci prognozowanych przebiegów czasowych składowych drgań w trzech kierunkach (rys. 3). Wspomniany model powinien uwzględniać m.in. zmiany parametrów drgań w zależności od danych geotechnicznych i odległości budynku od źródła drgań.

Kolejny krok to sporządzenie modelu MES budynku do obliczeń dynamicznych (rys. 4), przyłożenie wymuszenia na styku konstrukcji budynku z gruntem i wykonanie analizy czasowej, tzw. time history analysis (THA). Jest to metoda wyznaczania odpowiedzi modelu budynku na wymuszenie kinematyczne opisane w dziedzinie czasu z zastosowaniem metod bezpośredniego całkowania równań ruchu. W efekcie tej analizy otrzymuje się w poszczególnych węzłach konstrukcji:

- a) przebiegi czasowe sił dynamicznych (sił bezwładności) obciążających dodatkowo konstrukcję budynku na skutek oddziaływania drgań; ekstremalne wartości tych sił uwzględnia się w projektowaniu elementów konstrukcji,
- b) przebiegi czasowe przyspieszeń lub prędkości drgań w węzłach elementów płyt stropowych (ściślej: posadzki), które służą do wykonania oceny wpływu drgań na ludzi (lub na urządzenia wrażliwe na drgania, jeśli takie urządzenia przewidziano w projektowanym budynku).

O ile uwzględnienie w projektowaniu konstrukcji sił dynamicznych praktycznie zabezpiecza budynek przed uszkodzeniami konstrukcyjnymi, o tyle sprawa wpływu drgań na ludzi w budynku wymaga szczególnej uwagi. Z reguły to właśnie ten wymóg zapewnienia ludziom w budynku odpowiedniego komfortu wibracyjnego decyduje o konieczności zabezpieczenia obiektu przed drganiami [1].

Ocena wpływu drgań na ludzi w budynkach wykonywana jest zgodnie z normą PN-B-02171:1988 [4] (obecnie w ankietyzacji jest projekt nowelizacji tej normy prPN-B-02171P). W przypadku projektowania nowych budynków należy korzystać z podanej w tej normie metody oceny na podstawie wartości skutecznej parametru drgań (przyspieszenia lub prędkości) w pasmach 1/3-oktawowych. Wartość skuteczną przyspieszenia lub prędkości drgań wyznacza się z otrzymanego z obliczeń dynamicznych przebiegu drgań na stropie w przedziale czasu określonym jako czas trwania drgań. Czas ten zdefiniowany jest we wspomnianej normie jako czas, w którym podczas występowania zdarzenia opisanego wibrogramem otrzymanym po filtracji sygnału filtrem dolnoprzepustowym o częstotliwości 120 Hz wartości amplitud ocenianego parametru ruchu występujące w tym wibrogramie są większe niż 0,2 wartości maksymalnej (rys. 5). Ocena wykonywana jest niezależnie dla składowej pionowej (wzdłuż osi kręgosłupa) oraz dla poziomych (prostopadłych do osi kręgosłupa) składowych drgań. Polega na porównaniu wartości skutecznych przy-

¹) Normy te w latach 1985 i 1988 zostały opracowane przez zespół pracowników Instytutu Mechaniki Budowli Politechniki Krakowskiej pod kierunkiem prof. dr. hab. inż. Romana Ciesielskiego; prof. dr. hab. inż. Krzysztof Stypuła jest współautorem obu norm.

spieszenia lub prędkości drgań wyznaczonych w poszczególnych pasmach 1/3-oktawowych (w pasmach tercjowych) z podanymi w normie w odniesieniu do tych samych pasm częstotliwości wartościami odpowiadającymi progowi odczuwalności drgań przez ludzi oraz granicom komfortu (zależnym od przeznaczenia pomieszczeń, pory dnia oraz łącznego czasu trwania drgań w ciągu doby).

W rozważanych tu sytuacjach projektowania nowych budynków jako kryterium poprawności zabezpieczenia ludzi w budynku przed drganiami przyjmuje się uzyskanie wartości skutecznych przyspieszenia lub prędkości drgań poniżej progów odczuwalności drgań przez ludzi. Krzywe odpowiadające tym progom w wersji przyspieszeniowej przedstawiono na rys. 6. Innymi słowy, za poprawne pod względem zapewnienia ludziom komfortu wibracyjnego rozwiązania konstrukcyjne należy uznać takie, przy których wskaźnik WODL nie przekroczy wartości 1. 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. WODL wyrażany jest za pomocą dwóch liczb: bezwymiarowej, wyznaczonej w sposób podany wyżej oraz wartości częstotliwości środkowej pasma, w którym ten stosunek wyznaczono.

W szczególnych przypadkach w projektowanym budynku mogą znajdować się urządzenia wrażliwe na drgania, np. serwery, mikroskopy elektronowe, precyzyjne wagi i obrabiarki, urządzenia do nanotechnologii itd. Wpływ drgań na urządzenia umieszczone w budynku ocenia się, uwzględniając kryteria podane przez producenta albo użytkownika urządzenia. Kryteria te zawierają dopuszczalne wartości szczytowych albo skutecznych przemieszczeń, prędkości lub przyspieszeń drgań podstawy urządzenia w określonych pasmach częstotliwości. Ocena polega na porównaniu wartości parametrów drgań podstawy urządzenia uzyskanych z pomiarów albo prognozowanych na podstawie obliczeń z wartościami dopuszczalnymi. Jeśli brak jest takich danych, to ocenę można wykonać na zasadach ogólnych, korzystając z wartości dopuszczalnych podanych w normie PN-B-02170:1985 (obecnie w ankietyzacji jest projekt nowelizacji tej normy prPN-B-02170P).

Sposoby zabezpieczania przed drganiami

Sposoby zabezpieczenia projektowanego budynku przed nadmiernym (ponadnormatywnym) wpływem drgań na ludzi lub wrażliwe na drgania urządzenia są uzależnione od czynników związanych z wymuszeniem (od wielkości wymuszenia i dominujących w nim pasm częstotliwości) oraz od cech projektowanej konstrukcji:

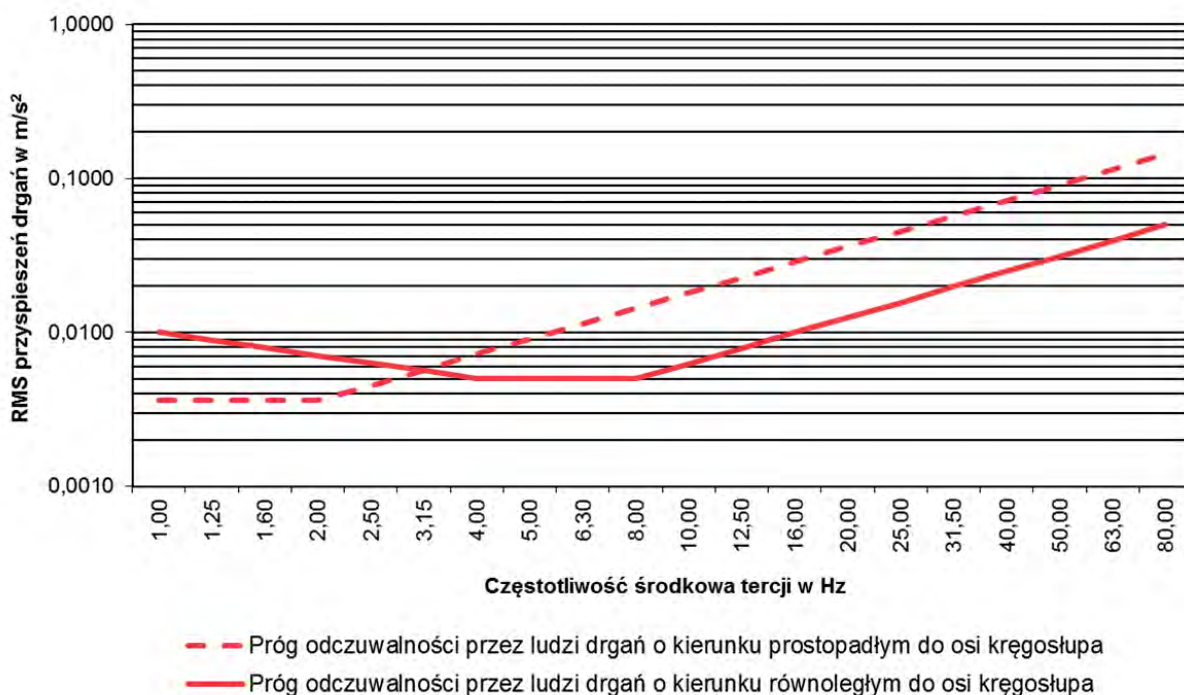
- częstotliwości drgań własnych zarówno całej konstrukcji, jak i jej elementów, w tym szczególnie stropów,
- tłumienia drgań zależnego od użytych materiałów (np. konstrukcja stalowa, żelbetowa itd.) i od rozwiązań konstrukcyjnych.

Upraszczając nieco zagadnienie, można powiedzieć, że wrażliwość konstrukcji na wpływ drgań na ludzi (lub wrażliwe na drgania urządzenia), a co za tym idzie, sposób zabezpieczenia jej przed tym wpływem, zależy m.in. od zastosowanych w konstrukcji materiałów, schematu konstrukcji, jej gabarytów i sztywności, w szczególności od rozpiętości i sztywności płyt stropowych.

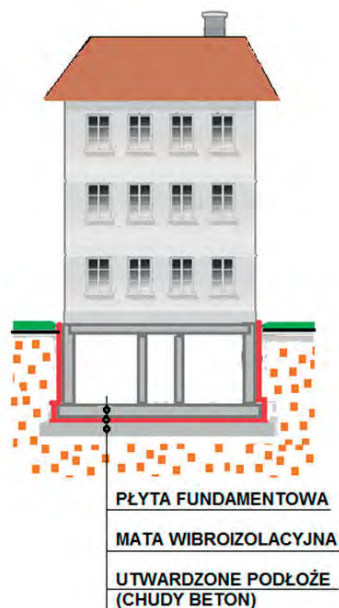
W zależności od wymienionych wyżej czynników możemy stosować następujące sposoby zabezpieczeń:

- zmiana cech dynamicznych konstrukcji, np. przez poprawienie jej sztywności poziomej, jeśli konstrukcja jest zbyt wiotka (zastosowanie ścian usztywniających, zmiana przekrojów słupów lub stopnia ich zbrojenia), zmiana sztywności stropów (np. zmiana grubości i/lub stopnia zbrojenia płyt żelbetowych) itp.,
- wprowadzenie wibroizolacji do konstrukcji budynku, np.
 - zastosowanie mat wibroizolacyjnych na styku między gruntem a konstrukcją budynku (rys. 7),
 - odcięcie części konstrukcji za pomocą wibroizolacji (maty wibroizolacyjne, wibroizolatory sprężynowe lub hybrydowe) od części zagłębionej w gruncie (rys. 8),
- zastosowanie między źródłem drgań a konstrukcją budynku wibroizolacji lub przegrody wibroizolacyjnej (rys. 9, 10 i 11).

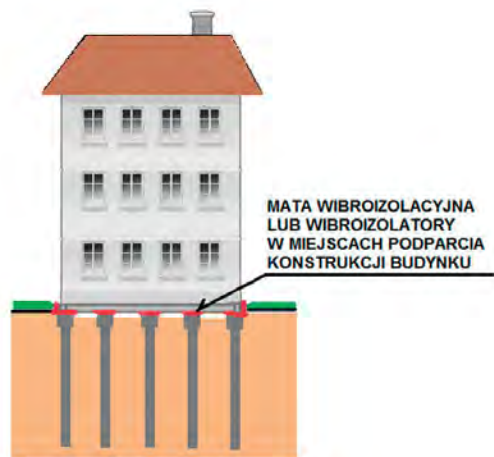
Zaprojektowanie wibroizolacji polega m.in. na takim dobraniu jej parametrów (np. w przypadku mat wibroizolacyjnych trzeba dobrać grubości mat o odpowiednich parametrach sztywności oraz tłumienia), aby uzyskać wymagany efekt (skuteczność wibroizolacyjną) w postaci spełnienia kryterium dopuszczalnego wpływu drgań na ludzi lub urządzenia w budynku.



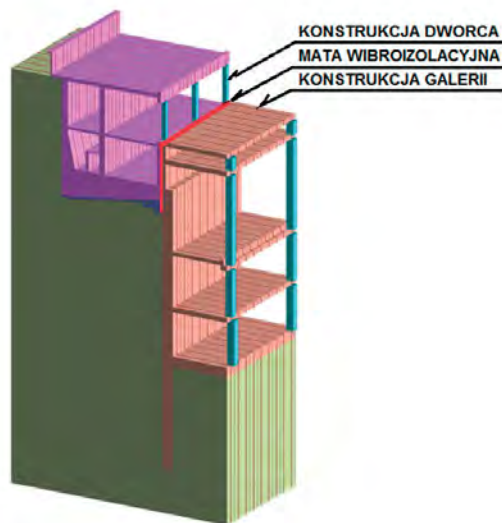
Rys. 6. Progi odczuwalności drgań przez ludzi według PN-B-02171



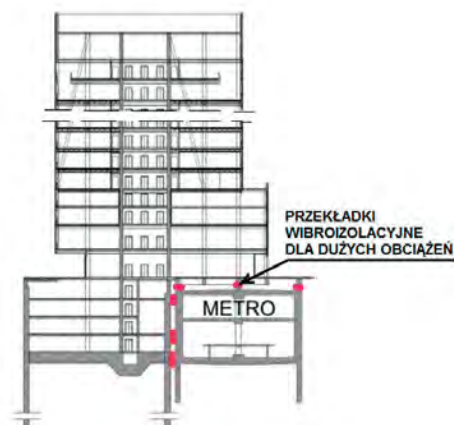
Rys. 7. Schemat zastosowania mat wibroizolacyjnych na styku między gruntem a konstrukcją budynku



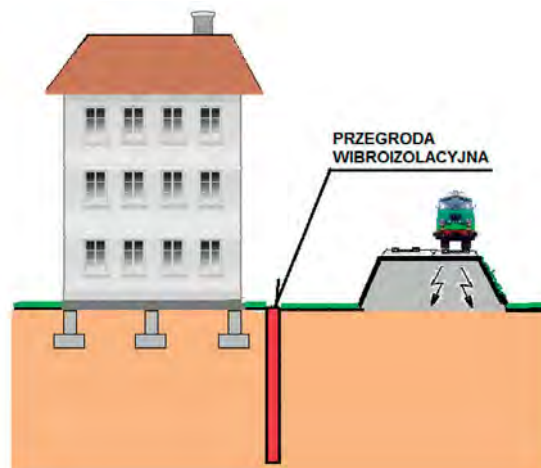
Rys. 8. Schemat odciążenia wibroizolacją części nadziemnej budynku



Rys. 9. Schemat zaprojektowanego przez autorów odciążenia wibroizolacją konstrukcji Galerii Katowickiej od konstrukcji dworca stacji Katowice Osobowa



Rys. 10. Schemat zaprojektowanej przez autorów wibroizolacji w przypadku budynku wysokiego wspartego częściowo na konstrukcji tunelu metra w Warszawie



Rys. 11. Schemat zastosowania przegrody wibroizolacyjnej w gruncie

Zakończenie

Jak przedstawiono powyżej, w praktycznie spotykanych przypadkach możliwe jest takie zaprojektowanie nowych budynków, aby na przyszłość zabezpieczyć je przed nadmiernym wpływem drgań na ich konstrukcję, na przebywających w nich ludzi oraz na ewentualne urządzenia wrażliwe na drgania, jeśli przewiduje się umieszczenie w budynku takich urządzeń. Warunkiem skutecznego zabezpieczenia budynku przed wpływem drgań jest profesjonalne przeprowadzenie analizy propagacji drgań, analizy dynamicznej budynku i jeśli to konieczne, obliczeń symulacyjnych celem odpowiedniego dobrania parametrów wibroizolacji.

Większość niepowodzeń przejawiających się w skargach użytkowników na odczuwanie drgań czy towarzyszący czasem drganiom hałas materiałowy (hałas wtórny) wynika z chęci „zaoszczędzenia” na kosztach analiz, podejmowania się pomiarów drgań i analiz dynamicznych przez osoby nieposiadające doświadczenia w tym zakresie, korzystania z powszechnie dostępnych programów do analizy konstrukcji, które nie są specjalizowane do rozważanych tu zagadnień, a także z pominięcia w niektórych przypadkach nieliniowego czy też falowego charakteru analizowanych zjawisk.

Bibliografia

- [1] Kawecki J., Stypuła K., *Zapewnienie komfortu wibracyjnego ludziom w budynkach narażonych na oddziaływanie komunikacyjne*. Wydawnictwo PK, Kraków 2013.
- [2] Kawecki J., Dulińska J., Koziol K., Stypuła K., Tataro T., *Oddziaływanie parasejsmiczne przekazywane na obiekty budowlane*. Politechnika Krakowska, Kraków 2014.
- [3] PN-B-02170:1985. *Ocena szkodliwości drgań przekazywanych przez podłoże na budynki*.
- [4] PN-B-02171:1988. *Ocena wpływu drgań na ludzi w budynkach*.
- [5] Stypuła K., Koziol K., *Wybrane zagadnienia analizy wpływów dynamicznych na urządzenia wrażliwe na drgania. Aktualne problemy wpływów sejsmicznych i parasejsmicznych na budowlach*. Praca zbiorowa pod red. K. Stypuły. Tom II. Badania wstrząsów górniczych i drgań komunikacyjnych. Monografia 477/2. Politechnika Krakowska, Kraków 2015, s. 67–83.