

# STOSOWANIE POMIARÓW DRGAŃ I OBLICZEŃ SYMULACYJNYCH W RAMACH OCHRONY SĄSIEDNIEJ ZABUDOWY PRZED DRGANIAMI KOLEJOWYMI<sup>1</sup>

---

**Krzysztof Stypuła**

prof. dr hab. inż., Politechnika Krakowska, ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków, tel. 603 175 699, e-mail: kstypula@pk.edu.pl

---

**Krzysztof Kozioł**

dr inż., Politechnika Krakowska, ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków, tel. 665 060 928, e-mail: kkoziol@pk.edu.pl

---

***Streszczenie.** Praca dotyczy zagadnień związanych z wpływem drgań wywołanych ruchem kolejowym na konstrukcję budynków i na ludzi w tych budynkach. Nawiązując do norm PN-B-02170:2016-12 i PN-B-02171:2017-06 omówiono zasady stosowania pomiarów drgań celem oceny tych wpływów. Podano zasięgi stref tych wpływów. Przedstawiono zasady stosowania pomiarów drgań i prognozowania wpływów drgań na podstawie obliczeń symulacyjnych z wykorzystaniem modeli do analiz propagacji drgań w gruncie i modeli budynków do obliczeń dynamicznych. Wskazano algorytm projektowania rozwiązań wibroizolacyjnych z wykorzystaniem obliczeń symulacyjnych. Zasady te odniesiono do dwu sytuacji: budowy lub przebudowy linii kolejowej (wpływ na istniejącą zabudowę) oraz projektowania nowego budynku w sąsiedztwie linii kolejowej.*

***Słowa kluczowe:** drgania kolejowe, ochrona przed drganiami, ochrona środowiska.*

## 1. Wprowadzenie

Jednym z istotnych wpływów jakie, obok hałasu, ruch kolejowy wywiera na środowisko są drgania (wibracje) wywołane przejazdami pociągów. Drgania, generowane na styku kół z szyną, dochodzą poprzez podłoże do sąsiednich budynków wywierając wpływ na:

- konstrukcję budynków,
- na ludzi w budynkach,
- ewentualnie na wrażliwe na drgania urządzenia znajdujące się w budynkach.

Konieczna jest zatem informacja co do sposobów diagnostyki tych wpływów, ich dopuszczalnych poziomów, a także działań w zakresie ochrony jeśli te wpływy są zbyt duże. W działaniach korzysta się z informacji uzyskiwanych z pomiarów drgań oraz z obliczeń symulacyjnych na modelach propagacji drgań przez torowisko i podłoże oraz na modelach do obliczeń dynamicznych budynków. Poniżej podano podstawowe informacje jak i kiedy korzystać z tych narzędzi.

---

<sup>1</sup> Wkład procentowy poszczególnych autorów: Stypuła K.: 50%, Kozioł K.: 50%

Informacje te dotyczą kilku najczęściej spotykanych sytuacji, w których konieczne jest uwzględnienie wpływu drgań na sąsiednią zabudowę:

- ocena wpływu drgań od istniejącej linii kolejowej na istniejącą zabudowę np. na skutek skarg właścicieli lub użytkowników (mieszkańców, pracowników itp.) budynków,
- badania i analizy związane z inwestycjami na liniach kolejowych (modernizacja linii, budowa nowej linii itp.),
- badania i analizy związane z projektowaniem nowych budynków w sąsiedztwie linii kolejowych.

## 2. Pomiary drgań w diagnostyce wpływu drgań na środowisko

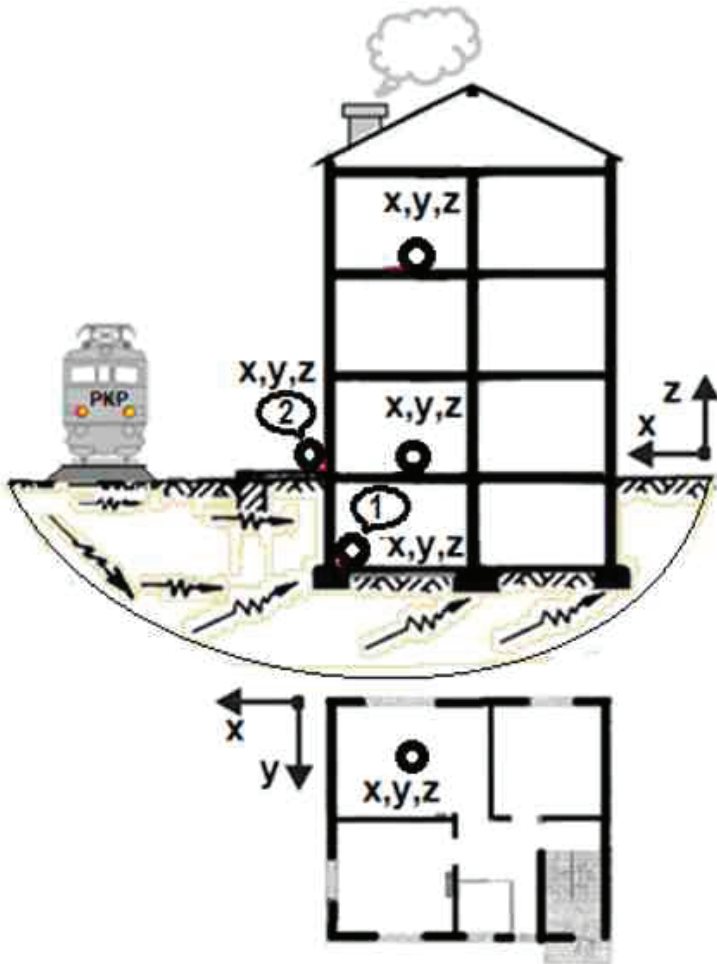
Szczegółowe uregulowania w zakresie wykonywania ocen wpływu drgań na środowisko zawarte są w dwóch polskich normach (opracowanych w Instytucie Mechaniki Budowli Politechniki Krakowskiej):

- 1) PN-B-02170:2016-12. Ocena szkodliwości drgań przekazywanych przez podłoże na budynki [2]. Jest to znowelizowana dawna norma PN-85/B-02170 oznaczana też jako PN-B-02170:1985. Norma ta dotyczy wpływu drgań na konstrukcję budynków oraz na znajdujące się w budynkach urządzenia wrażliwe na drgania.
- 2) PN-B-02171:2017-06. Ocena wpływu drgań na ludzi w budynkach [3]. Jest to znowelizowana dawna norma PN-88/B-02171 oznaczana też jako PN-B-02171:1988. Norma ta dotyczy wpływu drgań na ludzi przebywających w budynkach i odbierających drgania w sposób bierny.

Zgodnie z pierwszą z tych norm, aby ocenić wpływ drgań na konstrukcję budynku należy:

- 1) Wykonać model budynku do obliczeń dynamicznych.
- 2) Przyjąć wymuszenie kinematyczne w jednej z dwu postaci:
  - przyłożonego w miejscach styku gruntu z fundamentem wibrogramu drgań fundamentu otrzymanego z pomiarów (rys. 1) lub z obliczeń symulacyjnych propagacji drgań przy uwzględnieniu funkcji przejścia grunt-budynek,
  - spektrum odpowiedzi.
- 3) Wykonać obliczenia sił dynamicznych działających dodatkowo na konstrukcję na skutek działania drgań.
- 4) Sprawdzić wytrzymałość poszczególnych elementów konstrukcji budynku lub ich wytężenie.

Aby uzyskać wibrogram z pomiarów, należy zarejestrować drgania w sztywnym węźle konstrukcji, znajdującym się od strony źródła drgań na fundamencie budynku, albo na ścianie piwnicznej w poziomie terenu (punkty oznaczone 1 lub 2 na rys. 1). Zakres analizowanego pasma częstotliwości od 0,5 do 100 Hz.



Rys. 1. Rozmieszczenie punktów pomiarowych w celu oceny drgań na konstrukcję budynku (punkty oznaczone 1 lub 2) oraz oceny wpływu drgań na ludzi - punkty na stropach

*Zródło: opracowanie własne*

W odniesieniu do budynków typowych o konstrukcji z elementów murowych (tzn. z elementów przeznaczonych do ręcznego układania) oraz budynków z elementów prefabrykowanych (wielki blok, wielka płyta), posiadających nie więcej niż 5 kondygnacji nadziemnych, stosować można przybliżoną ocenę za pomocą skal SWD (Skala Wpływów Dynamicznych):

- 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.
- 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.

Ocenie skalami SWD podlegają **wyłącznie wartości szczytowe przyspieszenia (lub prędkości) składowych poziomych (x i y) drgań pomierzonych w punkcie 1 lub 2** (rys. 1), otrzymane w 1/3 oktaowych (tercjowych) pasmach częstotliwości.

Zgodnie z normą PN-B-02171:2017, celem oceny wpływu drgań na ludzi w budynkach wykonuje się pomiary wartości skutecznego przyspieszenia lub prędkości drgań wszystkich trzech składowych drgań (x, y, z) w miejscu odbioru drgań przez ludzi tj. na posadzce pomieszczenia, na ogół na środku stropu (rys. 1). W przypadku budynków o kilku kondygnacjach nadziemnych należy w miarę możliwości wykonać co najmniej pomiar na parterze i na najwyższej kondygnacji. W pomiarach należy stosować dysk pomiarowy, do którego mocowane są na sztywno czujniki do pomiaru parametrów drgań w trzech prostopadłych kierunkach. Dysk taki – o średnicy około 30 cm i masie nie mniejszej niż 30 kg (dopuszcza się zastosowanie obciążników w celu osiągnięcia minimalnej zalecanej masy), wsparty na stropie w trzech punktach – należy umieścić w punkcie pomiarowym. Zastosowanie dysku zapewnia spełnienie warunku odbioru drgań odpowiadającego sytuacji przekazywania drgań na człowieka znajdującego się w punkcie pomiarowym.

Podstawową metodą oceny wpływu drgań na ludzi jest ocena **na podstawie wartości skutecznej** parametru (przyspieszenia lub prędkości) drgań w pasmach 1/3 – oktaowych. W normie podano wartości odpowiadające progowi odczuwalności drgań przez ludzi oraz wartości graniczne komfortu wibracyjnego. Otrzymane na podstawie analizy wibrogramu (pomierzonego w miejscu odbioru drgań przez człowieka albo otrzymanego z obliczeń symulacyjnych) wartości skuteczne przyspieszenia (lub prędkości) drgań w pasmach 1/3-oktaowych w analizowanym kierunku drgań, ocenia się w każdym paśmie 1/3-oktaowym o częstotliwości środkowej  $f$  przez porównanie z wartościami dopuszczalnymi (granice komfortu) w tym samym paśmie.

Aby umożliwić weryfikację modelu budynku celem wykonania wiarygodnych obliczeń symulacyjnych (np. w celu prognozowania wpływu drgań na ludzi lub zaprojektowania rozwiązań wibroizolacyjnych) konieczne jest, aby pomiary zarówno wymuszenia kinematycznego, jak i wpływu drgań na ludzi **w danym budynku, zostały wykonane we wszystkich punktach pomiarowych równocześnie.**

Obie normy podają wymagania aparaturowe:

- czułość stosowanych czujników do pomiaru przyspieszeń (akcelerometrów) nie powinna być mniejsza niż  $0,1 \text{ V/ms}^{-2}$  ( $1 \text{ V/g}$ ), przy zalecanej czułości  $1 \text{ V/ms}^{-2}$  ( $10 \text{ V/g}$ ), rozdzielczość zaś – nie gorsza niż  $10^{-4} \text{ ms}^{-2}$  wartości skutecznej sygnału,
- w przypadku geofonów ich czułość nie powinna być mniejsza niż  $15 \text{ V/ms}^{-1}$ ,
- minimalna rejestrowana częstotliwość drgań nie powinna być większa niż  $0,5 \text{ Hz}$ ,

- niepewność standardowa wskazań toru pomiarowego nie powinna być większa niż 20%.

### 3. Zasięg strefy wpływów dynamicznych

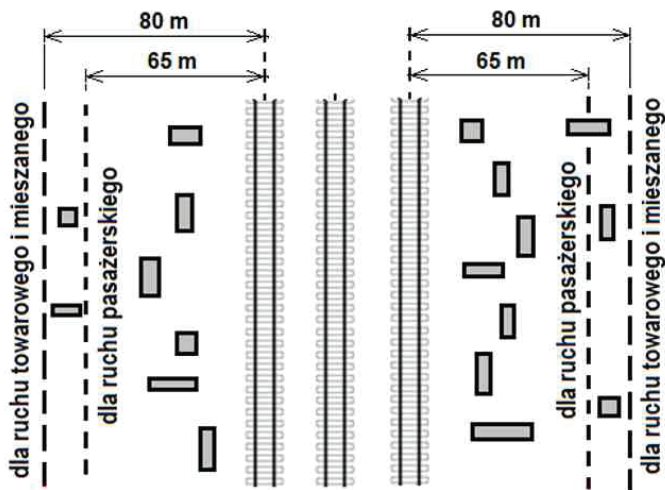
Zarówno w przypadku prac związanych z inwestycjami kolejowymi (budowa lub przebudowa czy modernizacja linii kolejowych) jak i inwestycji polegających na budowie nowych budynków w sąsiedztwie linii kolejowych, podstawową informacją jest określenie odległości od torów, do której należy rozważać wpływ drgań na sąsiednią zabudowę czyli tzw. zasięg strefy wpływów dynamicznych.

W pierwszym przypadku prowadzenia inwestycji kolejowych zasięg stref wpływów dynamicznych od eksploatacji przyszłej inwestycji powinien zostać określony już na etapie przygotowania ocen oddziaływania inwestycji na środowisko. Od tego zasięgu zależy bowiem ustalenie, jaka jest liczba budynków, które mogą być narażone na wpływ drgań kolejowych, a co za tym idzie, określenie rozmiaru dalszych działań.

Orientacyjne wartości zasięgu stref wpływów drgań kolejowych odnoszące się do średnich warunków gruntowych oraz do budynków o typowej (prawidłowej) konstrukcji podano poniżej w tabeli 1 oraz na rys. 2.

Tabela 1. Zasięg stref wpływu drgań kolejowych na sąsiednią zabudowę

Ruch kolejowy generujący drgania	Zasięg strefy od osi najbliższego toru linii kolejowej	
	Z uwagi na wpływ drgań na konstrukcję budynku	Z uwagi na wpływ drgań na ludzi w budynku
1	2	3
Ruch pasażerski	35 m	65 m
Ruch towarowy oraz mieszany	45 m	80 m



Rys. 2. Granice stref wpływów dynamicznych drgań kolejowych

Zródło: opracowanie własne

Jak wynika z tabeli 1 w odniesieniu do budynków nie przeznaczonych na stały pobyt ludzi, takich jak zabudowania gospodarcze, garaże, wiaty, hale, magazyny itp., w których rozważany jest jedynie wpływ na ich konstrukcję wystarczy brać pod uwagę obiekty położone w odległości mniejszej niż 35 m od osi toru z ruchem wyłącznie pasażerskim lub 45 m od osi toru z ruchem towarowym lub mieszanym. W przypadku budynków przeznaczonych na stały pobyt ludzi, w których istotny jest wpływ drgań na ludzi, odległości te wynoszą odpowiednio 65 m i 80 m.

W sporadycznych przypadkach budynków o słabej konstrukcji lub niekorzystnych warunków gruntowych (np. wysokiego stanu wód gruntowych) może się zdarzyć, że nadmierny wpływ drgań na ludzi wystąpi w odległości większej np. do ok. 120 m od osi linii z ciężkim ruchem towarowym.

#### 4. Badania i analizy związane z inwestycjami na liniach kolejowych

W przypadku budowy lub przebudowy (modernizacji) linii kolejowej wyróżnić można trzy rodzaje prac dotyczących wpływu drgań na sąsiednią zabudowę:

- przedrealizacyjne pomiary drgań,
- obliczenia symulacyjne,
- porealizacyjne pomiary drgań.

Wstępem do tych prac powinno być wytypowanie budynków reprezentatywnych spośród wszystkich budynków znajdujących się w strefie wpływów dynamicznych linii kolejowej. Przy wyborze budynków reprezentatywnych bierze się pod uwagę:

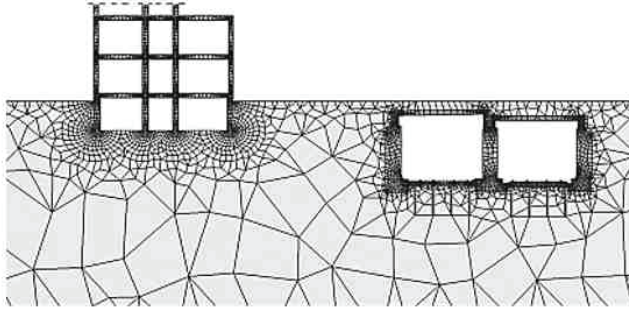
- usytuowanie budynków względem źródeł drgań (odległości od torów, ustawienie podłużne lub poprzeczne w stosunku do toru),
- typy konstrukcji budynków, ich stan techniczny i cechy dynamiczne,
- ich reprezentatywność dla całych grup sąsiednich obiektów,
- warunki propagacji drgań (budowa podłoża, poziom wód gruntowych, itp.),
- ukształtowanie przekroju drogi kolejowej (na nasypie, w przekopie) oraz typy konstrukcji nawierzchni kolejowej,
- dostępność dokumentacji budowlanej budynku lub możliwość inwentaryzacji jego konstrukcji,
- archiwalne materiały pomiarowe,
- możliwość dostępu do budynków i pomieszczeń celem wykonania pomiarów.

Przedrealizacyjne pomiary drgań powinny być wykonane na etapie projektowania inwestycji (w ramach oceny oddziaływania na środowisko lub projektu budowlanego) i mają na celu:

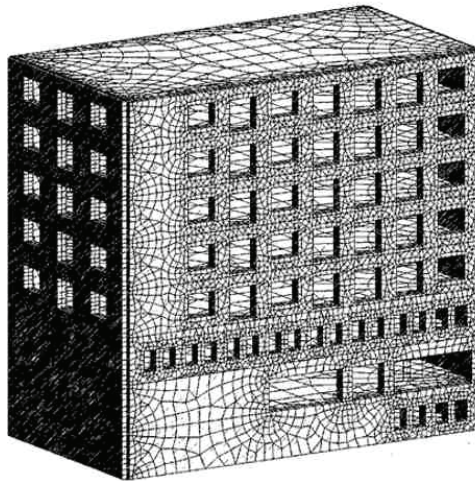
- zbadanie tła dynamicznego, czyli określenie poziomu wpływu drgań na budynki reprezentatywne i na ludzi w tych budynkach przed realizacją inwestycji, czyli z dotychczasowych źródeł drgań,

- dostarczenie informacji o reakcji konstrukcji poszczególnych budynków na drgania i danych do weryfikacji poprawności ich modeli obliczeniowych, które będą służyły do prognozowania wpływu drgań kolejowych po realizacji inwestycji,
- w sytuacji przebudowy (modernizacji) lub rozbudowy istniejącej linii kolejowej bez przewidzianych zmian w ruchu kolejowym (zmian prędkości oraz rodzaju ruchu z pasażerskiego na mieszany lub towarowy) pomiary przedrealizacyjne mogą dać bezpośrednio odpowiedź w przypadku których budynków należy ograniczyć poziom drgań (np. przez zastosowanie rozwiązań wibroizolacyjnych).

Następnym etapem prac jest wykonanie prognozy wpływu drgań na konstrukcję budynków reprezentatywnych i na ludzi w tych budynkach dla projektowanego rozwiązania linii kolejowej. Podstawą prognozy są obliczenia symulacyjne przy zastosowaniu modelu do analizy propagacji drgań od torów do budynku (rys. 3) oraz modelu do obliczeń dynamicznych konstrukcji budynku (rys. 4).

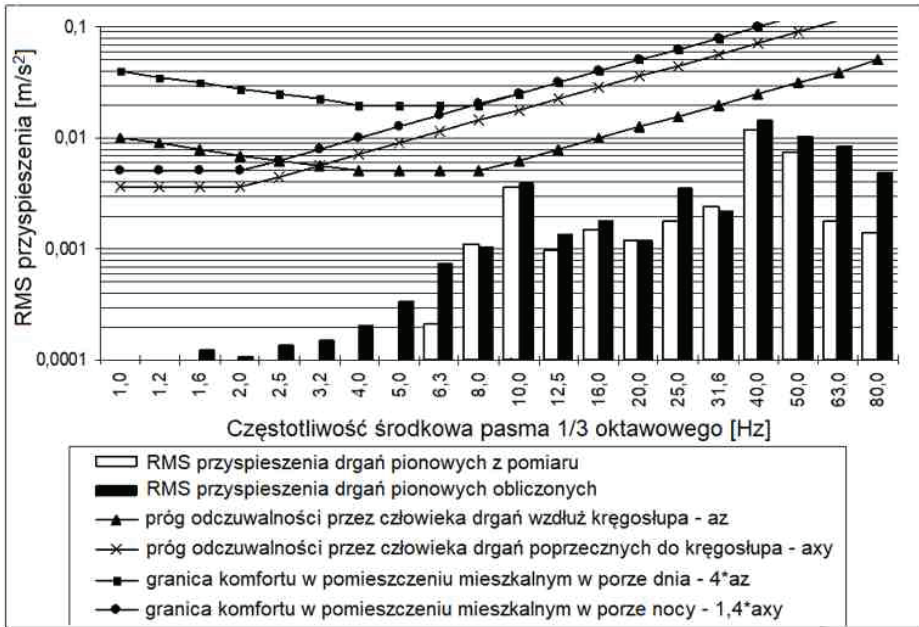


Rys. 3. Przykładowy model MES do analizy propagacji drgań z tunelu kolejowego do budynku  
Źródło: {1}



Rys. 4. Przykładowy model MES budynku do obliczeń dynamicznych  
Źródło: opracowanie własne

Model obliczeniowy budynku powinien zostać zweryfikowany przez porównanie dla tego samego wibrogramu pomierzonego wymuszenia kinematycznego, wyników analizy wpływu drgań na ludzi uzyskanej z pomiaru i z obliczeń symulacyjnych na modelu budynku (rys. 5).



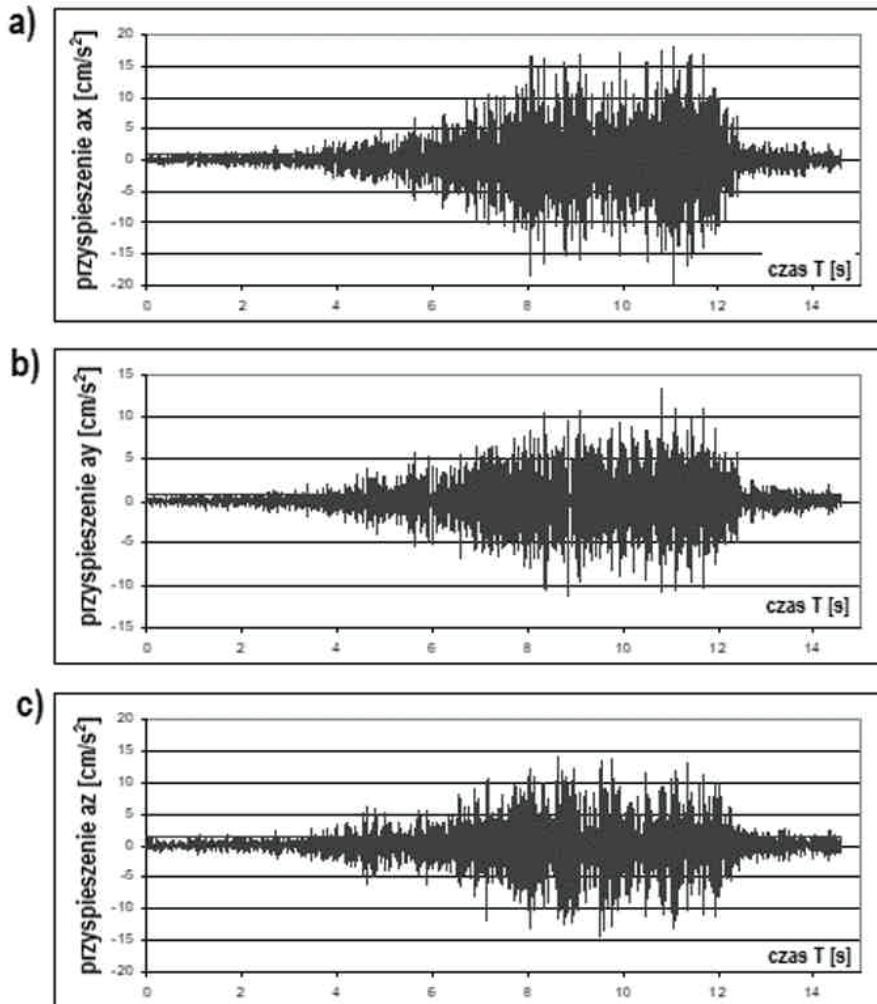
Rys. 5. Przykład weryfikacji modelu przez porównanie wyników analizy wibrogramów uzyskanych jako rezultat pomiarów oraz obliczeń w tym samym punkcie na posadzce piętra budynku dla tego samego przejazdu pociągu

Zródło: opracowanie własne

Następnie, korzystając z modelu do analizy propagacji drgań, określa się prognozowane wibrogramy drgań fundamentu budynku (rys. 6). Po ich przyłożeniu do stykających się z gruntem węzłów modelu budynku i wykonaniu obliczeń dynamicznych (całkowaniu równań ruchu), otrzymuje się prognozowane wibrogramy drgań we wszystkich węzłach modelu. Wibrogramy te służą do określenia prognozowanego wpływu drgań na elementy budynku, a wibrogramy drgań węzłów posadzki także do określenia prognozowanego wpływu drgań na ludzi.

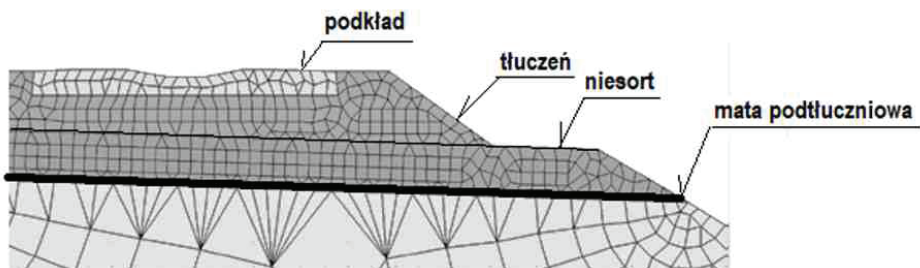
Jeżeli z prognozy wynikają przekroczenia wpływów drgań, przy czym najczęściej będą to przekroczenia granic komfortu w zakresie wpływu drgań na ludzi w budynkach, to należy przejść do kolejnego etapu, którym jest zaprojektowanie rozwiązań wibroizolacyjnych. W tym celu do modelu propagacji wprowadza się proponowane rozwiązanie (rys. 7) i prognozuje się wpływ drgań jaki będzie po zastosowaniu tego rozwiązania. Parametry rozwiązania (np. sztywności i grubości mat wibroizolacyjnych) dobiera się tak długo (rys. 8), aż prognoza wykaże spełnienie wymagań normowych w zakresie wpływu drgań na budynki i ludzi w budynkach.





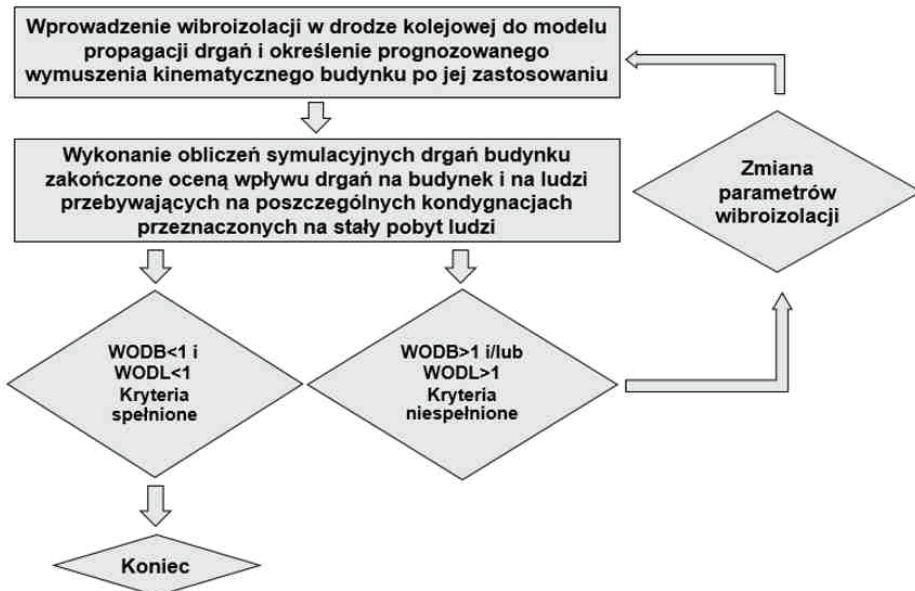
Rys. 6. Przykładowe prognozowane wibrogramy przyspieszeń drgań fundamentu budynku spowodowanych przejazdem pociągu: a) składowa pozioma x prostopadła do torów, b) składowa pozioma y równoległa do torów, c) składowa pionowa z

Źródło: opracowanie własne



Rys. 7. Przykładowy fragment modelu do analizy propagacji z uwzględnieniem maty podtłuczniowej

Źródło: {1}



Rys. 8. Algorytm projektowania rozwiązania wibroizolacyjnego: WODB - Wskaźnik Odczuwalności Drgań przez Budynek wg PN-B-02170:2016, WODL – Wskaźnik Odczuwalności Drgań przez Ludzi wg PN-B-02171:2017

Źródło: opracowanie własne

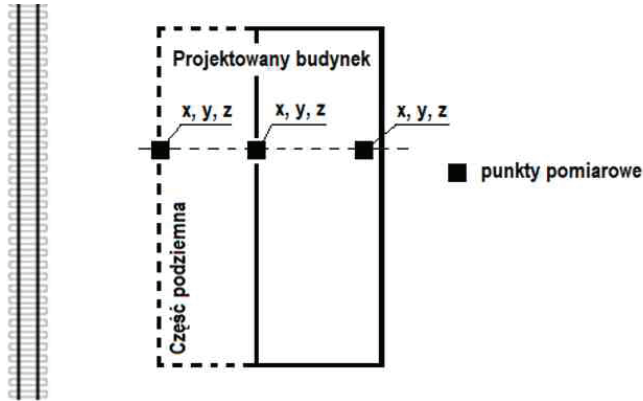
## 5. Badania i analizy związane z projektowaniem budynków w sąsiedztwie linii kolejowych

W przypadku projektowania budynku w sąsiedztwie linii kolejowej należy w pierwszej kolejności sprawdzić, czy budynek znajdzie się w strefie wpływów drgań kolejowych o zasięgu podanym w tabeli 1. Jeśli tak, to należy kolejno wykonać następujące prace:

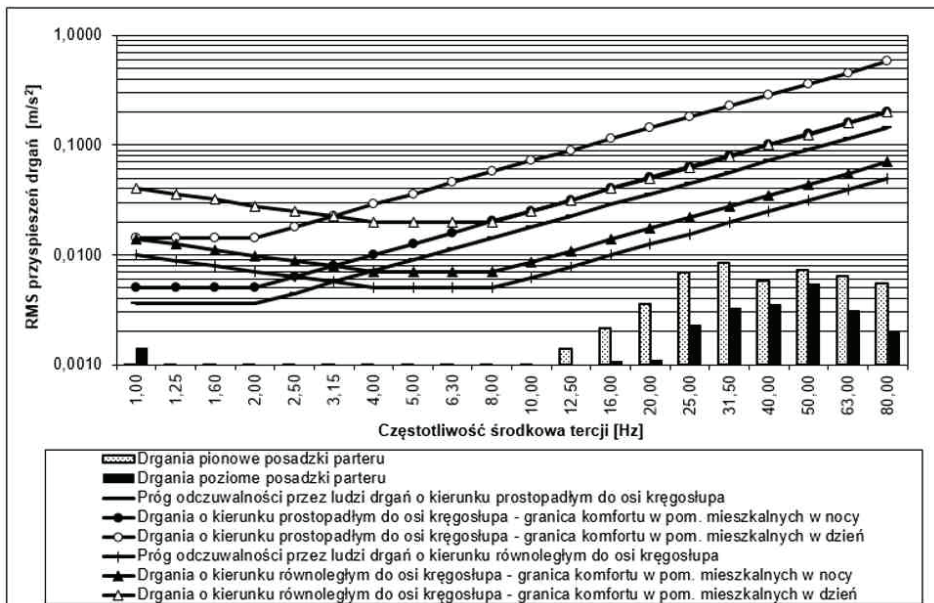
- pomiary drgań gruntu w miejscu przyszłego posadowienia budynku, powinien to być równoczesny pomiar co najmniej w trzech punktach tworzących profil pomiarowy (rys. 9),
- opracować prognozowane wymuszenie kinematyczne tj. na podstawie zarejestrowanych wibrogramów drgań gruntu oraz ewentualnie wibrogramów z bazy danych pomiarowych opracować prognozowane wibrogramy drgań fundamentu budynku (jak na rys. 6); należy przy tym uwzględnić funkcję przejścia drgań (w tym redukcję drgań) na styku grunt-fundament,
- wykonać obliczenia dynamiczne budynku zakończone określeniem sił dynamicznych (sił bezwładności) w poszczególnych elementach konstrukcji budynku oraz prognozą wpływu drgań na ludzi na poszczególnych kondygnacjach przeznaczonych na stały pobyt ludzi (rys. 10).

Wyliczone siły dynamiczne powinien projektant uwzględnić w projekcie konstrukcji jako obciążenie dodatkowe (ze współczynnikiem obciążenia  $\gamma_f = \varphi_M = 1,5$ ) w odpowiednich kombinacjach z innymi obciążeniami.

Jeżeli wyniki analizy wpływu drgań na ludzi na wszystkich kondygnacjach spełniają założone kryterium, czyli znajdują się poniżej progu odczuwalności drgań przez ludzi ( $WODL < 1,0$ ), jak to przedstawiono przykładowo na rys. 10, to ochrona ludzi w budynku przed drganiami jest wystarczająca. W przeciwnym razie należy wprowadzić do konstrukcji budynku zmiany, które zmniejszą wpływ drgań na ludzi do wymaganego poziomu.



Rys. 9. Przykładowe rozmieszczenie punktów pomiarowych  
Źródło: opracowanie własne



Rys. 10. Przykładowe wyniki prognozy wpływu drgań na ludzi na kondygnacji Y budynku  
Źródło: opracowanie własne

## 6. Podsumowanie

Prawidłowe przeprowadzenie pomiarów drgań, a potem obliczeń symulacyjnych, jest istotnym elementem ochrony budynków i ludzi w budynkach przed nadmiernym wpływem drgań kolejowych. Działania te w przypadku inwestycji kolejowych powinny być sygnalizowane już na etapie sporządzania ocen oddziaływania na środowisko. Wówczas mają szansę trafić do decyzji środowiskowej, a następnie do dokumentów przetargowych na projektowanie i budowę danej inwestycji. Brak takich zapisów może skutkować potem brakiem środków na sfinansowanie tych prac, a często także na wykonanie rozwiązań chroniących przed drganiami.

## Bibliografia

- [1] Kawecki, J., Stypuła, K., Zapewnienie komfortu wibracyjnego ludziom w budynkach narażonych na oddziaływania komunikacyjne, Wydawnictwo PK, Kraków, 2013.
- [2] PN-B-02170:2016-12. Ocena szkodliwości drgań przekazywanych przez podłoże na budynki.
- [3] PN-B-02171:2017-06. Ocena wpływu drgań na ludzi w budynkach.