

Oddziaływanie kolei dużych prędkości na środowisko.

Część 2: Drgania

Krzysztof POLAK¹

Streszczenie

W artykule opisano zagadnienia związane z oddziaływaniem drgań generowanych przez koleje dużych prędkości na środowisko. Wskazano najważniejsze regulacje prawne z zakresu oddziaływań drgań na budynki i ludzi w nich przebywających, a także scharakteryzowano ich główne źródła pochodzące z kolei dużych prędkości. Określono negatywny wpływ drgań na poszczególne elementy otoczenia/środowiska (człowiek, budynki, zwierzęta) w fazie budowy, eksploatacji oraz likwidacji kolei dużych prędkości. Wskazano najczęściej stosowane sposoby minimalizujące ten rodzaj oddziaływań.

Słowa kluczowe: drgania, kolej dużych prędkości, oddziaływanie kolei dużych prędkości na środowisko

1. Wstęp

W pierwszej części cyklu artykułów dotyczących wpływu kolei dużych prędkości na środowisko opisano zagadnienia związane z oddziaływaniami akustycznymi generowanymi przez koleje dużych prędkości [1]. Wskazano najważniejsze regulacje prawne z zakresu hałasu w transporcie kolejowym oraz opisano główne źródła hałasu generowanego przez linie kolejowe dużych prędkości. Określono negatywne oddziaływania akustyczne na poszczególne elementy środowiska na każdym etapie funkcjonowania kolei dużych prędkości, jak również scharakteryzowano najczęściej stosowane rozwiązania minimalizujące.

Część druga jest próbą scharakteryzowania najważniejszych zagadnień związanych z oddziaływaniem drgań na środowisko, powstających wskutek funkcjonowania kolei dużych prędkości. Omówione zostały najważniejsze przepisy prawne z zakresu oddziaływania drgań, źródła ich powstawania oraz sposoby minimalizacji.

2. Ocena wpływu drgań na środowisko w przepisach

Kraje europejskie na ogół nie mają kompleksowych przepisów prawnych, które regulowałyby emisję drgań pochodzących z transportu kolejowego/

szynowego. Dostępne dokumenty, które są oparte na wielu normach krajowych i zagranicznych, definiują jedynie procedury i oceny emisji drgań generowanych przez linię i pojazd kolejowy [2].

Na poziomie europejskim zagadnienia ograniczania negatywnego oddziaływania drgań z transportu kolejowego zostały lakonicznie określone w Dyrektywie Komisji Parlamentu Europejskiego i Rady Unii Europejskiej (UE) 2016/797 z dnia 11 maja 2016 r. w sprawie interoperacyjności systemu kolei we Wspólnocie [3]. Dokument ten wskazuje jedynie, że funkcjonowanie systemu kolei nie może powodować przekroczenia niedopuszczalnego poziomu drgań gruntu w pobliżu infrastruktury.

W polskim ustawodawstwie ogólne przepisy odnoszące się do emisji zanieczyszczeń środowiska, w tym m.in. wibracji zostały określone w ustawie Prawo ochrony środowiska [4]. Ustawa ta określa m.in. konieczność ponoszenia kosztów usunięcia skutków zanieczyszczeń środowiska przez podmiot powodujący te zanieczyszczenia, a także nakłada obowiązek na podmiocie podejmującym działalność (której negatywne oddziaływania na środowisko nie jest jeszcze rozpoznane), podjęcia wszelkich możliwych środków minimalizujących ten wpływ.

Krajowe przepisy określają również wymagania dotyczące lokalizowania nowo budowanych budynków w sąsiedztwie linii kolejowych, definiując pośrednio zasięg strefy wpływu drgań kolejowych na środowisko. Kwestie te są zawarte w ustawie o transporcie

¹ Dr; Instytut Kolejnictwa, Zakład Dróg Kolejowych i Przewozów; e-mail: Kpolak@ikolej.

kolejowym [5] oraz w akcie wykonawczym – w Rozporządzeniu Ministra Infrastruktury z dnia 7 sierpnia 2008 r. w sprawie wymagań w zakresie odległości i warunków dopuszczających usytuowanie drzew i krzewów, elementów ochrony akustycznej i wykonywania robót ziemnych w sąsiedztwie linii kolejowej, a także sposobu urządzania i utrzymywania zasłon odśnieżnych oraz pasów przeciwpożarowych [6].

Z zapisów tych aktów wynika, że budowle i budynki mogą być usytuowane w odległości nie mniejszej niż 10 m od granicy obszaru kolejowego, z tym, że odległość ta od osi skrajnego toru nie może być mniejsza niż 20 m, z wyjątkiem budowli i budynków przeznaczonych do prowadzenia ruchu kolejowego, utrzymania linii kolejowej oraz do obsługi przewozu osób i rzeczy.

Konieczność uwzględniania wpływu drgań wynika również z zapisów Rozporządzenia Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie [7]. Dokument ten [7] określa, że (...) 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 (...). Do uciążliwości, o których mowa zalicza się m.in. drgania (wibracje).

Rozporządzenie precyzuje również wymagania dotyczące uwzględniania drgań dochodzących z zewnątrz (np. od linii kolejowej) do budynku, który należy sytuować w miejscach najmniej narażonych na występowanie hałasu i drgań. W przypadku, kiedy ich występowanie będzie powodowało przekroczenia dopuszczalnych poziomów, należy stosować skuteczne zabezpieczenia [7]. Dodatkowo, budynki z pomieszczeniami wymagającymi ochrony przed zewnętrznymi drganiami należy chronić przez zachowanie odpowiednich odległości od źródeł tych uciążliwości, odpowiednie usytuowanie i ukształtowanie budynku, racjonalne rozmieszczenie pomieszczeń oraz stosowanie elementów amortyzujących drgania [8].

Najważniejsze zasady i kryteria ocen oddziaływań drgań na budynki i ludzi w budynkach oraz wytyczne dotyczące realizacji pomiarów i analiz służących weryfikacji poziomu drgań, zostały określone w dwóch polskich normach:

- PN-B-02170:2016: Ocena szkodliwości drgań przekazywanych przez podłoże na budynki [9],
- PN-B-02171:2017: Ocena wpływu drgań na ludzi w budynkach [10].

Do wymienionych norm odwołują się zapisy Rozporządzenia [7], które zostały opisane we wcześniejszej części niniejszego rozdziału, co jednoznacznie wskazuje, że ocenę drgań na budynki i na ludzi w budynkach należy dokonywać zgodnie z wymienionymi dokumentami [11].

Norma PN-B-02170:2016 [9] dopuszcza dwa sposoby przeprowadzania oceny wpływu drgań na konstrukcję budynku:

- ocenę pełną, którą można zastosować w odniesieniu do każdego typu budynku,
- ocenę przybliżoną, stosowaną jedynie do najczęściej spotykanych klas budynków.

Aby dokonać pełnej oceny należy:

- wykonać model budynku do obliczeń dynamicznych,
- przyjąć wymuszenie kinematyczne za pomocą pomierzonych lub prognozowanych na podstawie pomiarów drgań fundamentów,
- przeprowadzić obliczenia sił dynamicznych działających dodatkowo na konstrukcję budynku w wyniku działania drgań,
- zweryfikować wytrzymałość poszczególnych elementów konstrukcji budynków lub ich wyłączenie [12].

W przypadku budynków z elementów prefabrykowanych (wielkopłytowych, wielkoblokowych), posiadających nie więcej niż 5 kondygnacji nadziemnych oraz budynków o konstrukcji z elementów przeznaczonych do ręcznego układania (cegła, pustak) można stosować przybliżoną ocenę. Polega ona na określeniu skal wpływów dynamicznych (SWD):

- SDW-I – stosowana do budynków o kształcie zwartym o wymiarach zewnętrznego rzutu poziomego nieprzekraczającym 15 m, jedno- lub dwukondygnacyjnych, których wysokość nie przekracza żadnego z wymiarów rzutu poziomego,
- SDW-II – stosowana do budynków o maksymalnej wysokości do 5 kondygnacji, których wysokość jest mniejsza od podwójnej najmniejszej szerokości budynku, a także do budynków do 2 kondygnacji, które nie spełniają warunków określonych dla SDW-I [12, 13].

Norma [9] określa również warunki pominięcia oceny wpływu drgań na konstrukcję budynku, jeżeli amplituda przyspieszeń ruchu poziomego podłoża w miejscu posadowienia budynku spełnia warunek:

$$a_p \leq 0,05 \quad (1)$$

gdzie: a_p – wartość szczytowa przyspieszenia drgań podłoża stanowiących wyłączenie kinematyczne budynku [m/s^2].

Na podstawie zależności (1) przyjmuje się, że w obliczeniach projektowych można pominąć oddziaływanie drgań na budynek jeżeli znajduje się on w odległości większej niż 25 m od osi toru kolejowego. Powyższy warunek odnosi się jedynie do wpływu tego czynnika na konstrukcję budynku. Nie uwzględnia on wpływu drgań na ludzi przebywających w tych budynkach ani na urządzenia wrażliwe (np. serwery) [8].

Ocena wpływu drgań na ludzi przebywających w budynkach została zdefiniowana w normie [10]. Określa ona dopuszczalne wartości drgań zapewniające wymagany komfort w różnych warunkach przebywania ludzi w pomieszczeniach mieszkalnych, warsztatach pracy, biurach oraz w pomieszczeniach o specjalnym przeznaczeniu (np. szpitale). Norma wprowadza dwie metody, na podstawie których należy określić wpływ drgań na ludzi przebywających w budynkach. W obydwu metodach ocenie podlegają drgania w pasmach 1/3 oktaawowych mieszczące się w zakresie częstotliwości od 1 Hz do 80 Hz [14, 15].

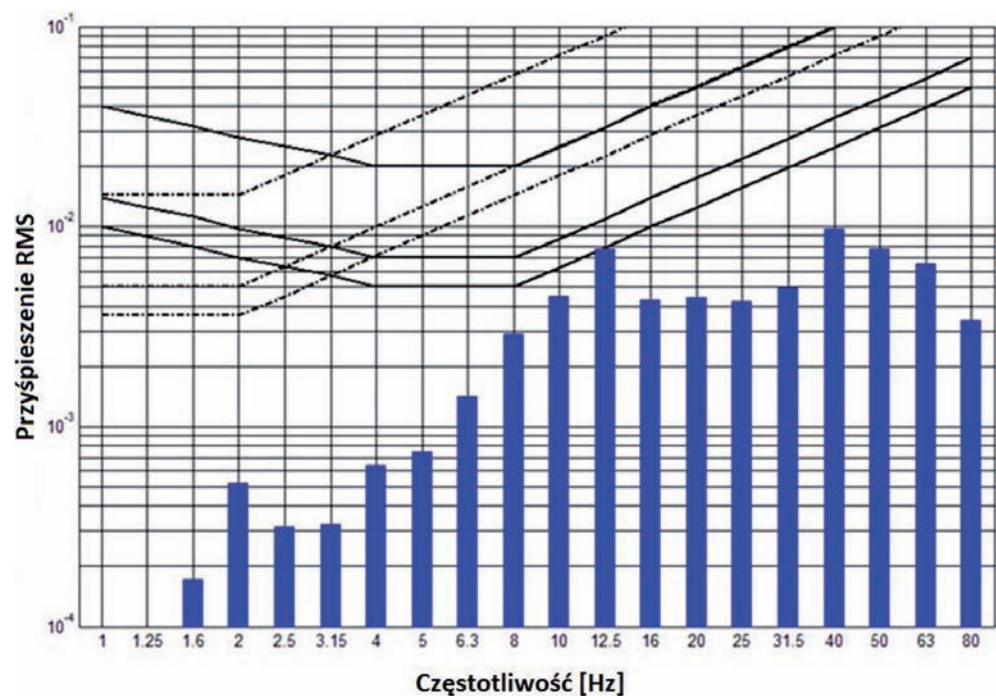
Pierwszy sposób oceny wpływu drgań na ludzi przebywających w budynkach opiera się na pomiarze wartości skorygowanej przyspieszenia (lub prędkości) drgań w całym paśmie częstotliwości. Skorygowanie polega na wprowadzeniu do toru pomiarowego filtra korekcyjnego, czego rezultatem jest uzyskana skorygowana wartość skuteczna przyspieszenia (lub prędkości). Norma [10] określa próg odczuwalności przez człowieka tego parametru, którego wartość równa przyspieszeniu wzdłuż osi z (wzdłuż osi kręgosłupa) wynosi $0,005 \text{ m/s}^2$, wzdłuż osi x, y zaś (tj. prostopadłe do osi kręgosłupa) wynosi

$0,00036 \text{ m/s}^2$. Metoda ta jest stosunkowo prosta, ale jednocześnie uboga w informacje. W przypadku przekroczenia dopuszczalnych poziomów w zakresie komfortu drganiowego ludzi przebywających w budynkach nie uzyskuje się informacji o paśmie częstotliwości, w którym nastąpiło przekroczenie, co w dalszej kolejności uniemożliwia odpowiednie dobranie rozwiązań redukujących drgania [16].

Kolejną metodą określoną w normie [10] jest widmo wartości skutecznej (RMS – *Root Mean Square*) przyspieszenia (lub prędkości) drgań. Do oceny komfortu wibracyjnego ludzi należy skorzystać z odpowiednich nomogramów, które zostały wyrażone w układzie współrzędnych (niezależnie dla kierunku pionowego z i kierunków poziomych: x, y):

- oś pionowa: wartość skuteczna amplitudy przyspieszenia (prędkości),
- oś pozioma – częstotliwość drgań.

Najniżej położoną linię łamaną należy traktować jako próg odczuwalności drgań przez człowieka. Wartości drgań zawierających się w zbiorze poniżej tej linii określane są jako nieodczuwalne dla człowieka, wartości powyżej zaś odpowiadają krotności wartości progu odczuwalności. Najczęściej stosowanym sposobem przeprowadzania oceny jest nanoszenie wyników dla poszczególnych częstotliwości środkowych pasm tercjowych, w postaci słupków na nomogramy. Poniżej przedstawiono przykładowy wykres porównania wyników metody widma wartości skutecznej (RMS) z poziomami dopuszczalnymi (rys. 1).



Rys. 1. Przykładowy wynik oceny drgań metodą widma wartości skutecznej (RMS) [17]

3. Główne źródła drgań

Na poziom drgań (oraz ich częstotliwość) generowanych podczas przejazdów pojazdów kolejowych dużych prędkości wpływa wiele czynników. Do najważniejszych należy zaliczyć stan techniczny pojazdu, jego prędkość, rodzaj i stan nawierzchni, podłoże (grunt), jak również odległość i lokalizację obiektu, na który oddziałują drgania, rodzaj i stan obiektu, a także rodzaj zastosowanych zabezpieczeń antywiбраcyjnych [18].

Źródłem drgań pochodzących od przejeżdżającego pojazdu kolejowego mogą być urządzenia pomocnicze, kompresory, sprężarki (klimatyzacji), niewyważone masy wirujące obracających się elementów w pojazdach (wirnik silnika) [19], a także sieć jezdną (w wyniku współpracy z pantografem) [20]. Jednakże najważniejszym źródłem drgań odpowiedzialnym za negatywny wpływ na budynki oraz ludzi w nich przebywających są zjawiska dynamiczne, określone jako zmienne w czasie wzbudzenia siłowe w miejscu styku koła z szyną [21].

W przypadku zjawisk zachodzących na styku koła z szyną możemy wyróżnić trzy główne czynniki generujące te procesy drganiowe:

- dynamiczne oddziaływania zależne od nierówności powierzchni tocznych,
- przenoszenie obciążeń quasi-statycznych poszczególnych zestawów kołowych w miejscu styku wzdłuż toru,
- nieregularności powierzchni tocznych koła i/lub szyny (np. łączenia szyn, rozjazdy, krzyżownice, płaskie miejsca, nalepy [22]).

Dodatkowe czynniki wzmacniające drgania na styku powierzchni tocznych występują na łuku poziomym toru i wynikają z występowania chwilowych poprzecznych sił. Wyróżnia się trzy główne mechanizmy wzbudzania dodatkowych drgań:

- wpływy boczne pomiędzy górną częścią głowki szyny a powierzchnią toczną koła,
- tarcie obrzeża koła o boczną część głowki szyny,
- wzdłużny przesuw wynikający z różnic poślizgu powierzchni tocznej koła i szyny [23].

Wszystkie wymienione zjawiska generują drgania w zakresie niskich i średnich częstotliwości. Drgania generowane przez pojazd kolejowy są funkcją jego prędkości oraz długości fal nieregularności, które następnie są emitowane przez tor w postaci fali do otoczenia [19]. Specyfika oddziaływania drgań od pojazdów kolejowych charakteryzowana jest głównie w postaci parasejsmicznych fal powierzchniowych: Rayleigh'a oraz Love'a [24–26].

Fala podłużna (Love'a) rozchodzi się ze znaczną prędkością co sprawia, że szybko zanika wraz ze

wzrostem odległości. Natomiast zawierająca zarówno ruch pionowy jak i promieniowy fala Rayleigh'a, charakteryzuje się kombinacją kompresji wzdłużnej i dyatacji, a także eliptycznym przemieszczeniem powierzchni w płaszczyźnie pionowej w kierunku rozchodzenia się fali. Ze względu na małą prędkość i dużą energię, fala Rayleigh'a maleje proporcjonalnie do pierwiastka kwadratowego z odległości. Ten rodzaj fali powierzchniowej, niosący za sobą około 70% energii całej fali jest głównym czynnikiem drgań generowanych do otoczenia [19, 27, 28].

4. Wpływ drgań na ludzi oraz budynki

Drgania generowane przez transport kolejowy wywoływane są działalnością eksploatacyjną człowieka. Podczas określania wpływu drgań na budynek lub ludzi w nim przebywających należy wziąć pod uwagę następujące aspekty:

- źródło (rodzaj, częstotliwość występowania),
- drogę propagacji (rodzaj podłoża, odległość, ścieżkę propagacji),
- sposób odbioru drgań (czas ekspozycji, kierunek odbioru, zjawiska kontaktu),
- ocena wpływu drgań (dawka drgań, dopuszczalne progi) [14].

Analiza wpływu drgań odbieranych przez budynki i ludzi w nich przebywających powinna zawierać również zestaw ankietowych kryteriów informacyjnych odnoszących się do badanych elementów. Warto przeanalizować czy drgania są kontrolowane lub zależne, jaka jest ich ciągłość i regularność występowania, jaki jest czas ekspozycji, zakres częstotliwości i amplitud, a także charakterystykę źródła drgań oraz obiektu (stan techniczny, sposób posadowienia, właściwości dynamiczne, rozkład ustrojów usztywniających) [14].

Jak wspomniano we wcześniejszych rozdziałach, poziom uciążliwości drgań uzależniony jest od wielu czynników. Podczas dokonywania oceny wpływu wibracji należy uwzględnić również indywidualną percepcję poszczególnych jednostek. Warto również pamiętać, że oddziaływanie drgań może negatywnie oddziaływać, nie tylko na ludzi, obiekty, ale także na zwierzęta [29]. Dlatego też ważnym jest, aby taka ocena uwzględniała również wpływ na faunę, przez rozpoznanie struktur lokalnych populacji, czy stanu środowiska przyrodniczego. Wpływ drgań na zwierzęta, generowanych przez prace budowlane oraz eksploatację linii kolejowej dużych prędkości, można porównać do oddziaływań akustycznych, które zostały opisane w pracy [1].

Analiza oddziaływania dla linii kolejowej dużych prędkości powinna obejmować fazę budowy, eksploatacji oraz likwidacji danego przedsięwzięcia [1].

W fazie budowy negatywny wpływ drgań będzie związany przede wszystkim z pracą ciężkiego sprzętu (maszyn budowlanych) oraz z transportem materiałów budowlanych i surowców. Poziom uciążliwości w sąsiedztwie linii kolejowej oraz dróg dojazdowych będzie mocno zróżnicowany i może być bardziej odczuwalny w pobliżu budowy węzłów przesiadkowych (stacji), obiektów inżynierskich lub w sąsiedztwie zapleczy budowy i parków maszyn. Prace budowlane mogą oddziaływać negatywnie na okolicznych mieszkańców oraz lokalną zwierzynę jednakże będą to uciążliwości okresowe, które ustaną po zakończeniu realizacji inwestycji. Bez szczegółowego rozpoznania wszystkich czynników wpływających na wielkość emisji drgań (m.in. liczby i rodzaju maszyn budowlanych, czasu pracy, stanu technicznego, charakterystyki najbliższej zabudowy) nie ma możliwości dokładnego prognozowania drgań na etapie budowy. Podobna sytuacja będzie miała miejsce w przypadku budynków znajdujących się w pobliżu. Brak znajomości wszystkich parametrów uniemożliwia dokładne rozpoznanie oddziaływań, jednakże dotychczasowe badania pozwalają stwierdzić, że w większości przypadków można pominąć oddziaływanie drgań przekazywanych przez podłoże na budynek jeżeli będzie on znajdował się w odległości większej niż 20 m od źródła drgań wywołanych pracami budowlanymi [8].

Na etapie eksploatacji uciążliwość drgań będzie związana z ruchem pojazdów kolejowych dużych prędkości. Dane wejściowe wykorzystywane do opracowania modelu propagacji drgań umożliwią szczegółowe rozpoznanie oddziaływań na budynki i ludzi w nich przebywających. Budynki (i ludzie w nich przebywający), znajdujące się w sąsiedztwie linii kolejowej dużych prędkości będą narażone na negatywne

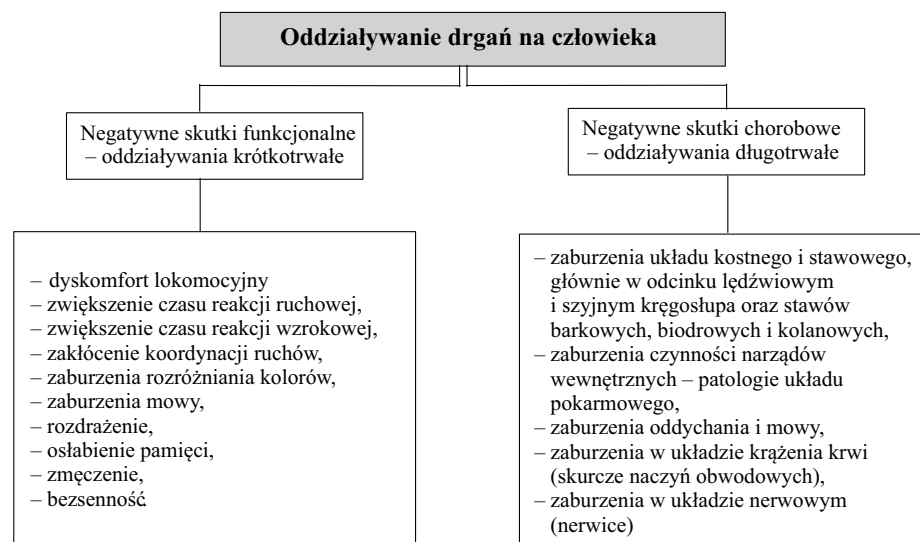
oddziaływania drgań. Wyniki pomiarów drgań kolejowych w różnych budynkach wskazują, że w większości przypadków nadmierny wpływ drgań na ludzi w nich przebywających, może wystąpić w odległości do około 50 m od toru kolejowego [30].

Narażenie człowieka na oddziaływanie drgań mogą powodować negatywne skutki funkcjonalne (oddziaływanie krótkotrwałe) oraz chorobowe (długotrwałe). Zależą one od wielu parametrów drgań, w tym m.in. amplitudy, częstotliwości, czasu ekspozycji, cech osobniczych człowieka (wiek, płeć, stan zdrowia) oraz rodzaju zastosowanej wibroizolacji. Najważniejsze skutki oddziaływania drgań na człowieka przedstawia rysunek 2.

W przypadku skutków funkcjonalnych, większość objawów przemija, gdy bodziec wibracyjny przestaje oddziaływać lub zostanie obniżony poniżej progu tolerancji osobniczej [19].

W celu oceny wpływu drgań na budynki, przepisy normatywne [9] określają strefy szkodliwości, które opierają się na wykresie amplitudy przyspieszenia w zależności od częstotliwości [13]. Zgodnie z normą wyróżnia się 5 stref szkodliwości wraz z rodzajem uszkodzenia [13, 31, 32]:

- Strefa I – drgania nieodczuwalne przez budynki.
- Strefa II – drgania odczuwalne przez elementy wykończeniowe budynku (wyprawy, tynki). Drgania powodują przyspieszone zużycie techniczne budynku, ale nieszkodliwe dla jego konstrukcji nośnej. Dolna granica powstawania zarysowań i spękań w elementach konstrukcyjnych.
- Strefa III – drgania szkodliwe dla konstrukcji nośnej budynku, powodujące lokalne zarysowania i spękania elementów konstrukcyjno-budowlanych. Może dochodzić do odpadania wypraw



Rys. 2. Wpływ oddziaływania drgań na człowieka: opracowanie własne na podstawie [19]

i tynków. Dolna granica ciężkich szkód budowlanych – wytrzymałości pojedynczych elementów konstrukcyjnych budynku.

- Strefa IV – drgania o dużej szkodliwości dla budynku, powodujące liczne spękania oraz miejscowe uszkodzenia, łącznie z uszkodzeniem murów i innych pojedynczych elementów konstrukcyjno-budowlanych budynku. Stanowi zagrożenie dla bezpieczeństwa ludzi użytkujących budynki.
- Strefa V – drgania powodujące stan zagrożenia katastrofą budowlaną.

Zgodnie z normą [9] bezpieczeństwo techniczne budynku zapewnione jest w przypadku nieprzekroczenia dolnej granicy powstawania zarysowań i spękań w elementach konstrukcyjnych (strefa II).

Na etapie likwidacji linii kolejowych dużych prędkości można spodziewać się podobnych oddziaływań drgań jak na etapie budowy. Wynika to z faktu, iż te prace będą prowadzone z zastosowaniem podobnych maszyn budowlanych.

5. Rozwiązania minimalizujące oddziaływanie drgań na budynki i ludzi

Ważnym aspektem związanym z wpływem drgań na budynki i ludzi w nich przebywających jest zastosowanie odpowiednich rozwiązań minimalizujących. Należy podkreślić fakt, że zastosowanie dowolnej wibroizolacji nie przyniesie pożądanego efektu w postaci obniżenia poziomu drgań. Źle dobrana wibroizolacja nie tylko może być nieskuteczna, ale także może spowodować zwiększenie poziomu drgań w otoczeniu linii kolejowej. Dlatego też ważnym jest, aby przed zastosowaniem rozwiązań ograniczających oddziaływanie drgań zaprojektować skuteczne rozwiązania. Analiza skuteczności wibroizolacji, jej parametrów (sztywność, grubość, tłumienie), warunków gruntowych, stanu i konstrukcji nawierzchni kolejowej, odległości budynków, ich konstrukcji pozwoli na optymalne dobranie odpowiednich rozwiązań [30]. Rozwiązania minimalizujące drgania generowane przez kolej dużych prędkości można podzielić na trzy fazy: budowy, eksploatacji oraz likwidacji.

Na etapie realizacji/likwidacji przedsięwzięcia negatywne oddziaływanie można ograniczyć przez:

- odpowiednie zaplanowanie prac budowlanych w sąsiedztwie budynków narażonych na nadmierne drgania (np. przez ograniczenie prac do pory dziennej),
- lokalizowanie zapleczy budowy oraz dróg dojazdowych na obszarach mniejszej uciążliwości dla ludzi i zwierząt,
- korzystanie z nowoczesnego i sprawnego sprzętu budowlanego w dobrym stanie technicznym,

- regularne przeglądy i konserwacje maszyn budowlanych,
- optymalizację w wykorzystaniu sprzętu budowlanego i środków transportu (minimalizacja zbędnych przejazdów, ograniczenie prac maszyn na biegu jałowym itp.).

Na etapie eksploatacji, w celu zminimalizowania negatywnego oddziaływania drgań, najczęściej stosowana jest ochrona czynna, tj. redukująca emisję drgań przy źródle. Polega ona na montażu wibroizolacji w konstrukcji nawierzchni kolejowej, w tym m.in. zabudowę:

- mat wibroizolacyjnych podtłuczniowych lub podpłytowych,
- podkładek wibroizolacyjnych, podpodkładowych, podblokowych,
- łapek sprężystych,
- przekładek podszynowych,
- komór łubkowych szyn profilami przyszynowymi [33–40].

Dodatkowo, rozwiązania minimalizujące drgania u źródła, stosowane są również w pojazdach kolejowych dużych prędkości. Do najczęściej stosowanych środków łagodzenia wibracji pochodzących od pojazdów należy zaliczyć:

- poprawę powierzchni tocznej kół (okrągłości),
- zmniejszenie masy nieresorowanej,
- wprowadzenie masy resorowanej [41–44].

W przypadku braku możliwości zastosowania ochrony czynnej (u źródła), stosuje się rozwiązania na drodze propagacji drgań lub bezpośrednio na zagrożonym obiekcie (ochrona bierna). Do najczęściej stosowanych rozwiązań na drodze propagacji stosuje się ekrany/przegrody antywibracyjne instalowane w gruncie. Polega to na wprowadzeniu materiału do ziemi, który dzięki swoim właściwościom (gęstość, sztywność) może odbierać drgania od otaczającej gleby [45–49].

Ochrona bierna zagrożonych budynków polega na zastosowaniu wibroizolacji na całej ich konstrukcji lub na poszczególnych elementach. Do najczęściej stosowanych rozwiązań zaliczają się:

- maty wibroizolacyjne,
- wibroizolatory elastomerowe,
- poduszki powietrzne [50].

W przypadku nowych budynków, w pierwszej kolejności należy je lokalizować w miejscach, w których nie występują przekroczenia poziomów drgań. W nowo projektowanych budynkach należy uwzględnić najnowocześniejsze techniki oraz opisane zabezpieczenia antywibracyjne, aby poziom drgań, na który będzie narażony budynek nie przekraczał dopuszczalnych poziomów oraz nie stanowił zagrożenia dla ludzi w nich przebywających.

6. Podsumowanie

Całemu systemowi transportowemu, w tym kolei dużych prędkości, od zawsze towarzyszą oddziaływania dynamiczne, które generują drgania do środowiska. Konieczność minimalizacji ich negatywnego działania na budynki i ludzi w nich przebywających doprowadziła do powstania złożonych układów wibroizolacji, które ograniczają rozprzestrzenianie się drgań. Odpowiednie zaprojektowanie, a następnie dobranie rozwiązań nie jest możliwe bez dokładnego i szczegółowego rozpoznania oddziaływań drgań generowanych przez kolej dużych prędkości.

Celem artykułu jest przybliżenie zagadnień dotyczących oddziaływania wibracji pochodzących z systemu kolei dużych prędkości. Omówiono w nim najważniejsze regulacje prawne z zakresu drgań w transporcie kolejowym, a także scharakteryzowano ich główne źródła. Podjęto się także próby określenia negatywnego oddziaływania drgań na budynki oraz ludzi w nich przebywających, a także na przyrodę otaczającą koleje dużych prędkości i bytujące zwierzęta. Przedstawiono również najważniejsze rozwiązania stosowane w celu minimalizacji negatywnego wpływu drgań na analizowane elementy otoczenia/środowiska.

Literatura

1. Polak K.: *Environmental Impacts of High-Speed Rail, Part 1: Acoustic Impacts*, Problemy Kolejnictwa, 2023, z. 200, s. 209–216.
2. Ouakka S., Verlinden O., Kouroussis G.: *Railway ground vibration and mitigation measures: benchmarking of best practices*, Railway Engineering Science, 2022, no. 30.
3. Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2016/797 z dnia 11 maja 2016 r. w sprawie interoperacyjności systemu kolei we Wspólnocie (Dz.U. L 138 z 26.5.2016).
4. Ustawa Prawo ochrony środowiska z dnia 21 kwietnia 2001 – t.j. Dz.U. 2016 poz. 672.
5. Ustawa z dnia 28 marca 2003 r. o transporcie kolejowym (tekst jednolity: Dz.U. 2024 poz. 697).
6. Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 7 sierpnia 2008 r. w sprawie wymagań w zakresie odległości i warunków dopuszczających usytuowanie drzew i krzewów, elementów ochrony akustycznej i wykonywania robót ziemnych w sąsiedztwie linii kolejowej, a także sposobu urządzania i utrzymywania zasłon odsłoneżnych oraz pasów przeciwpożarowych (tekst jednolity: Dz.U. 2008 nr 153 poz. 955).
7. Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie (Dz.U. z 2019 r. poz. 1065 z późn. zm.).
8. Stypuła K., Koziół K.: Wpływ drgań na projektowanie budynków, Nauka i Budownictwo, 2016, R.20, nr 12, s. 98–102.
9. PN-B-02170:2016-12: Ocena szkodliwości drgań przekazywanych przez podłoże na budynki.
10. PN-B-02171:2017-06: Ocena wpływu drgań na ludzi w budynkach.
11. Stypuła K.: *Praktyczne aspekty stosowania zasad ochrony środowiska przed drganiami w procesie przygotowania i realizacji inwestycji kolejowych*, Przegląd Komunikacyjny, 2019, nr 8, s. 2–7.
12. Stypuła K., Koziół K.: *Stosowanie pomiarów drgań i obliczeń symulacyjnych w ramach ochrony sąsiedniej zabudowy przed drganiami kolejowymi*, Zeszyty Naukowo-Techniczne Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Komunikacji w Krakowie, 2019, t. 2(119), s. 235–246.
13. Bukała M. et.al.: *Analysis of rail traffic vibrations' impact on a residential building. A case study*, Engineering Expert, 2021, no 1, p. 35–49.
14. Korzeb J.: *Predykcja wybranych oddziaływań dynamicznych w strefie wpływu infrastruktury transportowej*, Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, seria Transport, Warszawa, 2013, z. 9.
15. Kawecki J., Stypuła K.: *Projektowanie budynków z uwzględnieniem wpływu drgań komunikacyjnych na ludzi w budynkach*, Fizyka budowli w teorii i praktyce, 2009, tom IV, s. 69–74.
16. Kawecki J., Kowalska A.: *Analysis of influence of vibrations on humans in buildings in standards approach*, Archives of Civil Engineering, 2012, vol. 58, nr 2, pp. 223–239.
17. Kowalska-Koczwara A, Pachla F, Tataro T. Measurements of Human Perception of Train Vibration. Applied Sciences, 2024, v. 14(8):3404.
18. Pachla F. et.al.: *Optymalizacja zabezpieczeń przed drganiami kolejowymi na przykładzie nastawni w Białej Rawskiej*, Przegląd Komunikacyjny, 2017, R. 72 nr 6, s. 2–8.
19. Nader M.: *Modelowanie i symulacja oddziaływania drgań pojazdów na organizm człowieka*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2001.
20. Kuznietsov V., Rojek A., Szulc W.: *Opracowanie algorytmu systemu antykradzieżowego sieci jezdnej w transporcie szynowym*, Problemy Kolejnictwa, 2023, Zeszyt 199, s. 17–25.
21. Nowakowski T., Staśkiewicz T.: *Wpływ balastowania torowiska na drgania parasejsmiczne w eksploatacji infrastruktury tramwajowej*, Problemy Kolejnictwa, Zeszyt 172, s. 47–54.
22. Kouroussis G., Connolly D.P., Verlinden O.: *Railway-induced ground vibrations – a review of vehicle effects*, International Journal of Rail Transportation, 2014, nr 2(2).
23. Thompson D. J., Jones C. J., Gautier P.E.: *Railway noise and vibration: mechanisms, modelling and means of control*, Elsevier, 2009.

24. Kisilowski J.: *O niektórych źródłach wibracji i hałasu w układzie pojazd szynowy – tor*, Liga Walki z Hałasem, Warszawa, 1994.
25. Connolly D.P. et.al.: *Benchmarking railway vibrations – Track, vehicle, ground and building effects, Construction and Building Materials*, 2015, Volume 92, p. 64–81.
26. Korzeb J.: *Analiza drgań komunikacyjnych z zastosowaniem teorii falek*, Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, 2011, nr z. 77.
27. Ciesielski, R., Kawecki J., Maciąg E.: *Ocena wpływu wibracji na budowlę i ludzi w budynkach – Diagnostyka Dynamiczna*, Instytut Techniki Budowlanej, 1993.
28. Connolly D.P., Forde M. C.: *Use of Conventional Site Investigation Parameters to Calculate Critical Velocity of Trains from Rayleigh Waves*, Transportation Research Record, 2015, nr 2476, p. 32–36.
29. Milewicz J., Mokrzan D., Szymański G.M.: *Environmental Impact Evaluation as a Key Element in Ensuring Sustainable Development of Rail Transport*, Sustainability, 2023, no. 15, 13754.
30. Stypuła K., Bohatkiewicz J.: *Zagadnienia ochrony środowiska w procesach inwestycyjnych*, TTS Technika Transportu Szynowego, 2013, Tom R.20, nr 2–3, s. 4–10.
31. Chrzan T.: *Wpływ eliptycznego rozkładu radialnej sejsmicznej prędkości drgań na bezpieczeństwo budynku*, Nauka w Budownictwie, Wybrane Problemy, 2023, nr 5, s. 14–17.
32. Jakubczyk-Gałczyńska A.: *Ocena wpływu drgań komunikacyjnych na budynki za pomocą maszynowego uczenia*, Nauka w Budownictwie, Wybrane Problemy, 2023, nr 11, s. 6–9.
33. Costa P.A. et.al.: *Ballast mats for the reduction of railway traffic vibrations*, Earthquake Engineering and Soil Dynamics, 2012, vol. 42, pp. 137–150.
34. Ma M. et.al.: *An experimental study of vibration reduction of a ballasted ladder track*, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F, 2017, vol. 231, pp. 1035–1047.
35. He C. et.al.: *An efficient prediction model for vibrations induced by underground railway traffic and experimental validation*, Transportation Geotechnics, 2021, vol 31: 100–646.
36. He W. et.al.: *Environmental noise and vibration characteristics of rubber-spring floating slab track*, Environmental Science and Pollution Research, 2021, vol 28(11):13671–13689.
37. Major M., Minda I.: *Drgania i oddziaływania dynamiczne na budynki i budowlę*, Zeszyty Naukowe Politechniki Częstochowskiej, Budownictwo, 2016, Z. 22 (172), s. 223–327.
38. Faure B. et.al.: *Vibration mitigation by innovative low stiffness rail fastening systems for ballasted track*, Notes on Numerical Fluid Mechanics & Multidisciplinary Design, 2015 v. 126, p. 627–634.
39. Polak K.: *High-Speed Rail versus environmental protection. In High-Speed Rail in Poland: Advances and Perspectives*, [in: Żurkowski A., Ed., CRC Press], Warszawa, 2018, s. 421–439.
40. Adamczyk J., Szałyga-Osypanka D.: *Systemowe rozwiązanie ograniczenia oddziaływań dynamicznych na podtorze pojazdów kolejowych o prędkościach powyżej 250 km/h*, TTS Technika Transportu Szynowego, 2008, nr 5–6, s. 80–84.
41. Ouakka S. et.al.: *Efficient mitigation of railway induced vibrations using seismic metamaterials*, Engineering Structures, 2023, Volume 284, 115767.
42. Lyratzakis A. et.al.: *Efficient mitigation of high-speed trains induced vibrations of railway embankments using expanded polystyrene blocks*, Transportation Geotechnics, 2020, Volume 22, 100312.
43. Ouakka S., Verlinden O., Kouroussis G.: *Railway ground vibration and mitigation measures: Benchmarking of best practices*, Railway Engineering Science, 2020, n. 30(1), p. 1–22.
44. Nielsen J. et.al.: *Reducing train-induced ground-borne vibration by vehicle design and maintenance*, International Journal of Rail Transportation, 2015, vol. 3 (1), pp. 17–39.
45. Coulier P. et.al.: *Subgrade stiffening next to the track as a wave impeding barrier for railway induced vibrations*, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2013, v. 48: 119–131.
46. Connolly D.P. et.al.: *Scoping prediction of re-radiated ground-borne noise and vibration near high speed rail lines with variable soils*, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2014, v. 66, p. 78–88.
47. Garinei A., Risitano G., Scappaticci L.: *Experimental evaluation of the efficiency of trenches for the mitigation of train-induced vibrations*, Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2014, v. 32(0), p. 303–315.
48. Kouroussis G. et.al.: *The effect of railway local irregularities on ground vibration*, Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2015, Volume 39. pp. 17–30.
49. Guo W. et.al.: *A combination strategy of hollow-closed-wall in-filled trench and elastic bearing for reducing environmental vibration induced by high-speed train*, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2020, Volume 133, 106–136.
50. Kraśkiewicz C., Oleksiewicz W., Zbiciak A.: *Podkładki podpodkładowe w podsypkowej konstrukcji nawierzchni dróg szynowych – techniczne i formalne aspekty stosowania*, Archiwum Instytutu Inżynierii Lądowej, 2017, nr 25, s. 221–243.