

Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki

Wydział Inżynierii Lądowej

Katedra Mechaniki Budowli i Materiałów

ROZPRAWA DOKTORSKA

mgr inż. Barbara Małgorzata Kozuch

**Drgania wzbudzone przejazdami pociągów dużych
prędkości w Polsce – propagacja w gruncie**

Promotor: prof. dr hab. inż. Tadeusz Tatara

Promotor pomocniczy: dr hab. inż. Filip Pachla, prof. PK

Kraków 2023

*Składam serdeczne podziękowania wszystkim,
którzy przyczynili się do powstania niniejszej rozprawy:
Promotorom: Panu Profesorowi Tadeuszowi Tatarze,
oraz Panu Profesorowi Filipowi Pachli,
za cenne rady, wskazówki i cierpliwość w trakcie tworzenia pracy,
Rodzinie za nieustanne wsparcie,
a także Współpracownikom za motywację.*

Spis treści

Spis treści	3
1 Wstęp	7
1.1 Geneza problemu	7
1.2 Cel i zakres pracy	8
1.3 Tezy naukowe	9
2 Zarys problematyki i przegląd aktualnego stanu wiedzy	10
2.1 Dokumenty normalizacyjne	11
2.2 Przegląd literatury przedmiotu	13
3 Podstawy teoretyczne	16
3.1 Źródło drgań – interakcja koło – szyna	16
3.2 Obciążenie ruchome	18
3.3 Propagacja drgań w gruncie	20
3.4 Przenoszenie drgań na konstrukcje budynków	25
4 Badania in situ propagacji drgań w gruncie i wpływu na budynki	26
4.1 Metodyka badań	27
4.1.1 Źródła drgań	28
4.1.2 Aparatura pomiarowa	30
4.2 Opis szczegółowy przeprowadzonych badań	35
5 Analiza sygnału	44
5.1 Podstawowe parametry gruntu – analiza przy użyciu młotka modalnego 44	
5.2 Przebiegi czasowe drgań – analiza wartości maksymalnych	46
5.3 Szybka transformata Fouriera (FFT)	53
5.4 Krótkookresowa Transformata Fouriera (STFT)	56
5.4.1 Porównanie FFT i STFT do analiz propagacji drgań w zależności od odległości punktu pomiarowego od źródła drgań	62

5.5	Ciągłe przekształcenie falkowe (CWT)	73
5.5.1	Analiza w dziedzinie częstotliwościowo – czasowej.....	76
6	Analiza wyników drgań gruntu i budynków	82
6.1	Skala Wpływów Dynamicznych (SWD)	82
6.2	Wskaźnik Odczuwalności Drgań przez Budynki (WODB).....	85
6.2.1	Analiza drgań z wykorzystaniem normatywnych analiz	85
7	Analiza parametryczna	102
7.1	Prędkość pociągu	104
7.1.1	Zmienna prędkość pociągu w czasie przejazdu – hamowanie i ruszanie	105
7.2	Odległość od źródła drgań	108
7.3	Rozważany typ taboru.....	109
7.4	Drgania odbierane przez budynek.....	114
7.4.1	Współczynnik redukcji	114
7.5	Czas eksploatacji.....	117
8	Wnioski, oryginalne osiągnięcia w pracy oraz kierunki dalszych badań...	119
	Spis rysunków	122
	Bibliografia	129

DEFINICJE I SKRÓTY

a_{max} – maksymalna wartość przyspieszenia drgań

CMK – Centralna Magistrala Kolejowa – linia kolejowa nr 4

CPK – Centralny Port Komunikacyjny

CWT – (ang. continuous wavelet transform) transformacja falkowa

czas trwania drgań - czas, w którym wartości ocenianego parametru drgań są większe niż 0,2 wartości szczytowej

EMU 250 – Alstom EMU 250 (seria ED 250) – siedmioczłonowy normalnotorowy elektryczny zespół trakcyjny dużych prędkości, pociąg z rodziny Pendolino (w pracy użyte zamiennie z nazwą Pendolino)

FFT – (ang. Fast Fourier Transform) szybka transformacja Fouriera

InterCity – PKP InterCity – polski przewoźnik kolejowy obsługujący dalekobieżne przewozy pasażerskie (w pracy użyto dla określenia taboru przewoźnika innego niż Pendolino)

InterREGIO – kategoria pociągów o ograniczonej liczbie postojów handlowych, uruchamiana przez niektóre koleje europejskie (w pracy użyto dla określenia taboru regionalnego)

KDP – koleje dużych prędkości

KPK – Krajowy Program Kolejowy – zbiór projektów i inwestycji związanych z budową, modernizacją oraz odnową nowej infrastruktury kolejowej na terenie Polski

PKN – Polski Komitet Normalizacyjny

PKP PLK – PKP Polskie Linie Kolejowe S.A.

SWD – Skala Wpływów Dynamicznych

STFT – (ang. Short Time Fourier Transform) krótkookresowa transformacja Fouriera

TEN-T – Trans-European Transport Networks (Transeuropejska sieć transportowa)

UIC – (fr. Union Internationale des Chemins de fer) Międzynarodowy Związek Kolei

V_{kr} – prędkość krytyczna

wartość szczytowa przyspieszenia drgań – największa w czasie trwania drgań bezwzględna wartość przyspieszenia drgań złożonych,

wartość maksymalna przyspieszenia drgań w danym paśmie częstotliwości – największa bezwzględna wartość przyspieszenia drgań w danym paśmie 1/3 oktawowym w czasie trwania drgań

WODB – Wskaźnik Odczuwalności Drgań przez Budynki

X – składowa drgań w kierunku poziomym, prostopadła do osi toru

Y – składowa drgań w kierunku poziomym, równoległa do osi toru

Z – składowa drgań w kierunku pionowym

1 Wstęp

1.1 Geneza problemu

W ostatnich latach nie da się nie zauważyć rosnącego zainteresowania transportem kolejowym oraz coraz większej ilości nowych inwestycji związanych z modernizacją i budową infrastruktury szynowej w Polsce (m.in. poprzez Krajowy Program Kolejowy – KPK) i na świecie. Kolej wskazywana jest również jako najbardziej ekologiczny z lądowych środków transportu i z tego względu oceniana jako przyszłościowa inwestycja wpisująca się w politykę międzynarodową. Jednak głównym aspektem mogącym stanowić o realnej możliwości konkurencji kolei z innymi gałęziami transportu jest zwiększenie prędkości pociągów i rozbudowa infrastruktury mająca na celu zwiększenie dostępności do niej. Co może mieć negatywny wpływ na środowisko poprzez m.in. zwiększenie emisyjności drgań i hałasu. Przejazdy pociągów generując drgania zakłócają klimat wibroakustyczny, a w skrajnych przypadkach zagrażają bezpieczeństwu i zdrowiu ludzi poprzez emitowanie drgań w otoczeniu linii kolejowych.

Z literatury branżowej jednoznacznie wynika, że drgania generowane przejazdami pociągów stanowią coraz większe wyzwanie naukowo-inżynierskie stając się istotnym problemem globalnym. Problem nie jest rozwiązany również w krajach z długą tradycją kolei dużych prędkości. Z zestawienia badań przeprowadzonych na całym świecie (m.in. w Wielkiej Brytanii, Kanadzie, Stanach Zjednoczonych czy Belgii) [1] wynika, iż w 44% z przeanalizowanych przypadków limity drgań zostały przekroczone.

W związku z powyższym transport kolejowy chcąc odgrywać ważną rolę w kształtowaniu jakości środowiska musi uporać się z istotnymi problemami napotkanymi przy stale zwiększających się wymaganiach eksploatacyjnych.

W Polsce za istotny punkt na drodze do kolei dużych prędkości można uznać dzień 28 października 2020 r., kiedy to Rada Ministrów przyjęła uchwałę w sprawie ustanowienia programu wieloletniego: Program inwestycyjny Centralny Port Komunikacyjny. Etap I. 2020 – 2023.

Jak opisano na stronie spółki „W pierwszym etapie zaplanowanym na lata 2020 – 2023 zostaną wykonane prace przygotowawcze dla Portu Solidarność – nowego lotniska centralnego dla Polski – i sieci nowych linii kolejowych, w tym kolei dużych prędkości.

Inwestycje kolejowe CPK to łącznie prawie 1800 km nowych linii, które mają powstać do końca 2034 r. Dla ponad 700 km z nich prace przygotowawcze już trwają. Pierwsze roboty budowlane mają się rozpocząć już w 2023 r. Na Program Kolejowy CPK składa się w sumie 12 tras kolejowych, w tym 10 tzw. szprych prowadzących z różnych regionów Polski do Warszawy i CPK. Łącznie to 30 zadań inwestycyjnych i 1789 km nowych linii kolejowych, których inwestorem jest Centralny Port Komunikacyjny Sp. z o.o.” [2]

Całość programu zgodnie z planem ma zostać zrealizowana w latach 2020 – 2034, co wskazuje na konieczność szybkiego rozwiązania lub minimalizacji wpływu najistotniejszych problemów związanych z projektowaniem i budową linii kolejowych.

Mając na uwadze powyższe aspekty przedmiotowa dysertacja skupiać się będzie na problemie drgań generowanych przejazdami pociągów dużych prędkości w Polsce.

1.2 Cel i zakres pracy

Do zasadniczych celów niniejszej pracy należy zaliczyć:

- Zbadanie wpływu przejazdów pociągów z dużymi prędkościami na zjawisko propagacji drgań.
- Weryfikację zależności parametrycznych mających wpływ na wzbudzone drgania generowanych transportem kolejowym.
- Zaproponowanie opisu drgań wzbudzanych przejazdami pociągów który będzie eksponował najważniejsze elementy złożonego zjawiska i upraszczał lub pomijał nieistotne zagadnienia.

Tak sprecyzowane cele osiągnięto dzięki realizacji zadań szczegółowych zgodnie z planem:

- Badania „in situ” propagacji drgań w gruncie wzbudzanych przejazdami różnego typu taboru kolejowego – Pendolino (z dedykowanymi prędkościami), InterRegio, InterCity oraz pociągów towarowych w trzech różnych przekrojach pomiarowych.
- Analiza sygnału:
 - Przebiegi czasowe drgań – analiza wartości maksymalnych.
 - Szybka transformata Fouriera (FFT).

- Krótkookresowa Transformata Fouriera (STFT).
- Ciągłe przekształcenie falkowe (CWT).
- Porównanie analiz w dziedzinie częstotliwościowo – czasowej.
- Analiza wyników drgań gruntu i budynków:
 - Skala Wpływów Dynamicznych (SWD).
 - Wskaźnik Odczuwalności Drgań przez Budynki (WODB).
 - Analiza drgań z wykorzystaniem normatywnych analiz.
- Analiza parametryczna:
 - Prędkość pociągu.
 - Zmienna prędkość pociągu w czasie przejazdu – hamowanie i ruszanie.
 - Odległość od źródła drgań.
 - Rozważany typ taboru.
 - Stan techniczny taboru.
 - Przenoszenie drgań na budynek.

1.3 Tezy naukowe

Na podstawie przeprowadzonej analizy problematyki, rozeznania teorii i przeglądu literatury z zakresu rozważanego, ujętego w temacie zagadnienia, sformułowano następujące tezy naukowe pracy:

1. Zaproponowana metodyka pomiarowo-interpretacyjna badań in situ drgań wywołanych przejazdami pociągów dużej prędkości oraz analiza parametryczna może być wykorzystana do weryfikacji i wyznaczania charakterystycznych parametrów drgań (pasm częstotliwości silnie zależnych od zmiany prędkości oraz słabo wrażliwych na wzrost prędkości pociągu).
2. Pozyskanie dodatkowych informacji dot. drgań niestacjonarnych, zmiennych w czasie wzbudzanych przez przejeżdżające pociągi, możliwe jest przez uzupełnienie analiz standardowych i normatywnych przez analizy w dziedzinie częstotliwościowo – czasowej (np. STFT lub CWT). Wynik te są pomocne w diagnostyce eksploatowanego taboru.
3. Istnieje taka prędkość v_0 pociągu, której przekroczenie spowoduje istotne wzmocnienie drgań gruntu w otoczeniu linii kolejowej.

2 Zarys problematyki i przegląd aktualnego stanu wiedzy

Budownictwo, a w szczególności branża drogi kolejowe stanowią bardziej niż dziedzinę naukową dziedzinę techniczną mocno osadzoną w realiach i warunkach lokalnych i krajowych. O ile co do zasady zjawiska fizyczne i ich prawa są uniwersalne (bez względu na szerokość geograficzną), o tyle już specyficzne warunki otoczenia, w których występują już nie. Pierwsze różnice występują w źródła drgań - infrastruktura, wytwarzana w ogromnej większości lokalnie, specyfikacje krajowe dotyczące stosowanej nawierzchni, wymogi materiałowe, sprzęt użytkowany przy budowie czy eksploatowany tabor, lub wytyczne jego konserwacji. Każde państwo wyznacza własne normy i standardy, posiada utrwaloną wiedzę i doświadczenie firm miejscowych, oraz dostępne na jej terenie zasoby materiałowe, które często nie są uniwersalne czy jednakowe. Budynki stanowiące odbiornik drgań nie posiadają jednolitej konstrukcji i są budowane w równych standardach na całym globie. Również naturalne uwarunkowania mające wpływ m.in. na prędkość fali w gruncie zależące od klimatu – wilgotność, strefy przemarzania, warunków geotechnicznych, będą zupełnie inne w Wielkiej Brytanii czy Australii niż w Polsce.

Budownictwo kolejowe jest jedną z dziedzin, dla której próba stworzenia bezwzględnie uniwersalnych założeń może bardziej stać się czystą teorią niż realną wartością praktyczną. Oderwana od warunków lokalnych wiedza nie jest w stanie się w nie wpisać i je usystematyzować. Problem występowania drgań jest problemem międzynarodowym, natomiast sposób radzenia sobie z nim już musi mieć znamiona bardziej krajowe, dostosowane również do możliwości i aspiracji kraju w tym zakresie. Wytyczne, zmiany i zalecenia, które mogłyby dobrze działać w polskich warunkach, niekoniecznie sprawdzą się w krajach z długoletnią tradycją kolei dużych prędkości i na odwrót. Raczej do problemów budowlanych należy podchodzić drogą ewolucji niż rewolucji.

Wiele w rozważanej tematyce napisano, brakuje prostych inżynierskich rozwiązań. Byłoby brakiem naukowej pokory oczekiwanie znalezienia antidotum na drgania generowane przejazdami pociągów. Raczej należy się skupić na próbie lokalnej identyfikacji zjawiska i wskazaniu najprostszych i najszybszych, a przez co najskuteczniejszych metod opisu i zrozumienia zjawiska i wskazać dalsze możliwości i kierunki rozwoju tego fragmentu dziedziny drogi kolejowe. Element naukowy powinien

być wytworzony do celu jakiego ma służyć tj. realnej poprawie warunków eksploatacyjnych poprzez praktykę inżynierską.

2.1 Dokumenty normalizacyjne

Wartości dopuszczalnych limitów drgań zmieniają się w zależności od kraju. Dostępne są normy i wytyczne mające na celu zdefiniowanie odpowiednich procedur i ocen na obszarze, na którym eksploatowana jest linia kolejowa. Główną przyczyną różnorodności jest fakt, że kraje na ogół nie posiadają kompleksowych przepisów ograniczających drgania emitowane przez kolej, ale dostarczają jedynie wytycznych i zaleceń opartych na szeregu norm, zarówno międzynarodowych, jak i regionalnych [3]:

- ISO 2631 [4, 5] traktowane często jako punkt odniesienia przy ocenie poziomu drgań,
- ISO/TS 14837–32:2015 [6] zawiera wytyczne i określa metody pomiaru dynamicznych właściwości gruntu, przez który przenoszone są wibracje generowane eksploatacją kolei oraz do fundamentów sąsiednich budynków.
- PN – EN 12299 [7] definiuje i ocenia komfort pasażerów pociągu,
- ISO 4866 [8] dla pomiarów i przetwarzania danych w odniesieniu do oceny wpływu drgań na konstrukcje,
- ISO 10137:2007 [9] zawiera zalecenia dotyczące oceny przydatności użytkowej budynków pod kątem drgań,
- ISO 16587:2004 [10] opisuje parametry oceny stanu konstrukcji, w tym rodzaje pomiarów, czynniki określające dopuszczalne granice wydajności oraz międzynarodowe wytyczne dotyczące pomiarów,

lub normy obowiązujące w różnych państwach:

- brytyjskie normy BS 6841 [11] i BS 6472-1 [12] bardzo zbliżone do ww. norm ISO,
- niemieckie normy DIN 4150 [13 - 15] stosowane również w Wielkiej Brytanii, Belgii i innych krajach europejskich,
- normy szwajcarskie SN 640 312a [16] dotyczące wyłącznie szkód budowlanych,
- norweska norma NS 8176 [17] dotycząca oceny komfortu,

- zalecenia Departamentu Transportu Stanów Zjednoczonych [18, 19] dotyczące oceny oddziaływania drgań wywoływanych wpływem pociągów dużych prędkości.

W Unii Europejskiej Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2016/797 z dnia 11 maja 2016 r. w sprawie interoperacyjności systemu kolei w Unii Europejskiej w załączniku III lakonicznie podaje „Funkcjonowanie systemu kolei nie może powodować osiągnięcia niedopuszczalnego poziomu drgania gruntu w odniesieniu do działań i obszarów położonych w pobliżu infrastruktury i będących w normalnym stanie utrzymania.” [20]

W polskim ustawodawstwie nadrzędny dokument stanowi Ustawa z dn. 27.04.2001 r. Prawo ochrony środowiska (Dz.U. z 2001 r. Nr 62, poz. 627) [21] ustanawiając:

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

„Kto powoduje zanieczyszczenie środowiska, ponosi koszty usunięcia skutków tego zanieczyszczenia” i dalej:

„zanieczyszczenie - 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” oraz

„emisja - rozumie się przez to wprowadzane bezpośrednio lub pośrednio, w wyniku działalności człowieka, do powietrza, wody, gleby lub ziemi:

- a) substancje,
- b) energie, takie jak ciepło, hałas, wibracje lub pola elektromagnetyczne”.

Powyższe dowodzi, iż drgania emitowane przejazdem pociągów zgodnie z prawem muszą być w możliwie najskuteczniejszy sposób minimalizowane, a odpowiedzialność za ich emisję oraz konieczność zwalczania ich ciąży na zarządcy infrastruktury.

Polski Komitet Normalizacyjny określił kryteria oceny wpływu drgań przekazywanych przez podłoże na budynki oraz ludzi w nich przebywających, a także wytyczne dotyczące realizacji pomiarów i analiz służących weryfikacji poziomu drgań przedkładając dwie normy:

- PN-B-02170:2016-12 – Ocena szkodliwości drgań przekazywanych przez podłoże na budynki [22],
- PN-B-02171:2017-06 – Ocena wpływu drgań na ludzi w budynkach [23].

Wspomniana we wcześniejszych rozdziałach inwestycja – CPK w Szczegółowych Warunkach Technicznych dla Budowy Infrastruktury Kolejowej Centralnego Portu Komunikacyjnego – Wytyczne Projektowania – Tom IX Środki minimalizujące oddziaływanie na środowisko [24] powołując się na wyżej wymienione polskie normy nakłada na projektantów obowiązek zastosowania metod i środków minimalizujących wpływ drgań.

2.2 Przegląd literatury przedmiotu

Zgodnie z raportem Międzynarodowego Związku Kolei [25] w ostatnich latach zwiększył się nacisk na zagadnienie drgań kolejowych. Niemniej jednak dziedzina ta, w dalszym ciągu nie posiada wielu elementów koniecznych do stworzenia kompletnej polityki i strategii. Niezależne wytyczne krajowe determinują istnienie szerokiego zakresu metod oceny i sposobu łagodzenia drgań oraz dużej różnorodności wskaźników i podejść. W sytuacji projektowania, wiarygodne prognozy poziomów drgań są trudne i wymagają badań terenowych w celu oceny zachowania się lokalnego gruntu. W przypadku istniejących obiektów, możliwości niezawodnego i ekonomicznego złagodzenia lub zmniejszenia poziomu drgań przy rozsądnych kosztach są w dalszym ciągu ograniczone.

W ramach pracy dokonano szerokiego przeglądu aktualnego stanu wiedzy. W niniejszym rozdziale przedstawiono kilka publikacji i badań, które zdaniem autorki stanowią najbardziej reprezentatywne i aktualne dokumenty oraz wnoszą do pracy niezbędną informację opisującą problematykę rozprawy. Ze względu na szybki rozwój narzędzi komputerowych, a tym samym poprawę jakości analiz, w głównej mierze oparto się na publikacjach opracowanych w ostatniej dekadzie.

Z syntezy i przeglądu ponad 200 prac naukowych przedstawionych w publikacji [26] wynika szereg tez i wniosków dotyczących drgań podłoża generowanych przejazdami pociągów. Aktualnie powstaje wiele prac o tematyce przewidywania drgań toru i podłoża przy użyciu szerokiej palety technik, począwszy od klasycznych analiz matematycznych [27] do metody elementów skończonych (FEM) oraz metody elementów brzegowych (BEM). Analizy prowadzone są w 2-D, 2,5-D i 3-D. Jak wskazano w ww. publikacji istotnym aspektem jest "prędkość krytyczna" zarówno pociągu, jak i toru. Wartość prędkość krytyczną szacuje się jako 0,7 prędkości fali Rayleigha, która zależy od gruntu, na którym posadowiona jest linia kolejowa. Ze względów bezpieczeństwa powyżej prędkości krytycznej tabor nie powinien być eksploatowany. W powyższym opracowaniu zidentyfikowano przykładowe strategie łagodzenia wibracji jak np. ulepszenie gruntu lub środki izolacji fal, takie jak rowy zasypane ziemią lub materiałem o niskiej impedancji akustycznej.

W najnowszych publikacjach [28, 29] autorzy zaproponowali i zweryfikowali uproszczoną metodykę przewidywanie nieliniowej prędkości krytycznej. Proponowana metodyka jest w stanie przewidzieć nieliniową prędkość krytyczną w dowolnych warunkach geotechnicznych przy niskim koszcie obliczeniowym i akceptowalnej dokładności. Twórcy publikacji [30] przedstawili zalecenia mające na celu minimalizację prac geotechnicznych niezbędnych do wyznaczenia prędkości krytycznej. Opracowano hybrydową metodologię eksperymentalno-analityczną, opartą na geofizycznym układzie eksperymentalnym Spektralnej Analizy Fal Powierzchniowych (SASW).

W artykułach [31, 32] rozważa się różnego typu modele służące analizom dynamiki torów kolejowych, które obejmują warstwowanie gruntu oraz nieliniowość na styku tor – grunt. Publikacja przedstawia modele analityczne, półanalityczne, numeryczne 2,5D i numeryczne 3D. Z przeprowadzonej przez współtwórców analizy wynika, że zależność pomiędzy dyspersją toru a dyspersją gruntu ma silny wpływ na prędkość krytyczną. Przy bardzo cienkiej wierzchniej warstwie gruntu poprawa struktury toru może być uwzględniona dla zwiększenia prędkości krytycznej. Również głębokość zalegania skały macierzystej jest uważana za ważny parametr, ponieważ może powodować wrażliwość prędkości krytycznej na niewielkie zmiany. W przypadku warstw gruntu o niskiej sztywności stwierdzono, że dyspersja fali gruntowej, która wpływa na prędkość krytyczną, może stać się coraz bardziej złożona. Uwzględniono

również badanie nieliniowości ośrodka propagacji przy użyciu metod liniowych i nieliniowych. Wyniki pokazują, że różnica w danych wyjściowych z dwóch powyższych metod może mieć znaczący wpływ na prędkość krytyczną.

Jedną z najnowszych uproszczonych metod analizy drgań przedstawia się w publikacji [33]. Autorzy wykorzystują spektrum wzbudzenia gleby w miejscu podstawy budynku jako dane wejściowe i obliczają reakcję budynku w dowolnym miejscu w strukturze 3D.

Analizy drgań oparte lub zweryfikowane podczas rzeczywistych, polowych badań przedstawiono m.in. w publikacjach [34 - 40]. W publikacjach przedstawia się metody zweryfikowane danymi pozyskanymi podczas badań in situ.

Ilość aktualnych publikacji oraz wielorakość podejść i propozycje coraz to nowszych rozwiązań pokazują, że zagadnienie jest aktualnym i niewystarczająco zbadanym problemem. Dodatkową trudność sprawia konieczność weryfikacji proponowanych modeli przez kosztowne i wielkoskalowe badania terenowe.

Dalszą część literatury umieszczono w kolejnych rozdziałach w miejscach do których bezpośrednio odnoszą się analogie lub cytowane fragmenty.

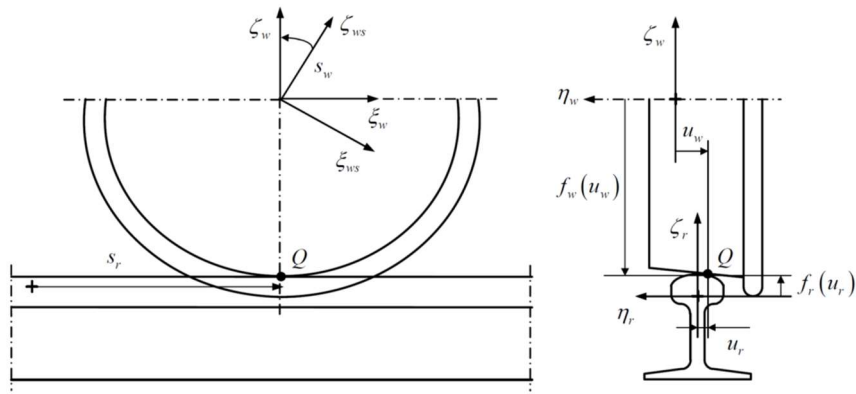
3 Podstawy teoretyczne

W analizach propagacji drgań komunikacyjnych można wyróżnić następującą ścieżkę propagacji [41, 42]:

- Generowanie wzbudzenia dynamicznego na styku koło/szyna – interakcja koło-szyna.
- Wzbudzenie drgań w nawierzchni kolejowej, które przez zasadę sprzężenia interakcyjnie wpływają na drgania pojazdu dodatkowo je nasilając.
- Przekazywanie drgań przez nawierzchnię, podtorze do gruntu w sąsiedztwie linii kolejowej.
- Propagacja drgań w gruncie.
- Przenoszenie drgań przez grunt na obiekty znajdujące się na linii propagacji.
- Dynamiczna odpowiedź obiektu.
- Wpływ drgań na budynki/ludzi w budynku.

3.1 Źródło drgań – interakcja koło – szyna

Pierwszą i zasadniczą rolę w kwestii drgań wywoływanych przejazdami pociągów odgrywa interakcja pomiędzy kołami a szyną, stanowiąc źródło generowanych wibracji. Z czysto geometrycznego punktu widzenia identyfikacja punktów kontaktowych między kołem a szyną jest złożonym i skomplikowanym zadaniem, ponieważ obie powierzchnie są profilowane. Ponadto, z dynamicznego punktu widzenia, duża liczba parametrów, które obejmują kształt powierzchni kontaktu, prędkość i przemieszczenie styku, siły kontaktowe i właściwości fizyczne materiałów, prowadzą do skomplikowanych algorytmów obliczeniowych. Oprócz złożoności zjawiska, styk koło-szyna charakteryzuje się silnymi nieliniowościami i często bardzo sztywnym zachowaniem (w przeciwieństwie np. do zagadnień na styku droga asfaltowa–opona). Cztery niezależne parametry służą do definicji geometrii kontaktu. Jak oznaczono na schemacie (Rysunek 1) są to parametry powierzchni szyny s_r i u_r oraz powierzchni koła s_w i u_w . [43].



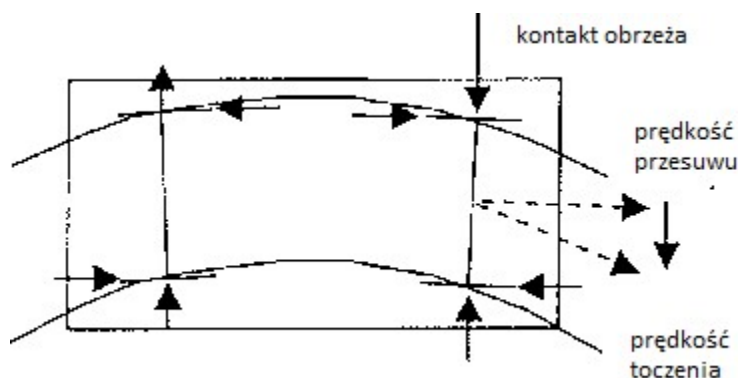
Rysunek 1 Parametry interakcji koło/szlina [43]

Dodatkowe drgania generowane w tej płaszczyźnie – wzmacniające drgania na styku powierzchni występują na łuku poziomym toru przez chwilowe poprzeczne siły występujące przy pokonywaniu łuku poziomego przez tabor.

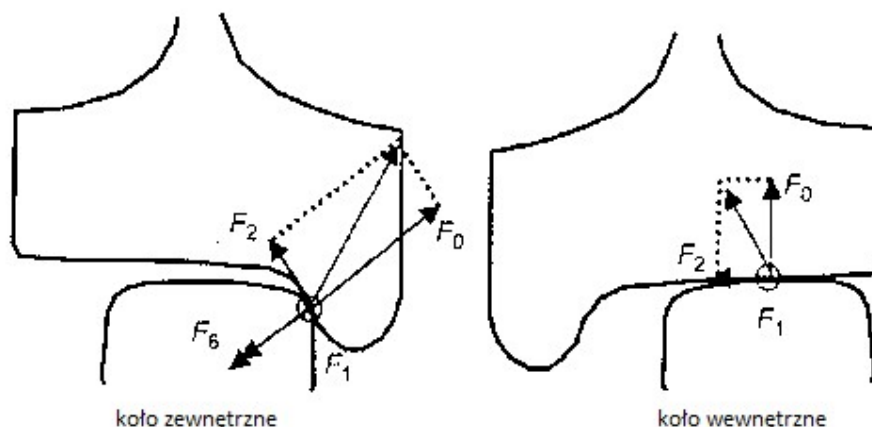
Określa się trzy możliwe mechanizmy wzbudzenia tych dodatkowych drgań – wszystkie spowodowane drganiami ciernymi na styku koła z szyną:

- wpływy boczne między powierzchnią toczną koła a górną częścią główki szyny,
- tarcie obrzeża koła o boczną część główki szyny,
- wzdluzny przesuw na styku powierzchni toczonej koła z powodu różnic w poślizgu [41, 44].

Siły generujące drgania na łuku schematycznie przedstawiono na poniższych schematach (Rysunek 2 i Rysunek 3).



Rysunek 2 Siły działające na wózek w łuku [41]



Rysunek 3 Siły działające na styku koła z szyną w łuku [41]

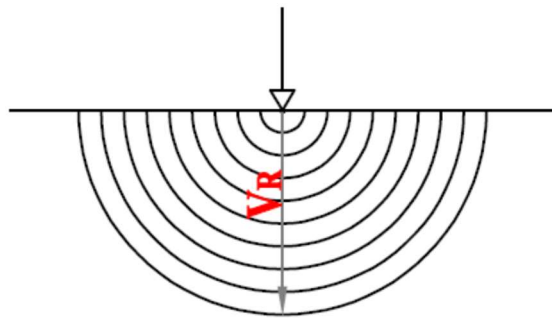
3.2 Obciążenie ruchome

Podczas jazdy pociągów na założeniu nieidealnie kołach i torach, które w trakcie eksploatacji ulegają coraz większej degradacji pociągi generują dynamiczne obciążenia wibracyjne torów kolejowych, które z kolei generują drgania toru i otaczającego gruntu. Drgania podłoża spowodowane przez nieregularności kół i toru oraz odpowiadające im obciążenia dynamiczne zostały szeroko opisane w literaturze, gdzie stwierdzono, że główną przyczyną drgań gruntu są obciążenia dynamiczne [45, 46]. Celem matematycznego opisu rzeczywistości przedmiotowe zagadnienie analizuje się jako uproszczony modelu nawierzchni (belka na sprężystym podłożu) przy obciążeniu ruchomym, co rozważane jest szczegółowo w polskich publikacjach [47-50].

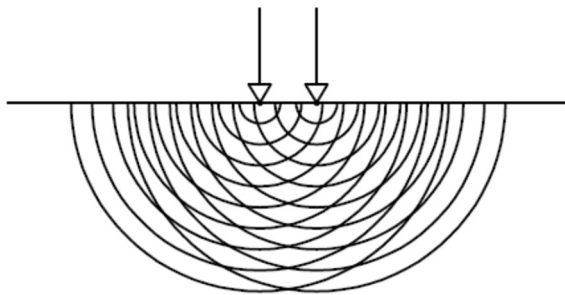
Przeglądu polskich publikacji dotyczących wpływu obciążeń ruchomych na konstrukcje inżynierskie dokonano również w publikacji [51], w której to zagadnienie rozwiązywano metodami analitycznymi i komputerowymi.

Wiele zdarzeń związanych z drganiami sejsmicznymi i parasejsmicznymi (poza drganiami komunikacyjnymi) posiada wspólną cechę – pojedyncze nieruchome źródło – które w uproszczony sposób można przedstawić jak na rysunku poniżej (Rysunek 4). Fala wywołana uderzeniem rozchodzi się w ośrodku. Pierwszą komplikacją drgań wywołanych przejazdami pociągu jest mnoga liczba źródeł drgań – każdy styk koło-szyna stanowi „epicentrum” rozchodzącej się fali (Rysunek 5), które nakładając się wywołują miejscowe wzmocnienia i osłabienia amplitud. Niemniej jednak główną problematyką zagadnienia jest zmienność w czasie i przestrzeni położenia źródła. Pociąg

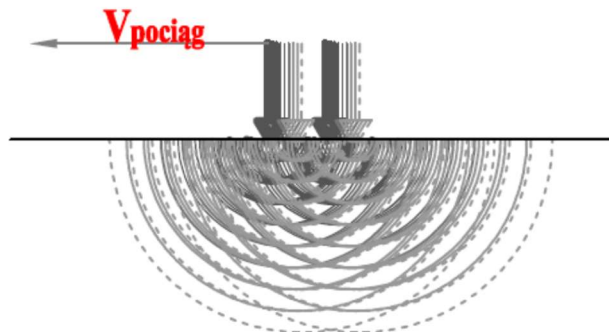
przy założonej prędkości różnej od zera generuje drgania rozprzestrzeniające się z wielu źródeł (kół) o zmiennym położeniu (Rysunek 6). Sytuacja ulega dodatkowemu pogorszeniu, gdy prędkość pociągu osiąga prędkość krytyczną (Rysunek 7). Nakładające się fale propagacji mogą wprowadzić w stan drgań cały układ torowy i wymusić konieczność zamknięcia linii lub ograniczenia prędkości ze względów bezpieczeństwa.



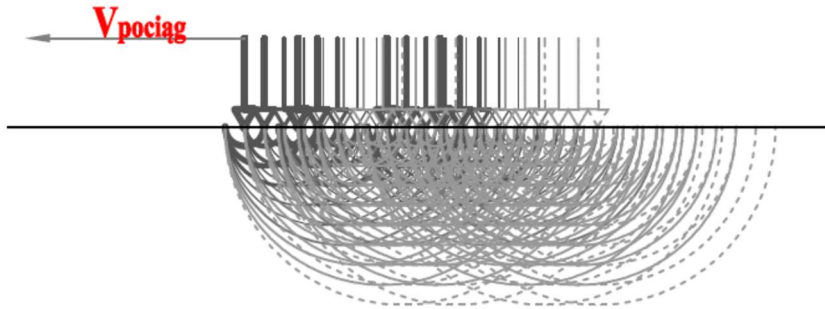
Rysunek 4 Rozprzestrzanie drgań, $v=0$ (opracowanie własne)



Rysunek 5 Rozprzestrzanie drgań przy nakładających się falach z więcej niż jednego źródła, $v=0$ (opracowanie własne)



Rysunek 6 Rozprzestrzanie drgań przy ruchomych źródłach, prędkość pociągu mniejsza od prędkości fali (opracowanie własne)



Rysunek 7 Rozprzestrzenianie drgań przy ruchomych źródłach, prędkość pociągu równa prędkości fali (opracowanie własne)

Wraz ze wzrostem prędkości pociągu i przy stałych parametrach gruntowych wzrasta ryzyko wystąpienia na linii dużych przemieszczeń toru, powszechnie określanych jako krytyczne skutki prędkości. Zjawisko to występuje, gdy prędkość pociągu zbliża się do prędkości fal powierzchniowych (Rayleigha) w podłożu (Rysunek 7). Przy pewnej proporcji tej prędkości ugięcia toru zaczynają rosnać powyżej wartości obciążenia statycznego, osiągając maksimum przy „krytycznej” prędkości. Większe ugięcia podtorza mogą powodować zwiększone tempo degradacji toru, zwiększone potrzeby konserwacyjne, a nawet w najgorszych przypadkach zagrożenie dla bezpieczeństwa. Z tego względu istotne jest wyznaczenie, które miejsca są podatne na krytyczne efekty prędkości i określenie prędkości progowych, powyżej których następują lawinowe zjawiska związane z destrukcyjnym działaniem propagacji drgań. W przypadku zidentyfikowania przekroczenia tych progów można rozważyć środki minimalizujące wpływy dynamiczne. Wiarygodne przewidywanie skutków prędkości krytycznej przy użyciu modelowania numerycznego i innych narzędzi analitycznych wymaga wyboru reprezentatywnego modelu gruntu i parametrów [52].

3.3 Propagacja drgań w gruncie

Podstawowe równania i wzory opisujące proces propagacji drgań w podłożu opierają się na założeniu rozchodzenia drgań w ośrodku ruchem falowym. Rozważanym w pracy ośrodkiem jest podłoże gruntowe, natomiast fale rozchodzą się jako fale sprężyste tzn. w przypadku małych zaburzeń drgania nie są związane z przenoszeniem się cząstek substancji i nie pozostawiają żadnych zmian trwałych w ośrodku propagacji.

Rozprzestrzenianie się fal w jednorodnej i izotropowej półprzestrzeni sprężystej opisana jest zależnościami podanymi w publikacjach [42, 53, 54]:

(3.3-1)

$$\nabla^2 - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 f}{\partial t^2} = 0$$

gdzie:

- $f=f(x,y,z,t)$ – dowolna funkcja,
- ∇^2 – operator Laplace'a,
- v – stała,
- t – czas.

Z podanych zależności określa się prędkość rozchodzenia się fali podłużnej V_P oraz poprzecznej V_S .

(3.3-2)

$$V_P = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}}$$

(3.3-3)

$$V_S = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$$

gdzie:

- μ – współczynnik sztywności,
- ρ – gęstość ośrodka,
- λ – współczynnik Lamego.

Prędkości fali V_P i V_S zależne są jedynie od ośrodka gruntowego tj. jego stałych sprężystych i gęstości:

(3.3-4)

$$V_P = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)\rho}}$$

$$V_S = \sqrt{\frac{E}{2(1+\nu)\rho}}$$

gdzie:

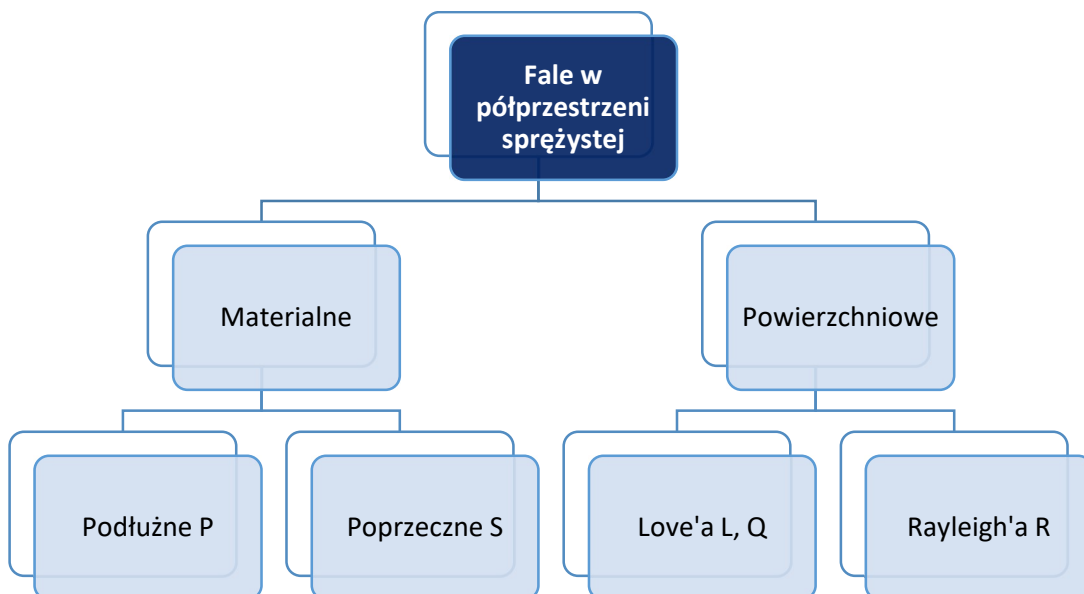
- E – moduł sprężystości podłużnej Younga,
 ρ – gęstość ośrodka,
 ν – współczynnik (liczba) Poissona.

Fale V_P i V_S stanowią jedną z grup fal parasejsmicznych – tzw. fale objętościowe. Drugą grupę stanowią fale powierzchniowe powstałe w wyniku nakładania się – interferencji fal przestrzennych, tak powstałe fale to m. in. fala Rayleigh'a i Lova. Prędkości fali Rayleigha można opisać wzorem:

$$V_R = V_S \frac{0,862+1,14\nu}{1+\nu}$$

gdzie:

- V_R – prędkość fali Rayleigh'a
 V_S – prędkość fali poprzecznej
 ν – współczynnik (liczba) Poissona



Rysunek 8 Podział fal parasejsmicznych [55]

Podział fal parasejsmicznych przedstawiono na rysunku (Rysunek 8) i opisano w tabeli (Tabela 1).

Tabela 1 Charakterystyka fal parasejsmicznych [55]

Oznaczenie	Charakterystyka fal	Prędkość
P	Fala podłużna (dylatacja) - naprzemienne ściskanie i rozluźnianie podłoża w kierunku propagacji. Fala posiada małą amplitudę, przez co towarzyszy jej mniej destrukcyjne oddziaływanie niż w przypadku fal typu S, L, R.	V_P
S	Fala poprzeczna (skrętna) spolaryzowana poziomo opisana jako przemieszczanie się gruntu prostopadłe do kierunku propagacji. Fala ta ma kilkukrotnie większą amplitudę niż fala typu P, lecz szybko zanika w środowisku podatnym.	$V_S \approx 0,6V_P$
L	Poziomo spolaryzowana fala poprzeczna, wywołuje drgania poziome gruntu, prostopadłe do kierunku rozchodzenia się fal.	$V_R < V_L < V_S < V_P$
R	Falę opisuje kombinacja kompresji wzdłużnej i dylatacji, co skutkuje eliptycznymi przemieszczeniami powierzchni w płaszczyźnie pionowej w kierunku rozchodzenia się fal.	$V_R \approx 0,9V_S$

Pomimo teoretycznie prostych wzorów opisanych powyżej propagacja drgań w gruncie jest zjawiskiem złożonym i zależnym od wielu czynników. Jedną z głównych przyczyn problemu niejednorodności wyników jest stosowanie założeń klasycznej teorii sprężystości, podczas gdy badany ośrodek gruntowy odbiega strukturą od modelu ciała Hooke'a. Cechy sprężystości gruntów występujących na drodze propagacji fali można określić poprzez założenia literaturowe lub na drodze badań „in situ” – co jest bardziej rzetelną metodą. Cechy dynamiczne danego ośrodka propagacji oraz zakres częstotliwościowego spektrum wymuszenia mają swoje odzwierciedlenie w wielkości drgań w danym punkcie na powierzchni propagacji. Rozproszenie energii wraz ze wzrostem odległości epicentralnej, zwiększenie frontu fali, a co za tym idzie spadek gęstości fali i dalej zmniejszenie amplitud drgań powodowane jest przez tłumienie geometryczne. Fale podłużne i poprzeczne rozchodzą się ze znaczną prędkością, toteż bardzo szybko zanikają wraz ze wzrostem odległości. Natomiast wolniejsza i niosąca większą energię fala Rayleigha maleje proporcjonalnie do pierwiastka kwadratowego

z odległości [42] [54]. To właśnie ten rodzaj fali, niosąc za sobą ok. 67 % energii całej fali (fale S – 26%, fale P – 7 %) jest głównym nośnikiem drgań toru linii kolejowej i pobliskich konstrukcji stanowiąc główny wyznacznik dla prędkości krytycznej pociągu [56][57].

Wspomniane wcześniej tłumienie geometryczne dla punktowego źródła drgań można wyznaczyć zgodnie ze wzorem [42]:

(3.3-7)

$$A_r = A_0 \cdot \left(\frac{r_0}{r}\right)^n$$

gdzie:

r, r_0 – odległości epicentralna do punktu, w którym określa się amplitudę i punktu o znanej amplitudzie,

A_0, A_r – amplitudy drgań w odległości odpowiednio r_0 i r od źródła,

n – współczynnik rozbieżności przyjmowany ($n=0,5$ dla fal Rayleigha i $n=1$ dla fal powierzchniowych P i S).

Drugim czynnikiem wywołującym spadek drgań w gruncie w zależności od odległości jest absorpcja. Wysokoczęstotliwościowe drgania są znacznie bardziej pochłaniane niż drgania niższych częstotliwości przez co spektra fal przybierają bardziej niskoczęstotliwościowe postaci wraz ze wzrostem odległości.

Tłumienie związane z absorpcją można zapisać wzorem [53]:

(3.3-8)

$$A_r = A_0 \cdot e^{-\alpha(r-r_0)}$$

gdzie:

α – współczynnik absorpcji fal [1/m], przyjmowany w zależności od rodzaju gruntu (0,01-0,1) wg krzywej Barkana

Zanik drgań w gruncie związany jest nie tylko ze wzrostem odległości epicentralnej (tłumienie geometryczne i absorpcja) ale również z czasem (tłumienie wewnętrzne). Spadek drgań związanych z tym zjawiskiem można oznaczyć jako logarytmiczny dekrement tłumienia wyznaczany ze wzoru [53]:

$$\delta = \ln \left[\frac{1}{k} \sum_{n=1}^k \frac{A_n}{A_{n+1}} \right]$$

gdzie:

A – następujące po sobie amplitudy tego samego znaku,

k – liczba uwzględnianych amplitud.

3.4 Przenoszenie drgań na konstrukcje budynków

Budynek jako odbiornik drgań stanowi ostatni element na drodze propagacji fali. Drgania docierają do niego w formie zniekształconej zależnie od warunków mechaniczno fizycznych drogi propagacji. Szkodliwe efekty w konstrukcjach spowodowane są przekazywaniem się drgań ośrodka gruntowego na obiekt.

Za miarę redukcji na styku grunt budynek na podstawie przeprowadzonych badań zgodnie z literaturą przyjmuje się współczynnik amplitudalnej redukcji zdefiniowany wg wzoru [42]:

(3.4-1)

$$W_R = \frac{A_{gmax} - A_{bmax}}{A_{gmax}} 100\%$$

gdzie:

W_R - współczynnik amplitudalnej redukcji

A_{gmax} - maksymalna amplituda drgań gruntu przed budynkiem

A_{bmax} - maksymalna amplituda drgań budynku w poziomie terenu

Przykładowy opis przenoszenia drgań z gruntu na konstrukcje można znaleźć w publikacjach naukowych [58-60].

4 Badania in situ propagacji drgań w gruncie i wpływu na budynki

Mnogość cech i zmiennych fizycznych jak i konieczne do spełnienia warunki celem przeprowadzenia badań, których nie da się odtworzyć w warunkach laboratoryjnych wymusza wybór odpowiedniego poligonu pomiarowego. Celem przeprowadzenia badań przyjęto założenia:

- Tor kolejowy długości odpowiedniej do rozpędzenia pociągu do ok. 300 km/h w przekroju pomiarowym (lokalizacji czujników).
- Geometria toru, urządzenia sterowania ruchem oraz sieć trakcyjna pozwalające osiągnąć odpowiednie prędkości.
- Wyizolowanie linii kolejowej poprzez zamknięcia torowe dla kursowania innych jednostek celem zminimalizowania wpływu tła pomiarowego oraz ze względów bezpieczeństwa.
- Podłoże o względnie poziomej powierzchni (teren nie górzysty).
- Tabor w stanie bardzo dobrym (niegenerujący dodatkowego obciążenia dynamicznego złym stanem technicznym).
- Brak innych wpływów zewnętrznych, które mogłyby zakłócić pomiary, np. okoliczny transport lub inne generatory drgań.
- Możliwość wykonania kompleksowych badań nieniszczących (np. pomiary drgań, hałasu, odkształceń toru) i niszczących (badania geotechniczne).
- Przejazdy pociągu z dedykowanymi prędkościami.

Powyższe założenia zostały spełnione przy rozpoczęciu eksploatacji pociągów Pendolino (dalej zwanych zamiennie również EMU 250). Jako obszar pomiarowy wybrano odcinek Psary – Góra Włodowska (długości około 36 km) znajdujący się w ciągu linii kolejowej nr 4 (Centralnej Magistrali Kolejowej), który jako jedyny w Polsce spełniał warunki niezbędne do uzyskania zakładanych prędkości, znacznie przekraczających prędkości rozkładowe. Na linii wyznaczono 3 różne przekroje stanowiące poligony pomiarowe. Lokalizację testowej trasy składu kolejowego przedstawiono na mapie (Rysunek 9).

Podczas testów mierzono m. in. przyspieszenia i przemieszczenia szyn, drgania mechaniczne poszczególnych elementów nawierzchni kolejowej oraz hałas. Analizie

poddano również warunki geotechniczne w otoczeniu Centralnej Magistrali Kolejowej. Pomiary prowadzono na zamkniętym dla rozkładowej eksploatacji odcinku linii kolejowej. W dni „nie testowe” dokonano analogicznych badań dla jednostek rozkładowo kursujących po wyżej wymienionym odcinku CMK. Analizy i badania związane z testami Pendolino, nie będące bezpośrednio tematem rozprawy można znaleźć m. in. w publikacjach naukowych i raportach z badań [50, 61-63] również współautorstwa doktorantki [64-65].



Rysunek 9 Lokalizacja poligonu pomiarowego na linii kolejowej nr 4 [66]

Po 5 latach eksploatacji pociągu Pendolino przeprowadzono analogiczne badania. Pomiary odbyły się na jednym z trzech poligonów. Odtworzono analogiczny tor pomiarowy. Pociągi podczas badań kursowały zgodnie z rozkładem jazdy. Prędkości mierzono za pomocą radaru prędkości. W skład kursujących jednostek wchodziły m. in. pociągi Pendolino (po pięcioletniej eksploatacji) oraz inne jednostki przewoźników InterCity i InterREGIO. W stosunku do poprzednich badań niezmiennymi czynnikami były: poligon, tor pomiarowy, analizowany budynek, aparatura oraz rodzaj taboru.

Badania poligonowe przeprowadzono przy udziale autorki rozprawy. Przedstawiony program interpretacyjno - pomiarowy jest autorskim planem doktorantki.

4.1 Metodyka badań

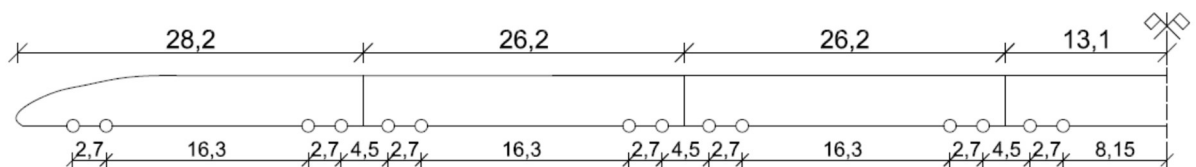
Badania drgań przeprowadzono z udziałem autorki zgodnie z normatywnymi standardami opisanymi w PN-B-02170:2016-12 [22] oraz wiedzą i doświadczeniem wg poniższej specyfikacji szczegółowej.

4.1.1 Źródła drgań

Głównym źródłem drgań, będącym przedmiotem rozprawy były przejazdy pociągu Pendolino (Alstom Pendolino EMU 250). Pociąg kursował z dedykowanymi prędkościami (40 – 293 km/h). Pojazd został dociążony odważnikami w celu uzyskania efektów przejazdu pociągu o maksymalnym napelnieniu pasażerskim (ok. 440 t) (Rysunek 10). Pociąg w trakcie pomiarów był jednostką nową, nie użytowaną wcześniej przez pasażerów. Rozstaw wózków i kół oraz długości poszczególnych członów schematycznie przedstawiono na rysunku (Rysunek 11) oraz poglądowo na zdjęciu (Rysunek 12). W tabeli (Tabela 2) przedstawiono dane charakterystyczne analizowanego pociągu.



Rysunek 10 Obciążenie pociągu symulujące pełne napelnienie [49]



Rysunek 11 Schemat układu wózków i członów pociągu Pendolino (opracowanie własne)



Rysunek 12 Pociąg Pendolino (EMU 250) (opracowanie własne)

Tabela 2 Dane techniczne pociągu EMU 250 [67]

Dane techniczne pojazdu PENDOLINO	
Typ pojazdu	Alstom Pendolino ETR610
Szerokość toru	1435 mm
Moc napędu	5,664 MW
Napięcia zasilania	3 kV DC, 15 kV AC, 25 kV AC
Szerokość pudła	2830 mm
Wysokość pudła	4100 mm
Wysokość podłogi nad główką szyny	1260 mm
Długość członu skrajnego	28200 mm
Długość członu środkowego	26200 mm
Rozstaw osi wózka	2700 mm
Masa pociągu	395,5 t
Masa obciążonego pociągu	447,7 t
Średnie przyspieszenie od 0 do 40 km/h	0,49 m/s ²
Średnie przyspieszenie od 0 do 120 km/h	0,46 m/s ²
Minimalny promień łuku	250 m
Liczba miejsc siedzących	402
Obciążenie całkowite	78,329 kN/koło

Celem porównania przeprowadzono badania rozkładowo kursujących pociągów przewoźników InterCity (z lokomotywą Husarz), InterREGIO, pociągu towarowego oraz drezyny pomiarowej. Pociągu kursowały z rozkładową prędkością zarówno w pierwszych badaniach (2013 r.) jak i porównawczych po 5 latach (2018 r.). Dla ujednoczenia w dalszej części opracowania pociągi przewoźnika InterCity (poza pociągami Pendolino) oznaczane będą umownie nazwą InterCity i analogicznie pociągi przewoźnika InterREGIO.

Dla uzyskania charakterystyki dynamicznej poligonów wykonano pomiary drgań wzbudzanych uderzeniami młotka modalnego w poszczególne elementy nawierzchni kolejowej.

Nawierzchnia kolejowa na której przeprowadzono badania została odpowiednio odnowiona przed przeprowadzeniem testów, jednak prace nie miały charakteru modernizacji a jedynie renowacji.

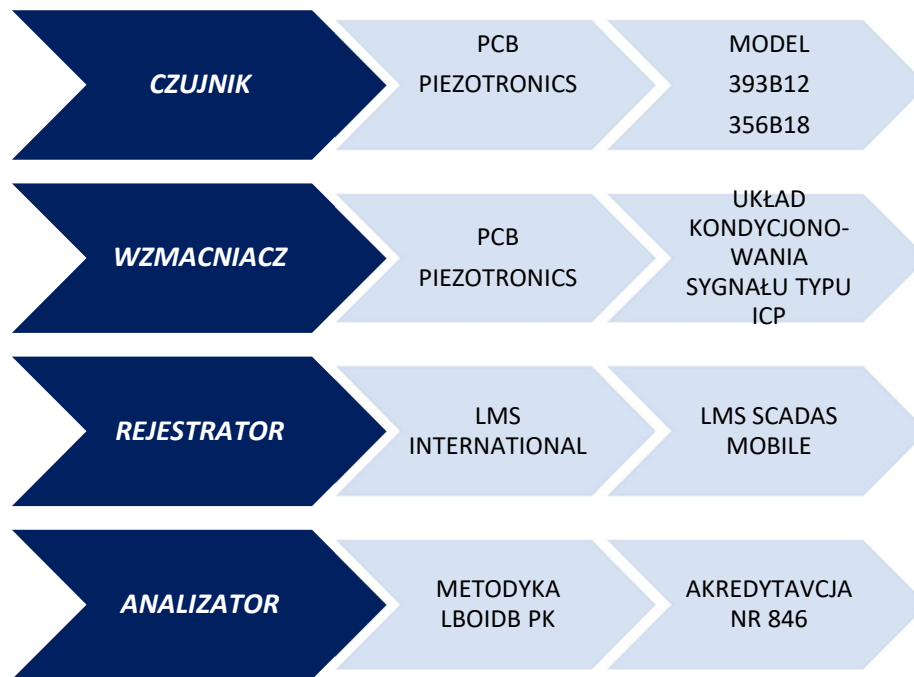
4.1.2 Aparatura pomiarowa

W badaniach użyto aparaturę spełniającą wytyczne normy PN-B-02170:2016-12 w zakresie sprzętu do pomiarów drgań. Zestaw pomiarowy dobrano do wybranego do pomiaru parametru drgań oraz przewidywanego zakresu zmiany jego wartości. Zestaw podstawowy aparatury do pomiaru drgań składa się z:

- czujników pomiarowych (akcelerometry o czułości nie mniejszej niż 1 V/g, przy zalecanej czułości 10 V/g, lub geofony o czułości nie mniejszej niż 15 V/m/s),
- rejestratora i/lub analizatora.

Zgodnie z przedmiotową normą niepewność standardowa wskazań całego toru pomiarowego nie może przekraczać 20%. Obowiązkowa jest rejestracja wyników pomiarów w postaci wibrogramów. Analiza powinna zostać przeprowadzana z uwzględnieniem wymagań dotyczących czasu trwania drgań zdefiniowanego w przedmiotowej normie. Zastosowany zestaw pomiarowy powinien umożliwić rejestrację i analizę wartości szczytowej mierzonego parametru. [22]

Mając na uwadze powyższe przyjęto aparaturę pomiarową oraz rozstawiono tor pomiarowy składający się zgodnie ze schematem (Rysunek 13) z czterech zasadniczych elementów: czujników, wzmacniacza, rejestratora i analizatora.



Rysunek 13 Tor pomiarowy [68][42]

Czujniki

W pomiarach drgań gruntu i budynku wykorzystano akcelerometry piezoelektryczne firmy PCB Piezotronics (Rysunek 14) – czujniki przyspieszenia drgań do pomiarów parasejsmicznych – MODEL – 393B12 o parametrach [69]:

- Czułość: $(\pm 10\%)10000 \text{ mV/g}$ ($1019,4 \text{ mV}/(\text{m/s}^2)$),
- Rozdzielczość szerokopasmowa: $0,000008 \text{ g rms}$ ($0,00008 \text{ m/s}^2 \text{ rms}$),
- Zakres pomiarowy: $0,5 \text{ g pk}$ ($4,9 \text{ m/s}^2 \text{ pk}$),
- Zakres częstotliwości: $(\pm 5\%) 0,15 \text{ do } 1000 \text{ Hz}$,
- Złącze elektryczne: 2-stykowe MIL-C-5015,
- Waga: 210 g,

oraz trójosiowy MODEL – 356B18 o parametrach:

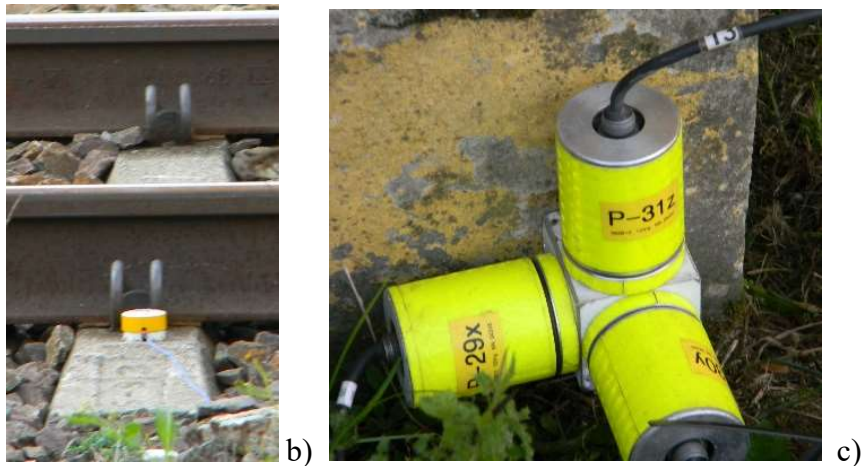
- Czułość: $(\pm 10\%)1000 \text{ mV/g}$ ($102 \text{ mV}/(\text{m/s}^2)$),
- Zakres pomiarowy: $\pm 5 \text{ g pk}$ ($\pm 49 \text{ m/s}^2 \text{ pk}$),
- Złącze elektryczne: 1/4-28 4-stykowe.



Rysunek 14 Akcelerometry piezoelektryczne PCB Piezotronics – model 393B12 i 356B18 [69]

W trakcie każdego z pomiarów jednocześnie 27 czujników rejestrowało drgania w różnych punktach i płaszczyznach poligonu. Zdjęcia (Rysunek 15) przedstawiają przykładowe czujniki umieszczone na poligonie pomiarowym w trakcie badań. Istotność weryfikacji i kalibracji wskazań czujników w warunkach laboratoryjnych przed dokonaniem pomiarów oraz wpływ substancji mocujących na wyniki pomiarów opisano szerzej w innych publikacjach autorki rozprawy [70, 71].

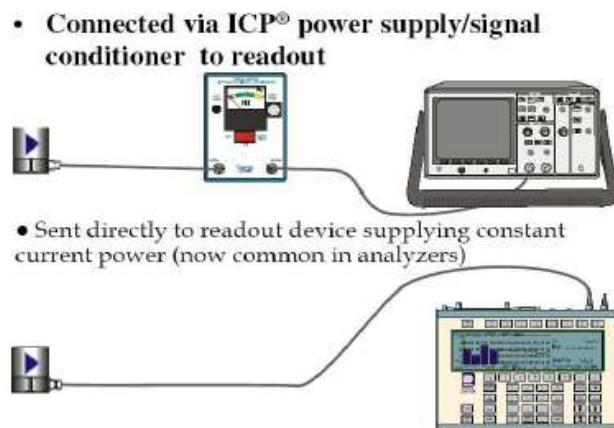




Rysunek 15 Przykładowe lokalizacje czujników w trakcie pomiarów drgań: (a) czujnik na krzyżaku na gruncie, (b) czujnik na podkładzie kolejowym, (c) czujnik na budynku (opracowanie własne)

Wzmacniacz

Celem uzyskania stabilnych wyników poprzez zamianę sygnału prądowego na napięciowy wymagane jest zastosowanie wzmacniacza, którego rolę w trakcie pomiarów pełnił standardowy system układu kondycjonowania sygnału typu ICP – firmy PCB [69], którego schemat przedstawiono poniżej (Rysunek 16).



Rysunek 16 Schemat standardu zasilania ICP [69]

Rejestrator

Celem rejestracji wyników zastosowano analizator SCADAS Mobile firmy LMS International (Rysunek 17). Specjalistyczne urządzenie zaprojektowane do pomiarów w trudnych warunkach terenowych, charakteryzuje się zestawem cech [72]:

- Możliwość jednoczesnej rejestracji od 8 do 216 kanałów w jednej ramce.

- Kompaktowy rozmiar i niska waga dla optymalnej mobilności.
- Konstrukcja przystosowana do trudnych warunków i wysokich temperatur.
- MIL-STD-810F zakwalifikowany do wstrząsów i wibracji.
- Konfiguracje master-slave dla systemów rozproszonych i rozszerzenia kanałów.
- Częstotliwość próbkowania do 204,8 kHz na kanał.
- 24-bitowa technologia ADC.
- Zakres dynamiki 150 dB.
- Wbudowany podwójny tachograf i generator sygnału.
- Szybki interfejs hosta Ethernet.

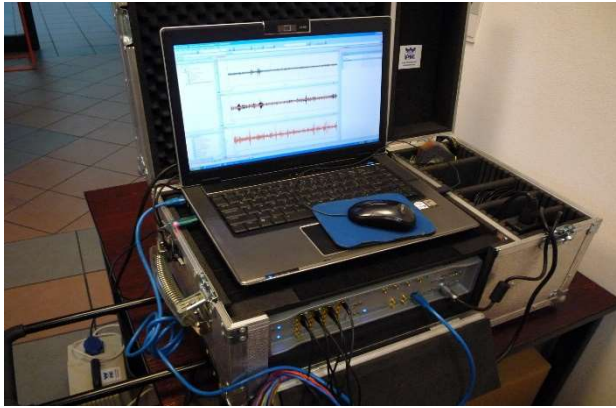


Rysunek 17 LMS SCADAS Mobile [68]

Analizator

Zastosowany system analiz do zapisu i obróbki sygnału wykorzystuje procedury opracowane w Laboratorium Badania Odkształceń i Drgań Budowli w środowisku Matlab. Procedury oraz sposób zestawienia toru pomiarowego podlega ciągłej weryfikacji i certyfikacji Polskiego Centrum Akredytacyjnego (certyfikat nr AB 846), co daje gwarancję wiarygodności przeprowadzanych pomiarów. Na zdjęciu przedstawiono widok panelu sterowania w trakcie trwania pomiarów (Rysunek 18).

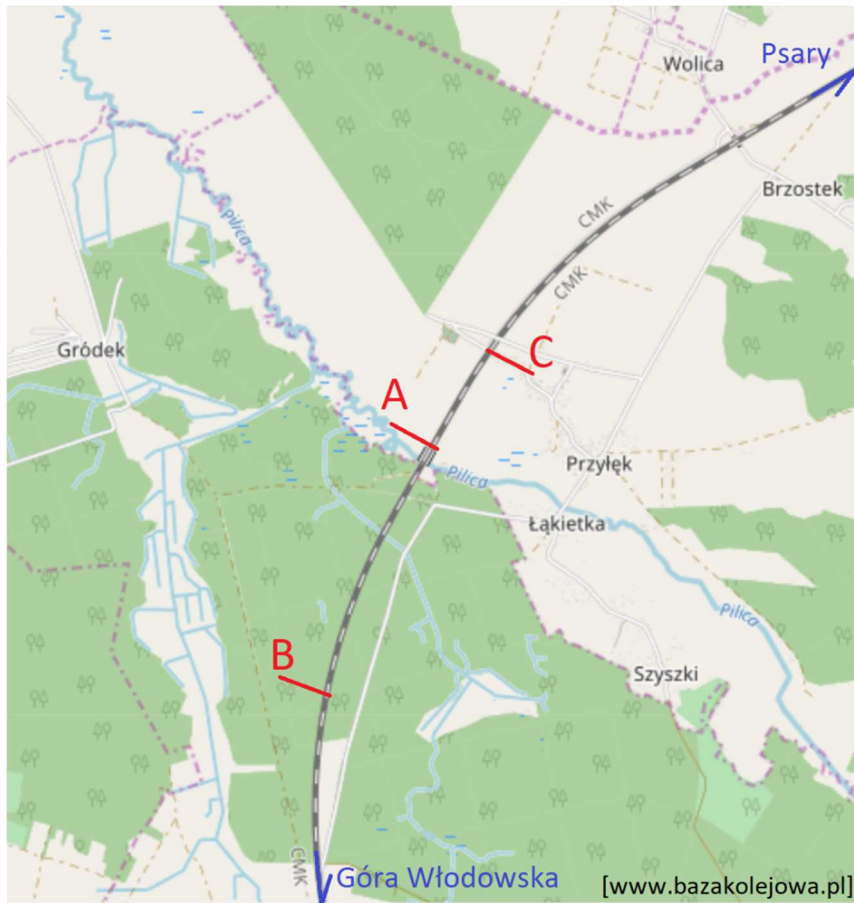
Niepewność standardowa toru pomiarowego wynosiła 11,6%.



Rysunek 18 Układ sterowania i zarządzania torem pomiarowym – widok analizatora w trakcie trwania pomiaru [68]

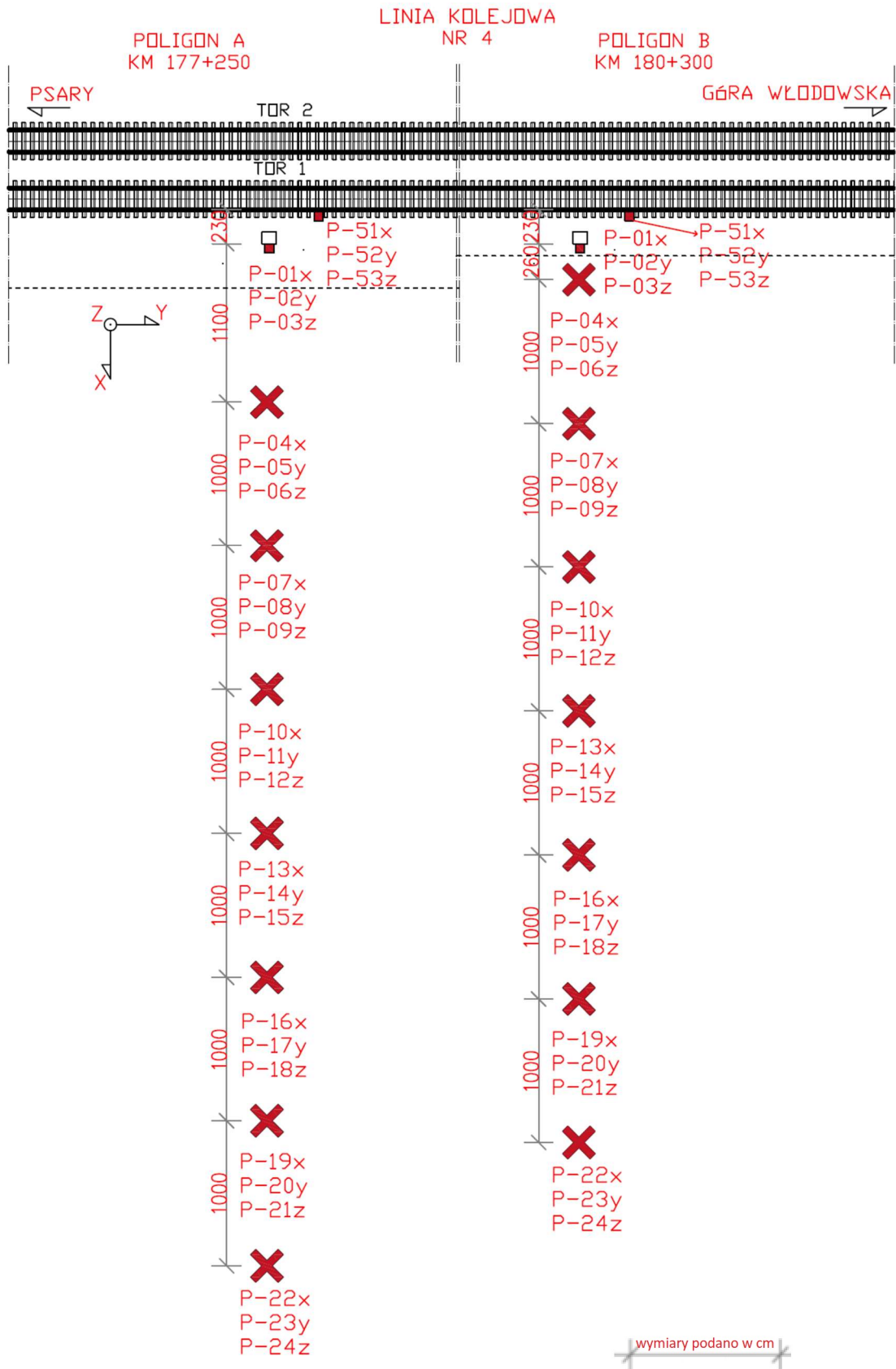
4.2 Opis szczegółowy przeprowadzonych badań

Pomiary podczas kursowania nowych pociągów przeprowadzono w trzech przekrojach linii kolejowej nr 4. Mapa przedstawia lokalizację poligonów pomiarowych (Rysunek 19). Poligony zostały oznaczone zgodnie z chronologią badań kolejno A w km 177,250, B w km 180,300, C w km 176,500 linii kolejowej nr 4. Pomiary wykonane po pięciu latach eksploatacji pociągu odbyły się z powtórzeniem toru pomiarowego i lokalizacji na poligonie C – co oznacza się w pracy jako poligon C'. Pomiary realizowano przy udziale autorki rozprawy. W każdym z pierwotnych poligonów pomiarowych dane rejestrowano przez 27 kanałów równocześnie – 9 punktów trójosiowych (X, Y, Z). Wysokość nasypu przy odpowiednich poligonach pomiarowych nie była jednakowa, co skutkowało różnicą wysokościową położenia odbiorników na gruncie względem główki szyny. Nowy pociąg z dedykowanymi prędkościami poruszał się tylko po torze nr 1, zarówno w kierunku zasadniczym (zgodnym z rosnącym kilometrażem), jak i przeciwnym do zasadniczego. Rozkładowo kursujące pociągi poruszały się po obu torach. Schematy (Rysunek 20, Rysunek 21) przedstawiają rozmieszczenie urządzeń pomiarowych na poligonach (A, B, C, C'), rozmieszczenie czujników oraz ich nomenklaturę.

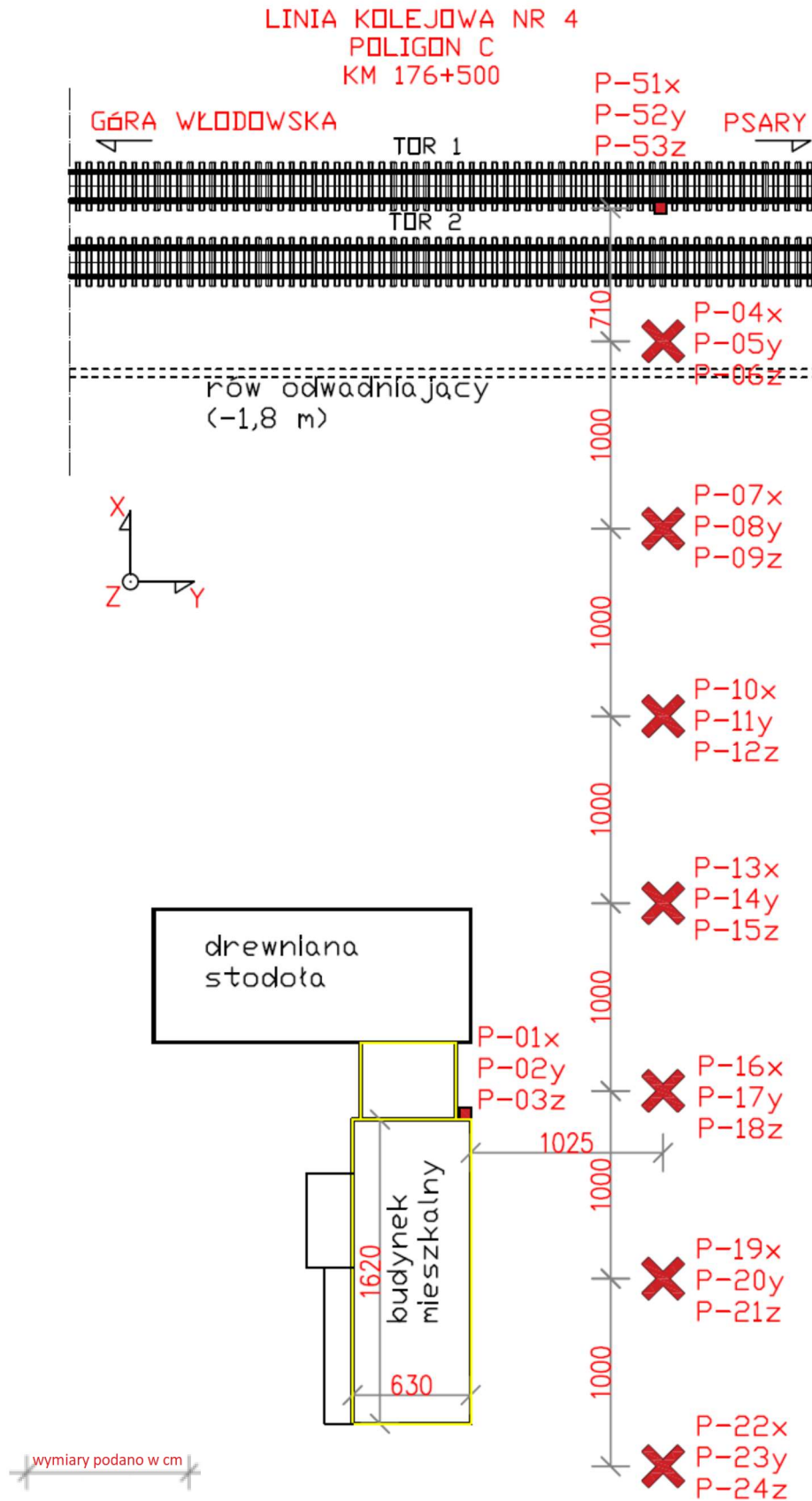


- A** poligon pomiarowy
- lokalizacja przekroju pomiarowego

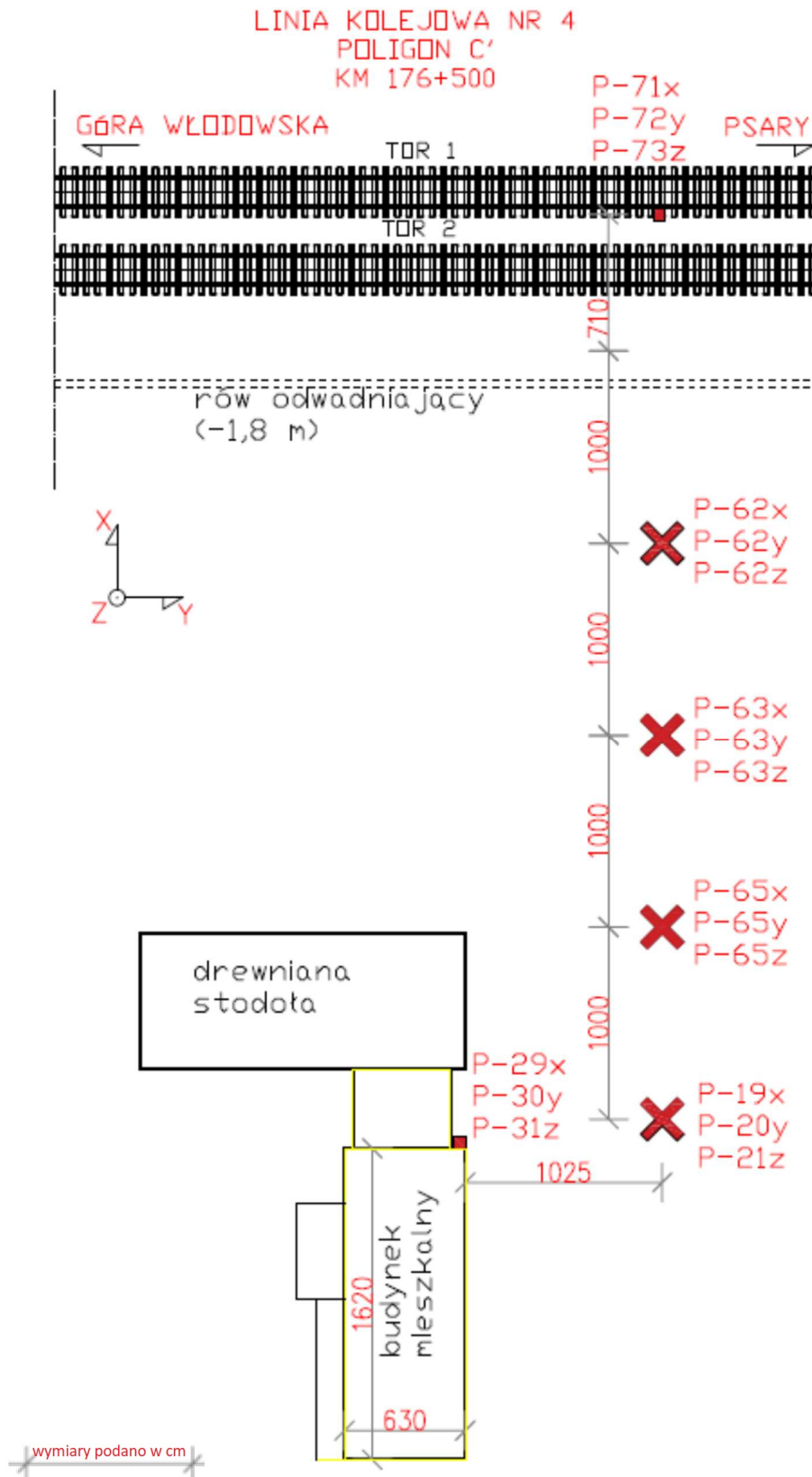
Rysunek 19 Mapa lokalizacji poligonów (opracowanie własne)



Rysunek 20 Schemat rozmieszczenia czujników - poligon A i B (opracowanie własne)



Rysunek 21 Schemat rozmieszczenia czujników - poligon C (opracowanie własne)

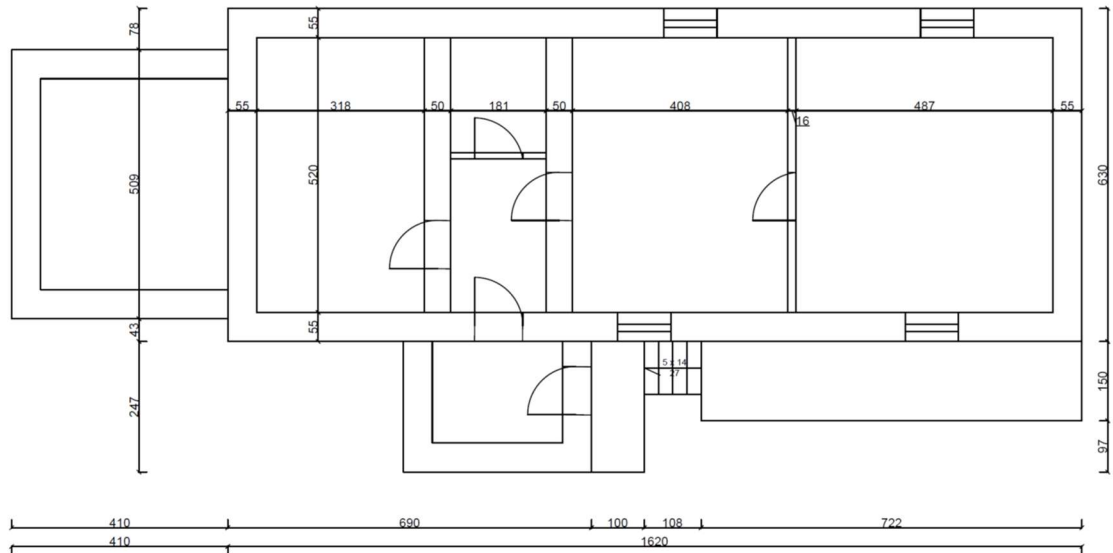


Rysunek 22 Schemat rozmieszczenia czujników - poligon C' (opracowanie własne)

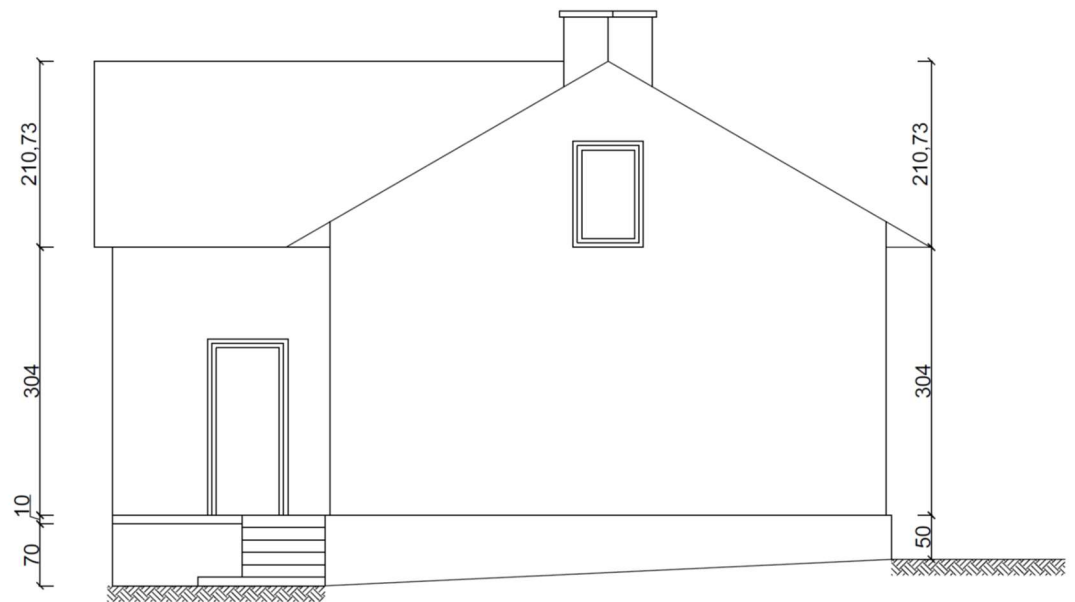
Istotnym aspektem pracy są analizy drgań przenoszonych z ośrodka gruntowego na budynek mieszkalny. Do analiz wybrano budynek znajdujący się na poligonie C/C'. Dane na obiekcie rejestrowano zarówno w pomiarach pierwotnych jak i po 5 latach. Poniżej przedstawiono widok budynku (Rysunek 23). Celem szczegółowej identyfikacji budynku autorka rozprawy przeprowadziła inwentaryzację obiektu, której efekt w postaci rzutów pionowego i poziomego przedstawiono na rysunkach (Rysunek 24 i Rysunek 25).



Rysunek 23 Badany obiekt – poligon C – Przyłek 49 (opracowanie własne)



Rysunek 24 Przekrój poziomy budynku (opracowanie własne)



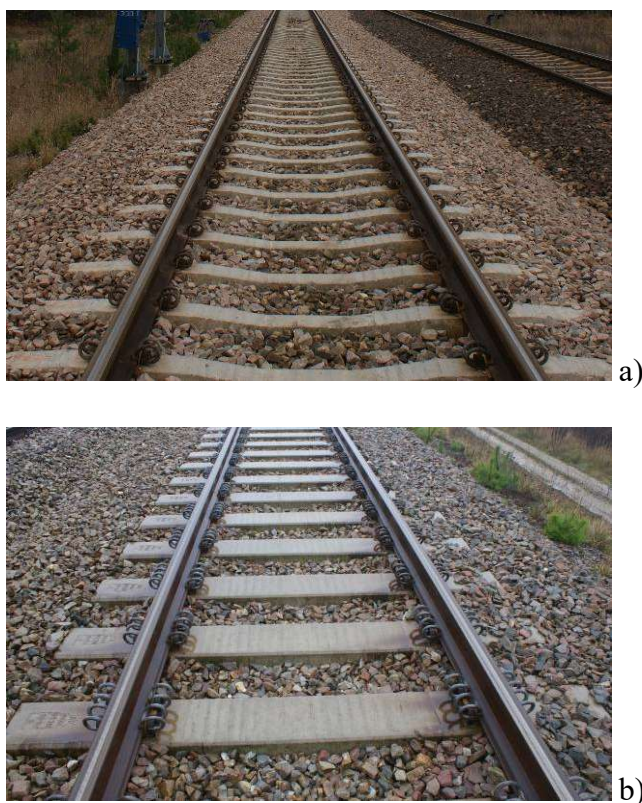
Rysunek 25 Widok z boku budynku (opracowanie własne)

Krótką charakterystykę obiektu podano poniżej:

- funkcja – budynek mieszkalny,
- liczba kondygnacji naziemnych poza poddaszem – 1,
- podpiwniczenie – brak,
- poddasze użytkowe – brak,
- rodzaj konstrukcji – tradycyjna murowana,

- odległość od najbliższego toru (nr 2) – 44 m,
- położenie względem linii kolejowej – km 176,500 linii kolejowej nr 4.

Odcinki testowe różniły się typem zastosowanej nawierzchni oraz geometrią toru kolejowego. We wszystkich analizowanych punktach znajduje się nawierzchnia podsypkowa z szynami 60 E1. Poligony A i C zlokalizowano przy nawierzchni z podkładami typu PS-94 i przytwierdzeniami SB. Poligon B usytuowano przy nawierzchni o podkładach PS-08 i przytwierdzeniach ICOSTRUN – 02. Poligony pomiarowe B i C lokowano na łukach kołowych o promieniu $R=4000$ m i przechyłce o wartości nominalnej 75 mm, natomiast poligon A na odcinku prostym bez przechyłki. Fotografie (Rysunek 26) ukazują nawierzchnię kolejową odcinka testowego w różnych poligonach pomiarowych.



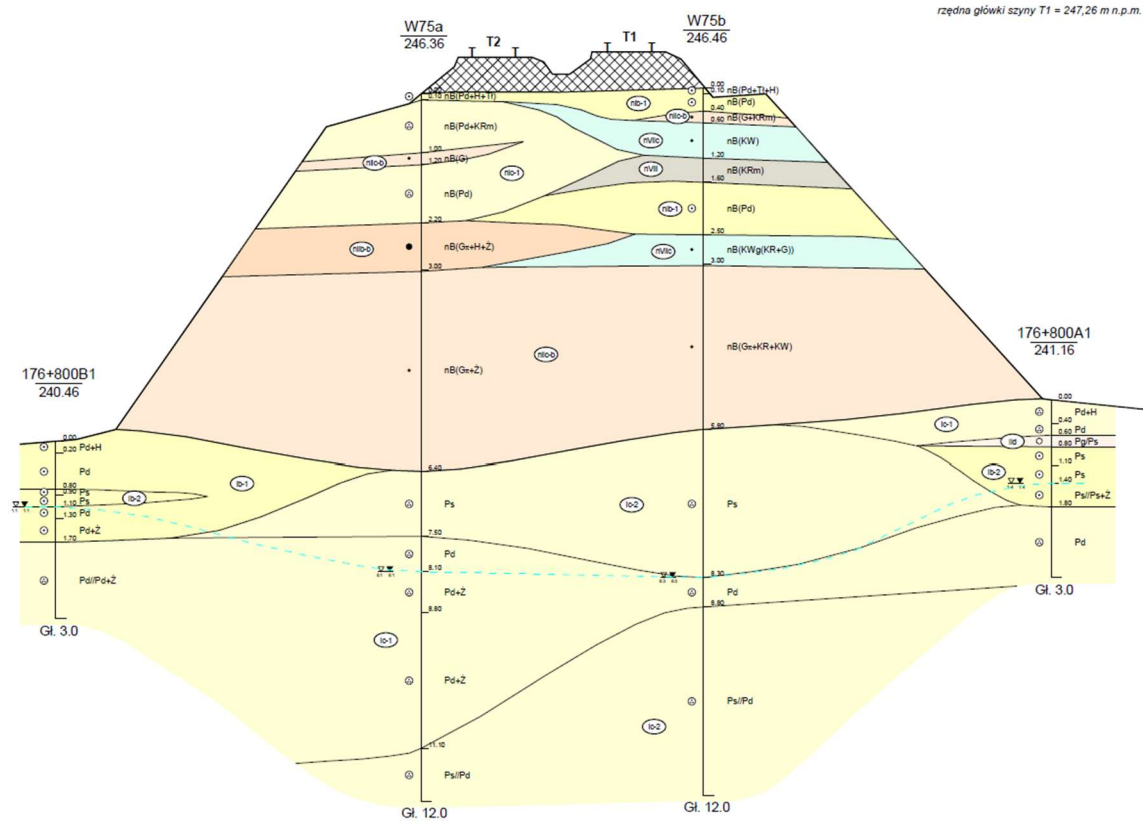
Rysunek 26 Typy nawierzchni kolejowej w przekrojach pomiarowych (a) – poligon A, C b) – poligon B [62]

Podczas pomiarów przyspieszeń drgań gruntu przeprowadzono rozpoznanie warunków gruntowych poprzez wykonanie badań geotechnicznych, w których uczestniczyła również autorka niniejszej dysertacji. W przekrojach pomiarowych badania właściwości gruntu realizowane były u podnóża skarpy kolejowej zlokalizowanej

w sąsiedztwie punktów, w których zamocowano czujniki (akcelerometry). Opis przeprowadzonych badań geotechnicznych przedstawiono w publikacjach [63], [73].

Na podstawie wykonanego badania właściwości gruntu stwierdzono, że podłoże jest uwarstwione. W profilu gruntowym pod cienką warstwą humusu występują grunty naturalne gruboziarniste, niespoiste (utwory piaszczyste, piaszczysto-pyłaste z głębokością przechodzące w piaski ze żwirami, nawiercono pojedyncze przewarstwienia utworami pyłastymi). Tylko w profilu A nawiercono wodę gruntową na głębokości 1,08 m. Na pozostałych przekrojach cały grunt znajduje się w strefie aeracji, a badany grunt uznano za wilgotny i mało wilgotny [63, 73].

Przykładowy przekrój geotechniczny między poligonem A i C przedstawiono na rysunku (Rysunek 27).



Rysunek 27 Przekrój geotechniczny w km 176+800 linii kolejowej nr 4 [74]

5 Analiza sygnału

W trakcie pomiarów zarejestrowano odpowiednio:

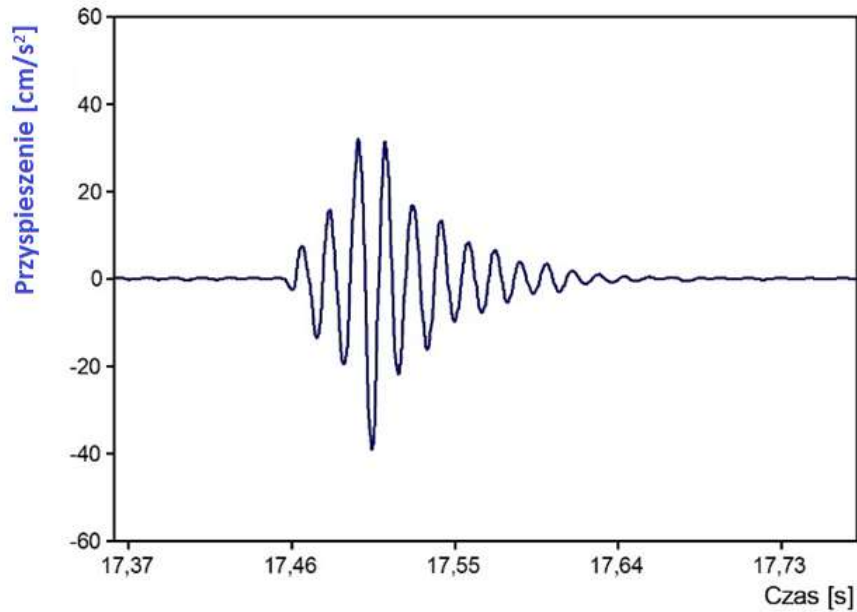
- Poligon A – 37 przejazdów pociągów
- Poligon B – 28 przejazdów pociągów
- Poligon C – 37 przejazdów pociągów
- Poligon C' – 27 przejazdów pociągów

Każdy z przejazdów rejestrowało 27 akcelerometrów. Baza danych do analiz przekroczyła 3000 pojedynczych zdarzeń (rozumianych jako rejestracja w jednym punkcie i kierunku jednego przejazdu) – co stanowi materiał do rzetelnych badań i wyciągnięcia istotnych wniosków z pracy w zakresie badanego zjawiska.

5.1 Podstawowe parametry gruntu – analiza przy użyciu młotka modalnego

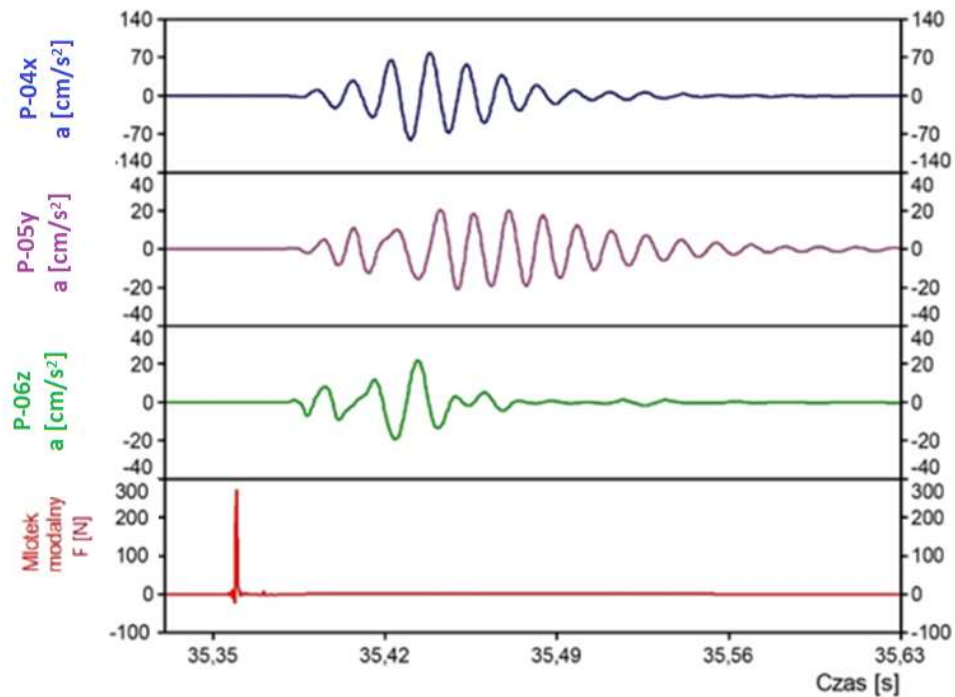
Podstawowe parametry gruntu przy nasypie na poligonie C wyznaczone przy użyciu młotka modalnego, co pozwoliło na wymuszenie impulsu siłowego na testowanej infrastrukturze i dostarczenie sygnału elektrycznego z informacją o częstotliwości i amplitudzie zadanej siły.

Na pierwszym czujniku pod nasypem zarejestrowano drgania, na podstawie których wyznaczono przebieg składowych poziomych drgań x (Rysunek 28) oraz obliczono logarytmiczny dekrement tłumienia grunty w punkcie umiejscowienia czujnika który wyniósł $\delta = 0,4745$.



Rysunek 28 Przebieg czasowy drgań składowej poziomej X – czujnik P-04x – poligon C – młotek modalny (opracowanie własne)

Z odczytów czujnika rejestrującego drgania w trzech wzajemnie prostopadłych kierunkach oraz znając charakter zjawiska i odległość czujnika od miejsca wzbudzenia drgań na podstawie wykresu (Rysunek 29) oszacowano prędkość fali. Najszybsza fala podłużna P, przemieszcza się z prędkością ok. 250 m/s, co jest zbliżone z danymi literaturowymi [42]. Prędkości fali Rayleigha na podstawie otrzymanych wyników, oszacowano na poziomie ok. 115m/s. Przyjmuje się zgodnie z literaturą, że prędkość krytyczna wynosząca $0,7 V_R$ zostanie osiągnięta przy prędkości pociągu ok 290 km/h.

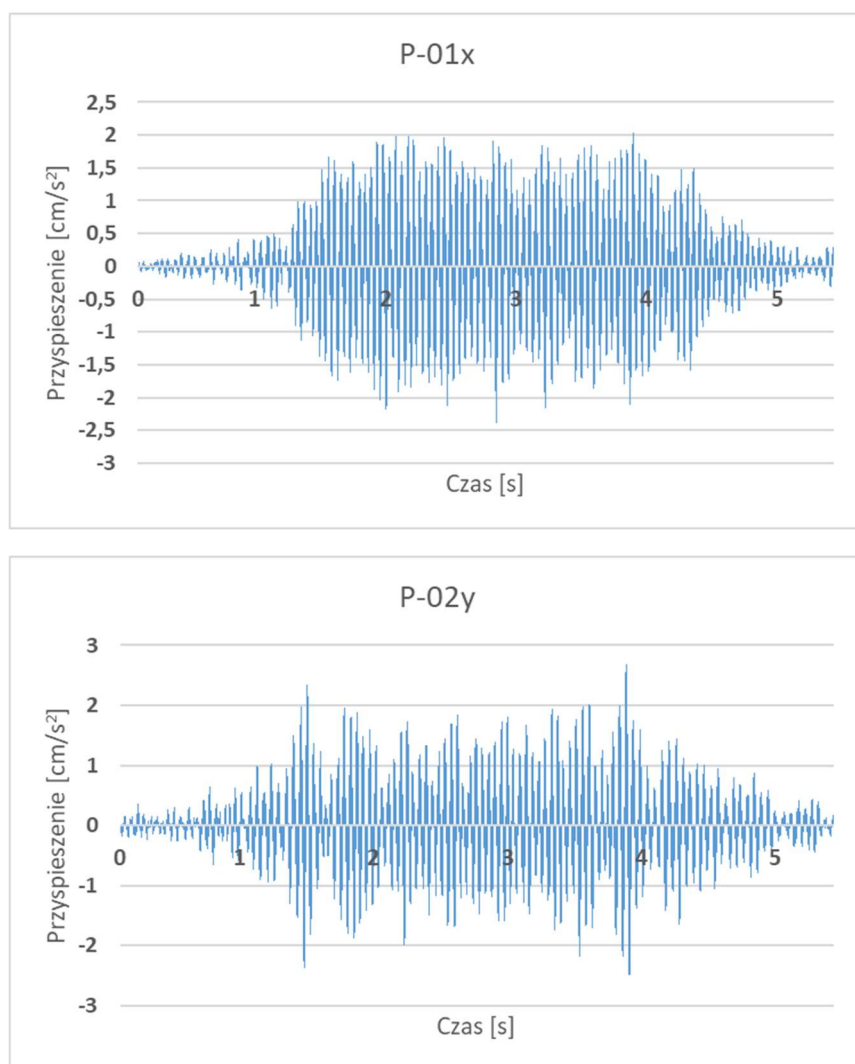


Rysunek 29 Przebiegi czasowe drgań – czujnik P-04x, P-05y, P-06z – poligon C – młotek modalny (opracowanie własne)

5.2 Przebiegi czasowe drgań – analiza wartości maksymalnych

Przeanalizowano wszystkie zarejestrowane przebiegi czasowe celem eliminacji błędnych lub zdeformowanych danych. Ze względu na fakt, że pomiary odbywały się bez osób trzecich, tzn. przypadkowych przechodniów, dużej liczby mieszkańców czy działania urządzeń generujących dodatkowe drgania mogące zakłócić sygnał tylko kilka z ponad 3000 rejestracji uznano za wadliwe i nie nadające się do dalszych analiz.

Podstawowym wykresem otrzymanym bez analiz wprost z pomiarów jest przebieg przyspieszeń drgań w dziedzinie czasu. Przykładowo na rysunku (Rysunek 30) pokazano przebiegi składowych poziomych przyspieszeń drgań X i Y budynku w poziomie terenu generowanych przejazdem pociągu Pendolino z prędkością 250 km/h.

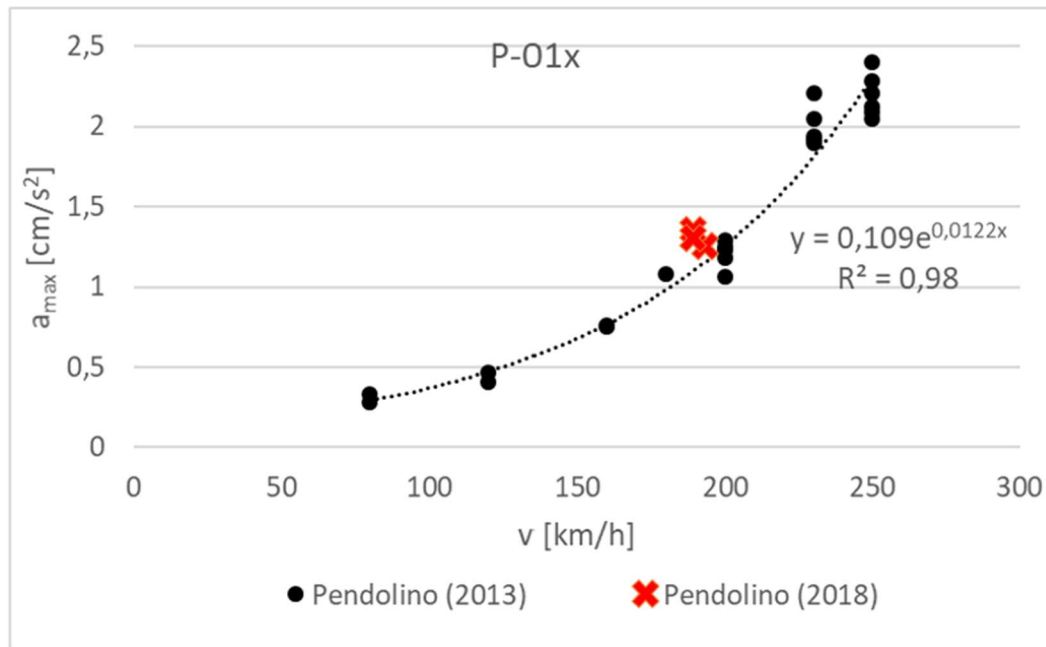


Rysunek 30 Przebiegi czasowe przyspieszeń drgań zarejestrowane na budynku - przejazd pociągu Pendolino - prędkość 250 km/h (opracowanie własne)

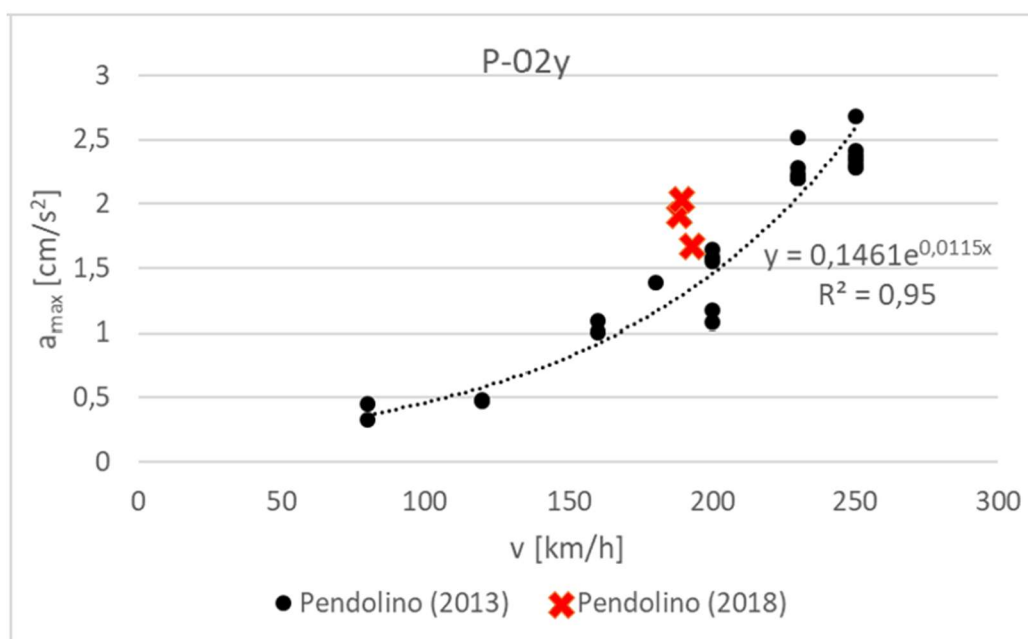
Pierwszą informacją uzyskaną z przebiegu jest a_{max} – maksymalna wartość składowej przyspieszenia drgań w kierunku (X, Y) oraz t – czas trwania drgań (rozumiany jako przedział czasu, w którym drgania uzyskują min 0,2 wartości a_{max}).

Na wykresach (Rysunek 31 i Rysunek 32) przedstawiono wartości a_{max} uzyskane z przebiegów składowych poziomych przyspieszenia drgań wywołanych przejazdami pociągu Pendolino z prędkościami w przedziale 80-250 km/h zarejestrowanych na budynku (poligonu C – czujniki P-01x i P-02y). Dopasowano krzywe wzrostu (funkcja wykładnicza) maksymalnego przyspieszenia drgań w funkcji prędkości pociągu. Funkcja ta opisuje zależność maksymalnej wartości przyspieszenia drgań od prędkości pociągu. Wartości współczynnika determinacji R^2 dla obu tak wyznaczonych funkcji wyniosły powyżej 0,9. Na podstawie wyników i dobrze dopasowanych funkcji można stwierdzić,

że maksymalne wartości składowych poziomych przyspieszeń drgań rosną wraz ze wzrostem prędkości wykładniczo. Celem weryfikacji porównano wartości maksymalne drgań uzyskanych na analogicznym poligonie C'. Jak przewidywano drgania generowane eksploatowanym przez 5 lat taborom uzyskują większe wartości, ze względu na pogorszenie stanu technicznego taboru, jednak co mniej oczywiste znacząco wzrosły drgania równoległe do osi toru (Y), a w mniejszym stopniu w kierunku prostopadłym (X), które również przy kolejnych przejazdach z podobną prędkością wykazują większą powtarzalność niż drgania składowej Y. Drgania rejestrowane przez czujnik P-02y posiadają większy rozrzut wartości maksymalnych dla tych samych parametrów przejazdu.

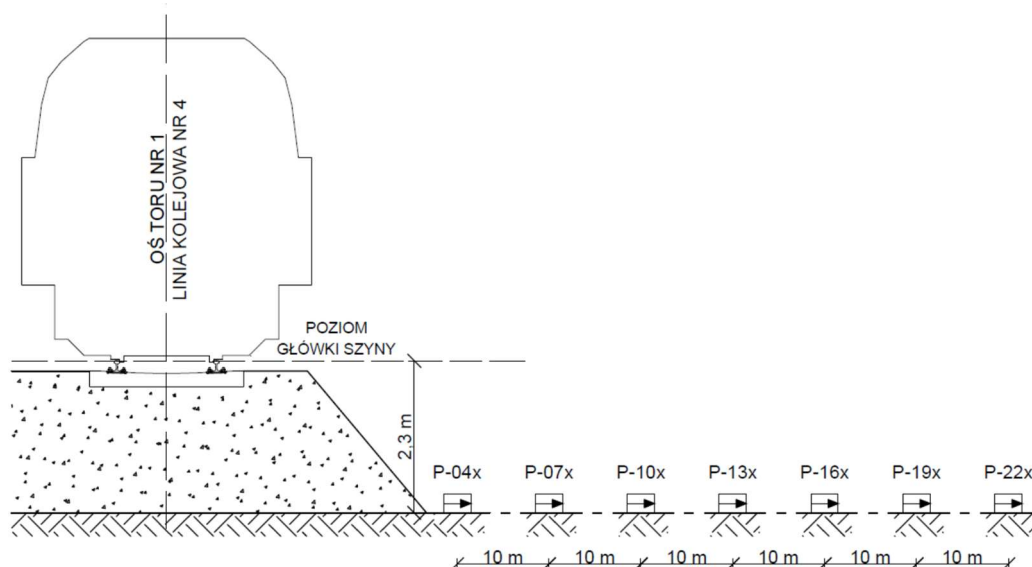


Rysunek 31 Maksymalne wartości przyspieszeń drgań zarejestrowanych na budynku – przejazd pociągu Pendolino – czujnik P-01x (opracowanie własne)



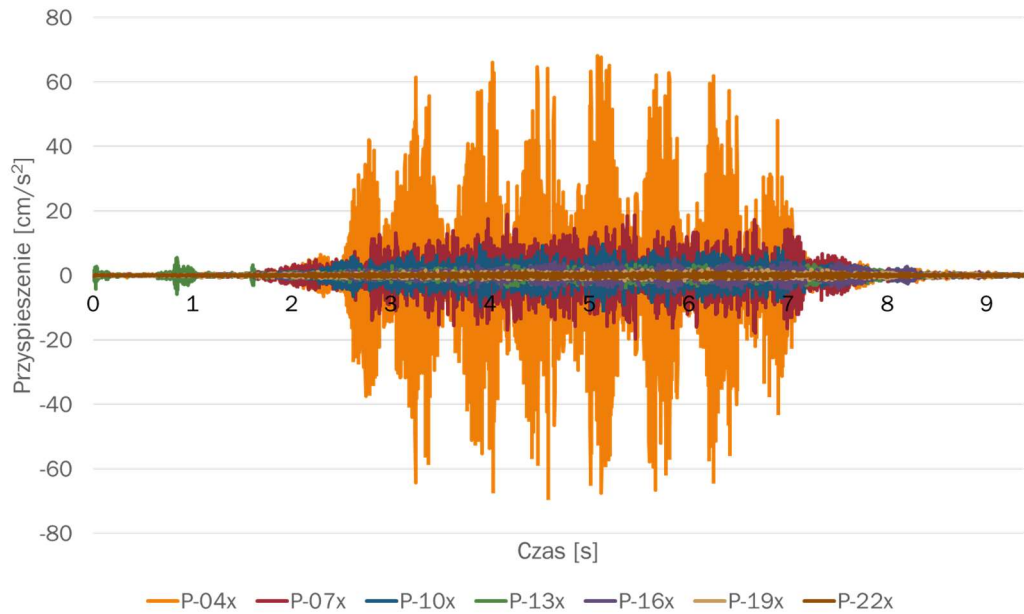
Rysunek 32 Maksymalne wartości przyspieszeń drgań zarejestrowanych na budynku – przejazd pociągu Pendolino – czujnik P-02y (opracowanie własne)

Ze względu na większą stabilność wyników w kolejnej części przeanalizowano drgania rejestrowane prostopadle do osi toru (składowa pozioma X) w przypowierzchniowej warstwie, w jednym z trzech poligonów pomiarowych (poligon B). W celach porównawczych przykładowej analizie poddano przejazdy różnego typu taboru z prędkościami 120 km/h i 160 km/h. Siedem czujników rejestrujących drgania poziome prostopadle do osi toru rozmieszczono kolejno – pierwszy pod nasypem kolejowym, dalsze co dziesięć metrów w kierunku prostopadłym do osi toru. Akcelerometry mocowane były na gruncie, 2,3 m poniżej poziomu główki szyny (Rysunek 33).

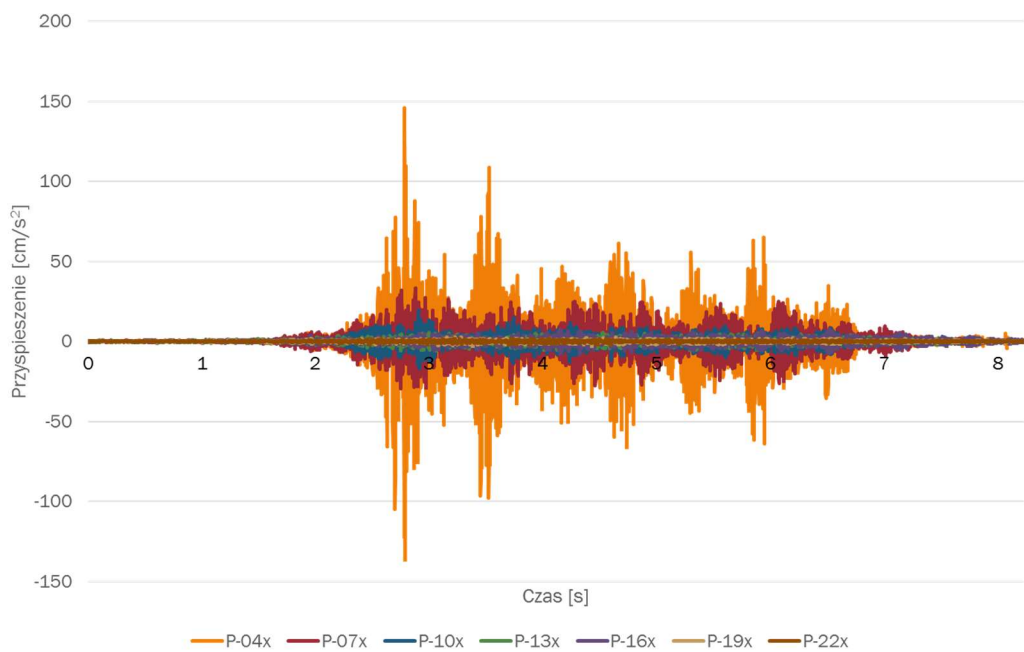


Rysunek 33 Schemat rozmieszczenia czujników w przyjętym profilu pomiarowym - poligon B - składowa pozioma prostopadła do osi toru (x) (opracowanie własne)

Na rysunkach (Rysunek 34 i Rysunek 35) zestawiono przebiegi drgań dla prędkości 160 km/h odpowiednio pociągu Pendolino i InterCity. Dla każdego z przejazdów nałożono przebiegi czasowe składowych poziomych drgań zarejestrowane w punktach pomiarowych od P-04 do P-22x. Maksymalne przyspieszenia przebiegów czasowych osiągają mniejsze wartości podczas przejazdu składu Pendolino. Czujnik umieszczony pod nasypem (P-04x) rejestruje maksymalne przyspieszenia nie przekraczające 70 cm/s^2 , podczas gdy ekstremalne przyspieszenia wywołane przejazdem taboru InterCity są ponad dwukrotnie większe i osiągają wartości dochodzące do 150 cm/s^2 . W obu przypadkach można zaobserwować bardzo duże tłumienie drgań, szczególnie widoczne między pierwszym a drugim czujnikiem (oddalonym o 10 m). Ponadto przebieg składowych przyspieszenia drgań wywołanych przejazdami Pendolino charakteryzuje się symetrią osiową, podczas gdy przebiegi składowych drgań generowanych przejazdami składów InterCity nie wykazują takiej symetrii – widocznie maksymalne amplitudy generuje na początku przejazdu. Zjawisko spowodowane jest faktem, że Pendolino jest składem zintegrowanym, natomiast analizowany skład Intercity napędzany jest przez lokomotywę Husarz, a wagony stanowią człony toczne pociągu (nie posiadające dodatkowego napędu).



Rysunek 34 Przebiegi czasowe składowej poziomej X przyspieszeń drgań gruntu wywołane przejazdem składu Pendolino z prędkością $v = 160 \text{ km/h}$ (opracowanie własne)



Rysunek 35 Przebiegi czasowe składowej poziomej X przyspieszeń drgań gruntu wywołane przejazdem składu InterCity z prędkością $v = 160 \text{ km/h}$ (opracowanie własne)

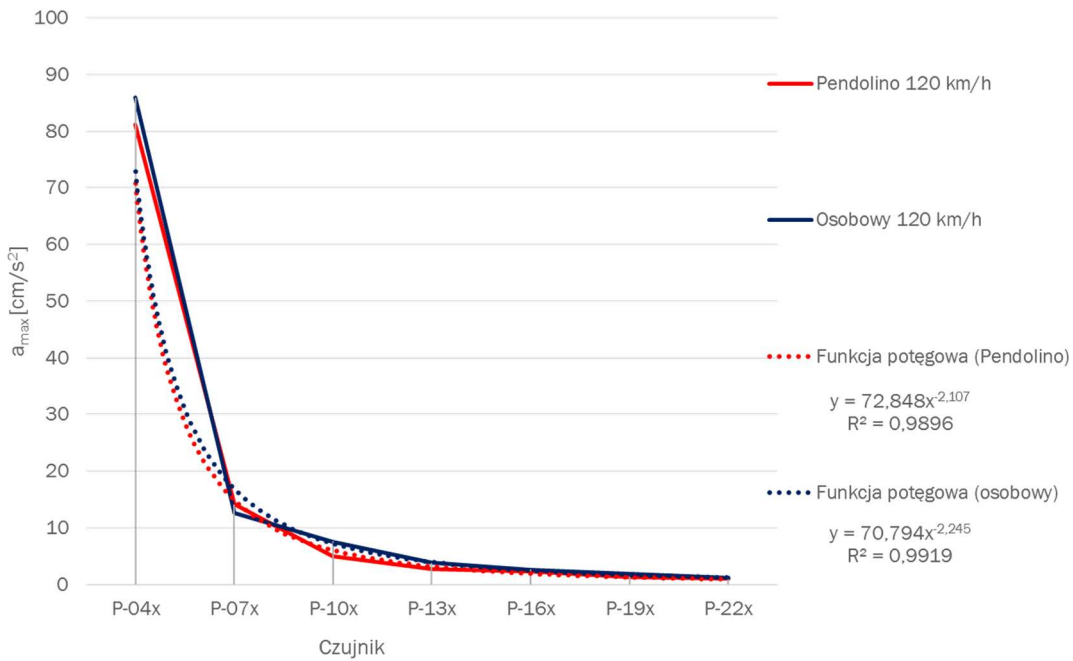
Tabelarycznie (Tabela 3) zestawiono maksymalne wartości zarejestrowanych przebiegów składowej poziomej X przyspieszeń drgań gruntu od przejazdów różnych składów z prędkością 120 km/h. Tylko dla przejazdów analizowanych w punkcie pomiarowym P-07x zarejestrowano większe wartości maksymalnych wartości przyspieszeń drgań od przejazdu pociągu Pendolino. W pozostałych sześciu punktach

pomiarowych zarejestrowano mniejsze maksymalne przyspieszenia drgań wywołane przejazdem tego składu. Przy prędkości 160 km/h widoczna jest bardzo duża rozbieżność w wynikach maksymalnych wartości przyspieszeń składowej poziomej X drgań gruntu wzbudzonych przejazdami różnych pociągów tego samego przewoźnika (InterCity); w punkcie P-04x jest to różnica dochodząca do 50 cm/s². Przy przejazdach składu EMU 250 w każdym punkcie pomiarowym zarejestrowano drgania gruntu o najmniejszej wartości.

Tabela 3 Zestawienie maksymalnych wartości składowej poziomej X przyspieszeń drgań gruntu (opracowanie własne)

Źródło drgań	Wartość a_{max} [cm/s ²]						
	P-04x	P-07x	P-10x	P-13x	P-16x	P-19x	P-22x
Pociąg Pendolino 120 km/h	81,11	14,1	4,92	2,75	2,24	1,27	0,99
Pociąg osobowy 120 km/h	85,93	12,55	7,54	3,78	2,61	1,82	1,18
Pociąg Pendolino 160 km/h	68,88	19,73	10,74	5,79	5,27	2,08	1,34
Pociąg osobowy 160 km/h	96,81	33,52	18,05	7,07	7,02	2,85	2,08
Pociąg osobowy 160 km/h	98,17	35,81	18,03	6,57	6,8	2,55	2,29
Pociąg osobowy 160 km/h	112,02	19,66	8,55	5,22	3,66	2,64	1,54
Pociąg osobowy 160 km/h	145,8	33,09	19,21	5,95	7,96	2,55	2,35

Przedstawiono (Rysunek 36) krzywe zaniku maksymalnych wartości przyspieszeń drgań wraz z odległością przy przejazdach pociągów z prędkością 120 km/h. Dla każdego ze zbioru danych podano funkcję potęgową opisującą zależność maksymalnego przyspieszenia względem odległości od źródła drgań. Współczynniki determinacji R^2 dla obu funkcji wynoszą ok 0,99. Wartości maksymalnych przyspieszeń drgań nie wykazują znaczących różnic zależnych od taboru.



Rysunek 36 Maksymalne wartości składowej poziomej x przyspieszeń drgań gruntu z zarejestrowanych przebiegów przy prędkości przejazdów pociągów $v = 120$ km/h (opracowanie własne)

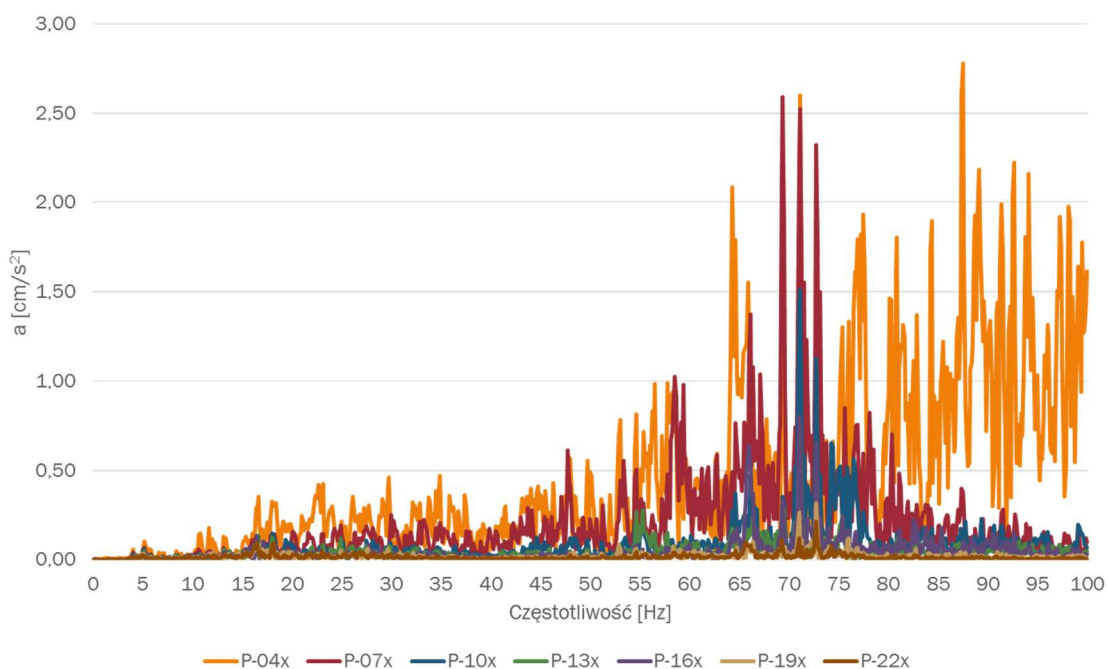
Podobne zależności występują w przypadku przejazdów analogicznych pociągów z $v=160$ km/h. Na podstawie analiz wnioskować można, że rozważany tabor ma największy wpływ na emisję drgań w bliskiej lokalizacji linii kolejowej.

5.3 Szybka transformata Fouriera (FFT)

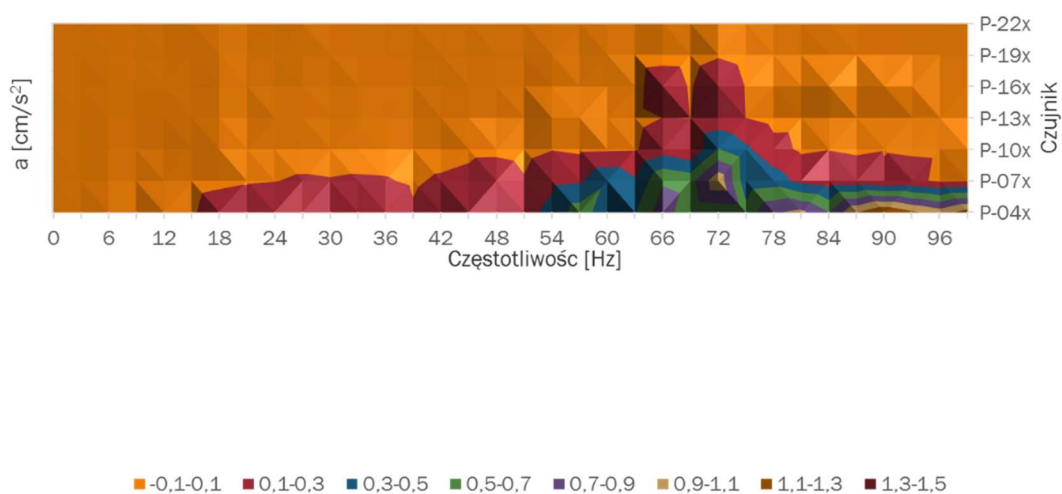
Szybka transformata Fouriera (ang. FFT – Fast Fourier transform) szerzej opisana w pozycjach literaturowych [75][75][76] jest algorytmem próbującym sygnał w czasie (i/lub przestrzeni). Analiza przekształca sygnał pomierzony w dziedzinie czasu do dziedziny częstotliwości. Do przeprowadzenia analiz w rozprawie wykorzystano narzędzia dedykowane do analiz sygnałów w oprogramowaniu FlexPro firmy Weisang GmbH.

Transformatę FFT użyto do dalszej analizy danych i dokonano przejścia z dziedziny czasu do dziedziny częstotliwości uzyskując ciągłe widmo drgań. Transformatę wykonano dla częstotliwości do 100 Hz. Analizy ograniczono do pasma częstotliwości 100 Hz zgodnie z normatywnymi zaleceniami, doświadczeniem oraz adekwatnie do przeprowadzanych badań naukowych na świecie [78][79][80]. Zobrazowano zmianę widma częstotliwości w zależności od odległości punktu

pomiarowego od źródła drgań (Rysunek 37) dla pociągu InterCity. Dla pierwszego punktu pomiarowego (P-04x) drganiami dominującymi są drgania z wyższymi częstotliwościami – pasmo od 63 do 100 Hz. Na oddalonym o 10 m czujniku (P-07x) dominuje pasmo 70 – 75 Hz, osiągając wartości maksymalne dorównujące wartościom uzyskanym w punkcie pomiarowym P-04x w tym paśmie. Również w paśmie 70-75 Hz występują maksymalne wartości przyspieszeń w trzecim (P-10x) i czwartym (P-13x) punkcie pomiarowym, jednak są to wartości znacznie mniejsze niż wartości uzyskane w pierwszym (P-04x) i drugim (P-07x) punkcie pomiarowym. W celu lepszej wizualizacji widmo częstotliwości podzielono na pasma o szerokości 3 Hz i obliczono średnią amplitudę drgań. Wykres mapowy pokazujący otrzymaną wartość przyspieszenia w zależności od częstotliwości i odległości czujnika od źródła przedstawiono na rysunku poniżej (Rysunek 38). Największe wartości przyspieszeń drgań występują w pierwszym punkcie pomiarowym (P-04x) i odpowiadają wyższym pasmom częstotliwości, jednak pasmo 66 – 72 Hz jest pasmem, w którym występuje najmniejsze tłumienie przy wzroście odległości od źródła drgań. Amplitudy powyżej $0,1 \text{ cm/s}^2$ przenoszone są w nim nawet do 40 m od nasypu (co wykazano rejestrując dane w piątym punkcie pomiarowym – P-16x).

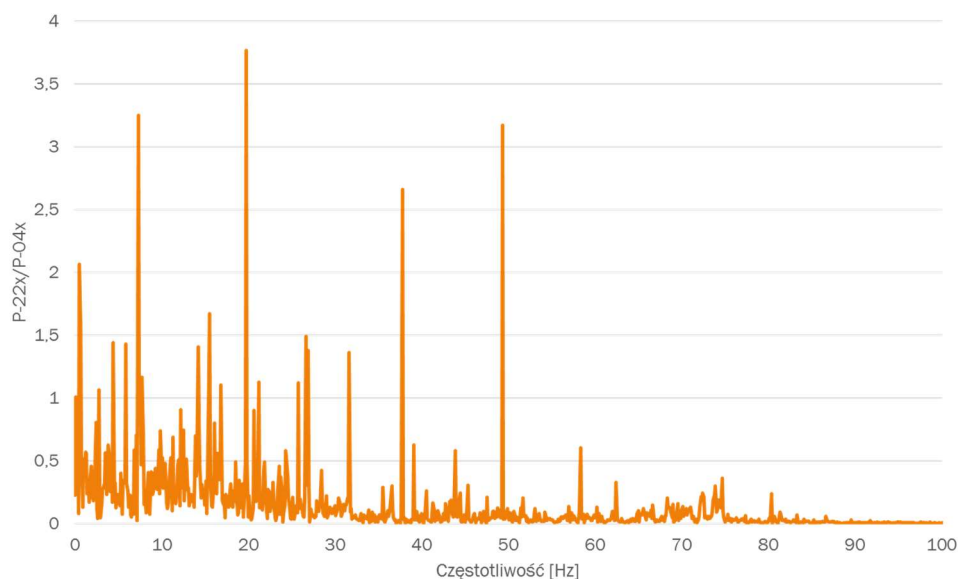


Rysunek 37 Ciągłe widmo drgań (FFT) – pociąg InterCity – prędkość $v = 160 \text{ km/h}$
(opracowanie własne)



Rysunek 38 Mapa propagacji drgań – pociąg InterCity – prędkość $v = 160 \text{ km/h}$ (opracowanie własne)

Przykładowo w celu wyznaczenia pasm częstotliwości o największym tłumieniu obliczono stosunek widma ciągłego przebiegu drgań w punkcie ostatnim P-22x do przebiegu drgań w punkcie pierwszym P-04x. Otrzymane zależności przedstawiono na wykresie (Rysunek 39). Pomimo, iż spodziewane wartości powinny być mniejsze od 1, biorąc pod uwagę zanik drgań wraz z odległością od źródła, ok. 2% z otrzymanych stosunków przekraczało tę wartość. Nie było to spowodowane występowaniem bardzo dużych wartości przyspieszeń drgań na ostatnim czujniku (P-22x), a jedynie odczytami bardzo małych wartości przyspieszeń drgań w pierwszym punkcie pomiarowym (P-04x). Nie świadczy to również o tym, iż sygnały w tych częstotliwościach uległy wzmocnieniu. Uznaje się, że sytuacja taka została wywołana zjawiskiem zmiany częstotliwości sygnału po przejściu przez bardzo niejednorodny materiał jakim jest grunt. Z przeprowadzonej analizy wnioskować można, że największe tłumienie odpowiada najwyższym częstotliwościom, co jest zgodne z wiedzą techniczną i doświadczeniem.



Rysunek 39 Stosunek widma drgań uzyskanych na podstawie przebiegów drgań zarejestrowanych w ostatnim (P-22x) i pierwszym (P-04x) punkcie pomiarowym – pociąg InterCity – prędkość $v = 160 \text{ km/h}$ (opracowanie własne)

Analogicznie jak dla pociągu InterCity zbadano widmo ciągłe przebiegów drgań gruntu wzbudzonych przejazdami składu Pendolino poruszającego się z prędkością 160 km/h – dla obu typów pociągów otrzymano analogiczne rezultaty.

5.4 Krótkookresowa Transformata Fouriera (STFT)

Prezentacja danych za pomocą szybkiej transformaty Fouriera (FFT) przynosi istotne wiadomości odnośnie do charakteru częstotliwościowego drgań, jednak podstawową wadą FFT jest brak informacji o zmianie charakterystyki drgań w czasie trwania zdarzenia. Przechodząc z dziedziny czasu do dziedziny częstotliwości tracimy informację na temat dokładnego czasu trwania drgań oraz momentu wystąpienia poszczególnych wzbudzeń w trakcie trwania przebiegu, co jest szczególnie istotne w przypadku niestacjonarnych źródeł drgań – jak np. przejazd pociągu. Z tego względu zdecydowano się na wykorzystanie krótkookresowej transformaty Fouriera do analiz.

Krótkookresowa transformata Fouriera (ang. STFT – short-time Fourier transform) jest transformacją wykorzystującą FFT. Analizy STFT używa się do określenia przebiegu drgań w funkcji czasu i częstotliwości dla dowolnego sygnału. Procedura obliczania STFT w praktyce polega na dzieleniu sygnału czasu na krótsze segmenty o równej długości, a następnie obliczeniu transformaty Fouriera osobno dla

każdego krótszego przedziału czasowego - okna. Konsekwencją tego jest możliwość uzyskania zmieniającego się widma jako funkcji czasu [81] [82] [83].

Krótkookresową transformata Fouriera opisuje równanie [81]:

(5.4-1)

$$F(\omega, t_0) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)b(t - t_0) e^{-i\omega t} dt$$

gdzie:

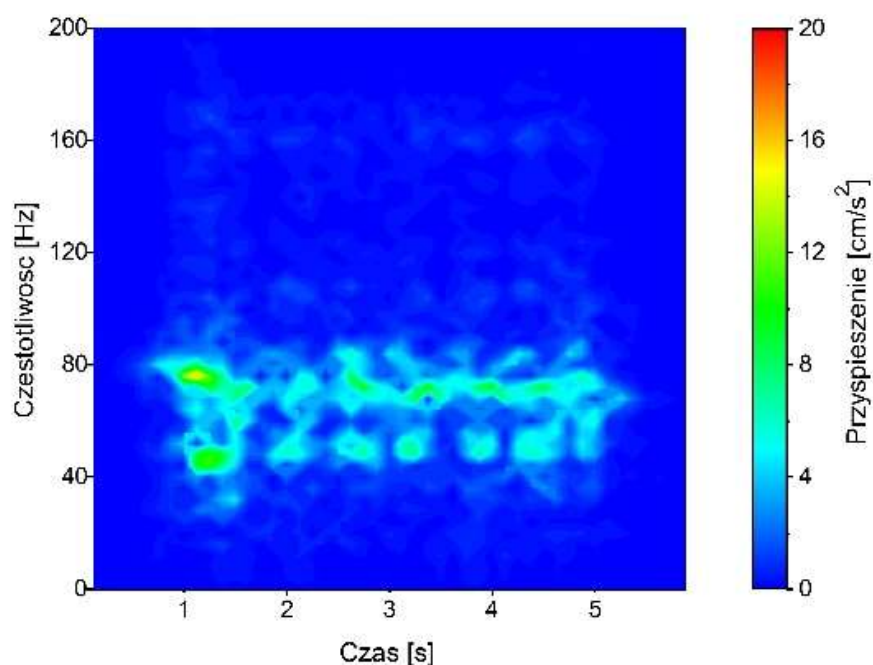
$f(t)$ – analizowany sygnał,

$b(t - t_0)$ – funkcja okna czasowego.

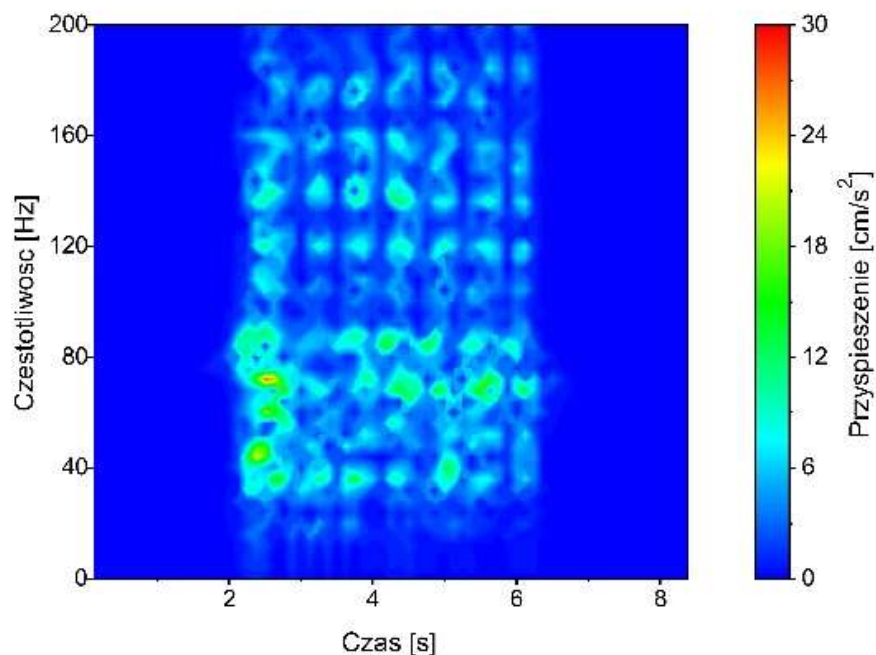
STFT umożliwia uzyskanie informacji o tym, jak zmienia się widmo FFT w czasie, tzn. pozwala na jednoczesną obserwację właściwości w obu dziedzinach – czasu i częstotliwości. Wadą metody jest znaczne ograniczenia w analizie niestacjonarnych sygnałów w związku z zasadą nieoznaczoności: rozdzielczość transformaty jest stała w przestrzeni częstotliwość – czas dla danego okna czasowego. Zwiększanie szerokość okna analizującego poprawia rozdzielczość w dziedzinie częstotliwości, a jednocześnie pogarsza rozdzielczość w dziedzinie czasu i na odwrót. [76][77]

Transformata, która daje informacje dodatkowe o źródle drgań, może być przydatna w celach diagnostycznych taboru kolejowego oraz nawierzchni. Z tego względu w celu porównania różnorodnego taboru poruszającego się z różnymi prędkościami, po dwóch torach zestawiono analizy sygnału dla czujnika znajdującego się na gruncie najbliższej wzbudzonych drgań pionowych (P-06z) na poligonie B. Ze względu na fakt, iż analiza nie jest normatywnym narzędziem, a próbą implikacji nowej metody oraz identyfikacji niosącej przez nią informacji – zakres analizowanych częstotliwości rozszerzono przyjmując zakres częstotliwości 0 – 200 Hz. Dane porównano z drganiami wywoływany przejazdami: składu Intercity o prędkości 160 km/h po torze nr 1 i 2, pociągu towarowego z prędkością 80 km/h torem nr 2, oraz testowanego pociągu Pendolino poruszającego się po torze nr 1 z prędkościami 160, 250 i 80 km/h. Analizy STFT ww. przejazdów umieszczono na wykresach. Porównując dwa przejazdy pociągu InterCity z tą samą prędkością po różnych torach – dalszym (nr 2) i bliższym (nr 1) (Rysunek 40 i Rysunek 41) uwidacznia się największe wzbudzenie drgań wywołane

pierwszym członem pociągu. Drgania wywoływane kolejnymi zestawami kołowymi nie uzyskują zbliżonych wartości. Wyraźnie, szczególnie w drugim przypadku widać wzbudzenia siedmioma zestawami wózków. Wartości w trakcie przejazdu w danym paśmie częstotliwościowym nie są stałe, a wzrastające przy interakcji zestaw kołowy – szyna i szybko wygasają. Dla taboru poruszającego się po torze nr 1 pasmem częstotliwości dominujących jest pasmo 40-80 Hz z maksimum $16,9 \text{ cm/s}^2$ uzyskanym dla częstotliwości 76 Hz. Przy sygnale z toru bliższego poza oczywistymi większymi amplitudami (maksimum – $27,9 \text{ cm/s}^2$ dla częstotliwości 72 Hz) zaobserwowano większą rozpiętość widma na osi częstotliwości i mniejsze zróżnicowanie wartości między pasmem dominującym a pozostałymi częstotliwościami.

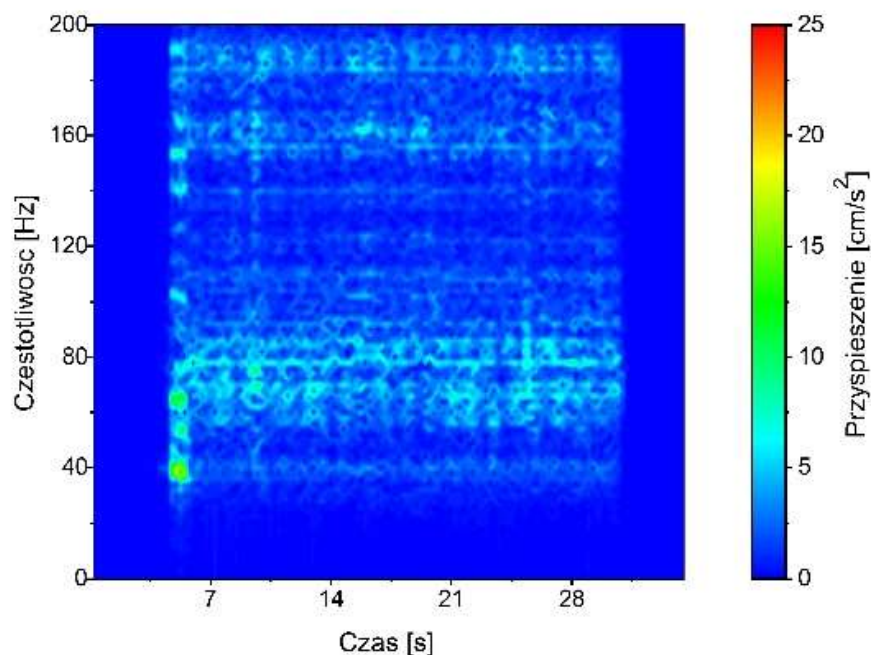


Rysunek 40 Analiza STFT – przejazd pociągu Intercity z prędkością 160 km/h – tor nr 1 (opracowanie własne)



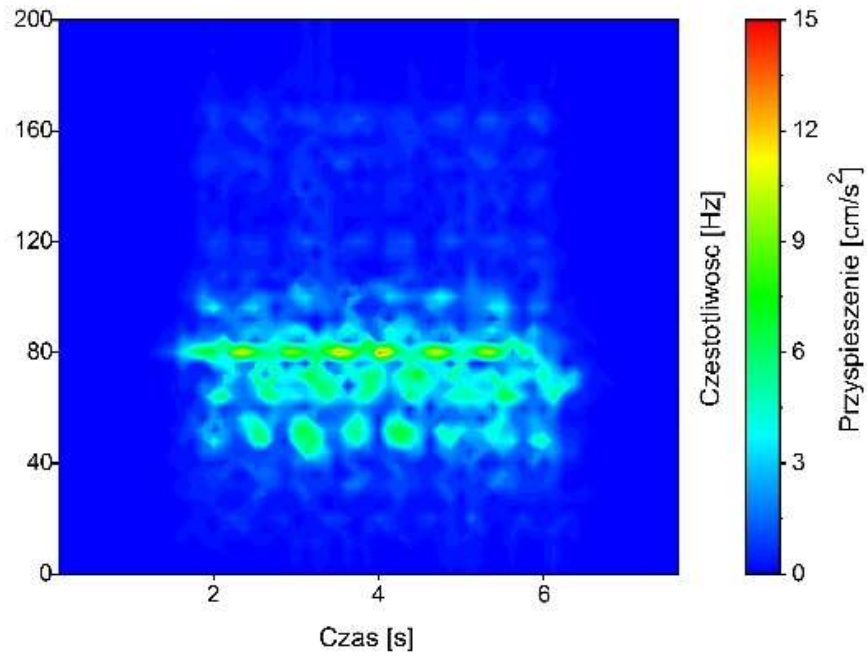
Rysunek 41 Analiza STFT – przejazd pociągu Intercity z prędkością 160 km/h – tor nr 2 (opracowanie własne)

Analizując wzbudzenie wywołane przemieszczaniem się pociągu towarowego (Rysunek 42) można zauważyć duże w porównaniu do poprzednich zestawień rozmycie widma w czasie. Obserwator nie jest w stanie wizualnie jak poprzednio wyodrębnić zestawów wózków. Jednak tu również widać mocne wzbudzenie lokomotywą i mniejsze wagonami, ze względu na ich charakter toczny. Czas trwania zdarzenia ze względu na bardzo małą prędkość i większą niż w przypadku pociągów pasażerskich długość taboru wydłuża się. Wartości osiągają maksima rzędu 20 cm/s^2 przy niższej częstotliwości – 38 Hz.

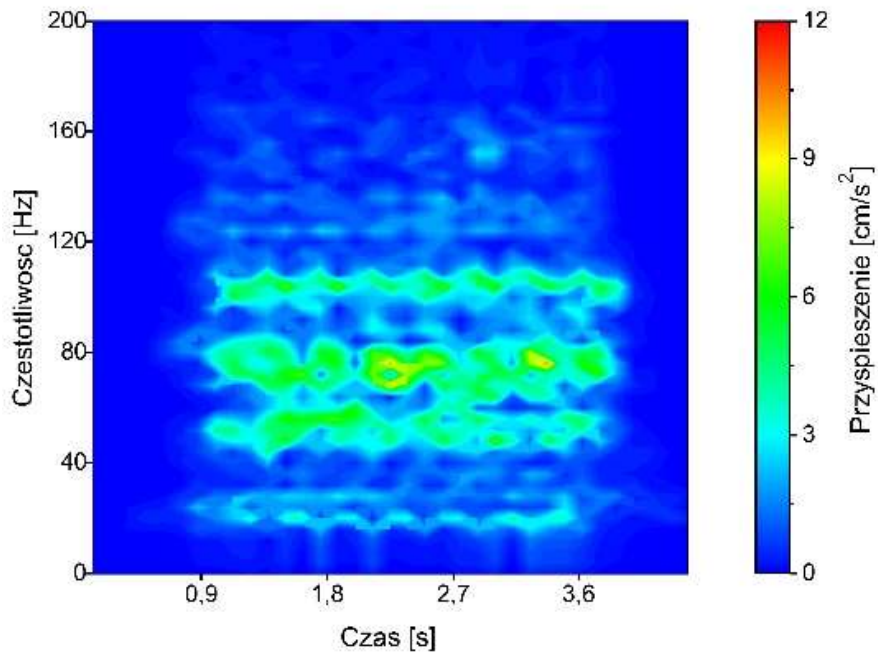


Rysunek 42 Analiza STFT – przejazd pociągu towarowego z prędkością 80 km/h – tor nr 2 (opracowanie własne)

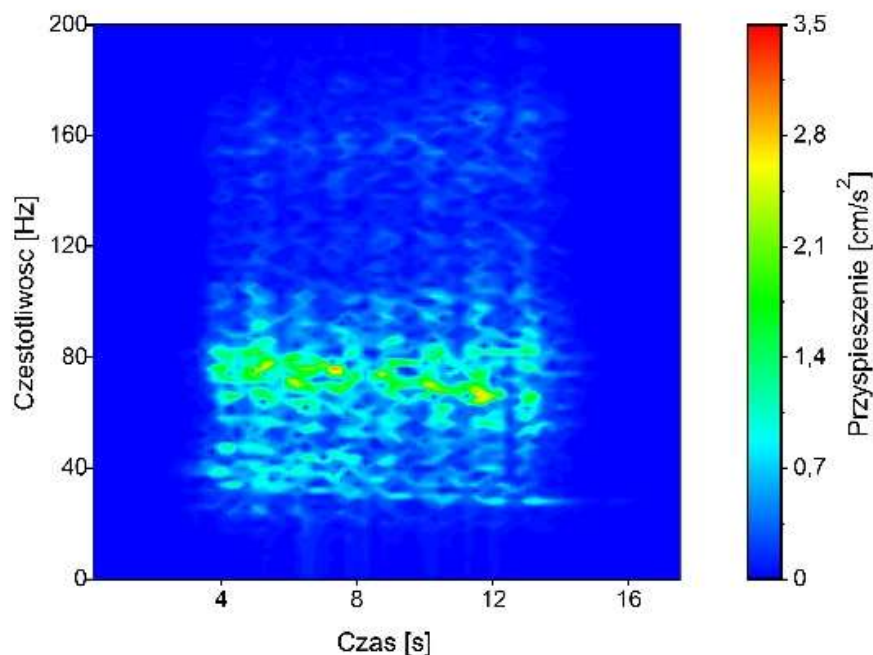
Przy zmianie taboru na nowy – EMU 250 – bez względu na prędkość obserwujemy zmianę charakteru otrzymanego widma (Rysunek 43, Rysunek 44, Rysunek 45). Maksymalne wartości rozkładają się równomiernie na osi czasu. Pasmem dominujących częstotliwości przy przejeździe z prędkością 160 km/h jest pasmo 40 – 80 Hz – podobnie jak dla pociągu Intercity, jednak uzyskiwane maksymalne wartości (dla EMU 250 – $13,7 \text{ cm/s}^2$) są o 18 % mniejsze. Zwiększając prędkość nowego pociągu do 250 km/h zmniejsza się maksymalna wartość przyspieszenia ($10,9 \text{ cm/s}^2$ przy częstotliwości 76 Hz) jednak rozszerza się pasmo przyspieszeń dominujących – zarówno na osi częstotliwości (zakres 40 – 120 Hz), jak i na osi czasu. Redukując prędkość pociągu o połowę – 80 km/h maksymalne wartości przyspieszeń wykazują czterokrotne zmniejszenie w stosunku do składu Pendolino i pięciokrotne w stosunku do taboru InterCity.



Rysunek 43 Analiza STFT - przejazd pociągu Pendolino z prędkością 160 km/h - tor nr 1 (opracowanie własne)



Rysunek 44 Analiza STFT - przejazd pociągu Pendolino z prędkością 250 km/h - tor nr 1 (opracowanie własne)



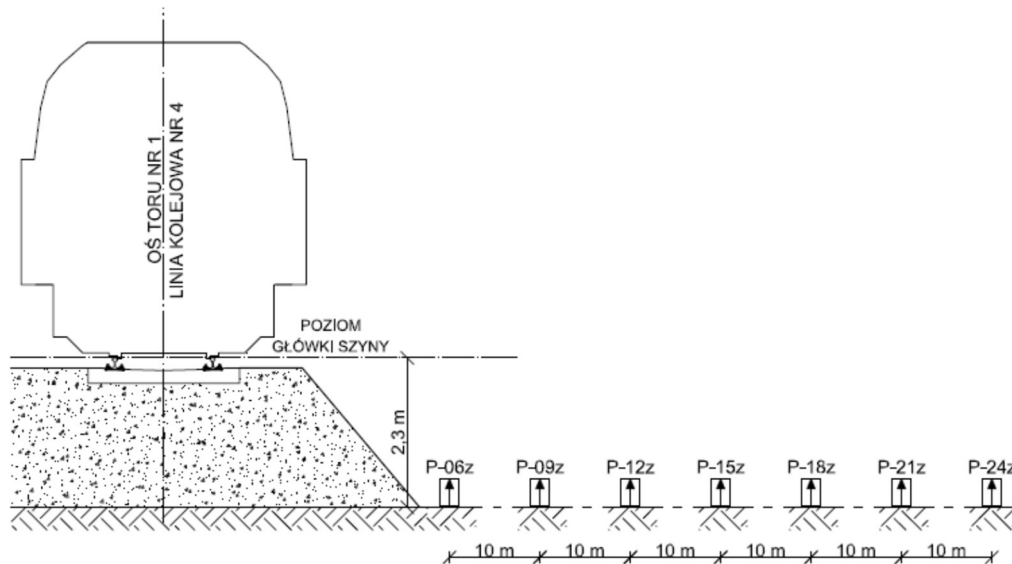
Rysunek 45 Analiza STFT - przejazd pociągu Pendolino z prędkością 80 km/h - tor nr 1 (opracowanie własne)

5.4.1 Porównanie FFT i STFT do analiz propagacji drgań w zależności od odległości punktu pomiarowego od źródła drgań

Analizie poddano przykładowo trzy przejazdy – dla Pendolino z prędkościami minimalną i maksymalną dla danego przekroju pomiarowego – 40 km/h i 270 km/h oraz z prędkością pociągów rozkładowo kursujących – 160 km/h. W celu identyfikacji sygnału wykonano Szybką Transformatę Fouriera (FFT) oraz Krótkookresową Transformatę Fouriera (STFT).

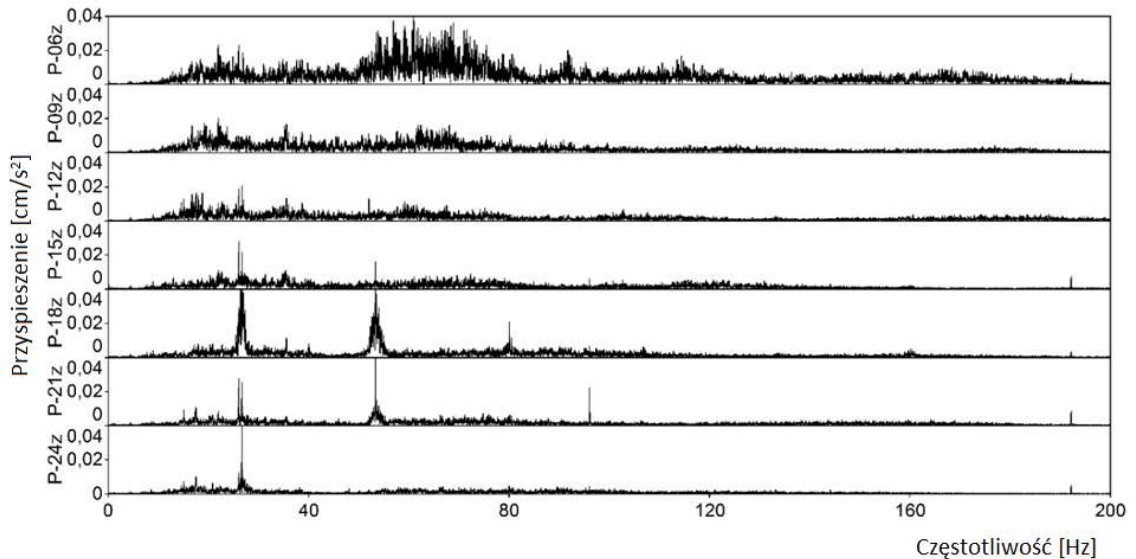
5.4.1.1 Analiza wyników przy zastosowaniu FFT

Zarejestrowane przebiegi czasowe przekształcono przy pomocy Szybkiej Transformaty Fouriera (FFT) na dane w dziedzinie częstotliwości. Analizę przeprowadza się w przedziale częstotliwości 0 – 200 Hz. Przykładowo dla poligonu B zestawiono dane uzyskane podczas rejestracji składowej pionowej Z przyspieszeń drgań (Rysunek 46).



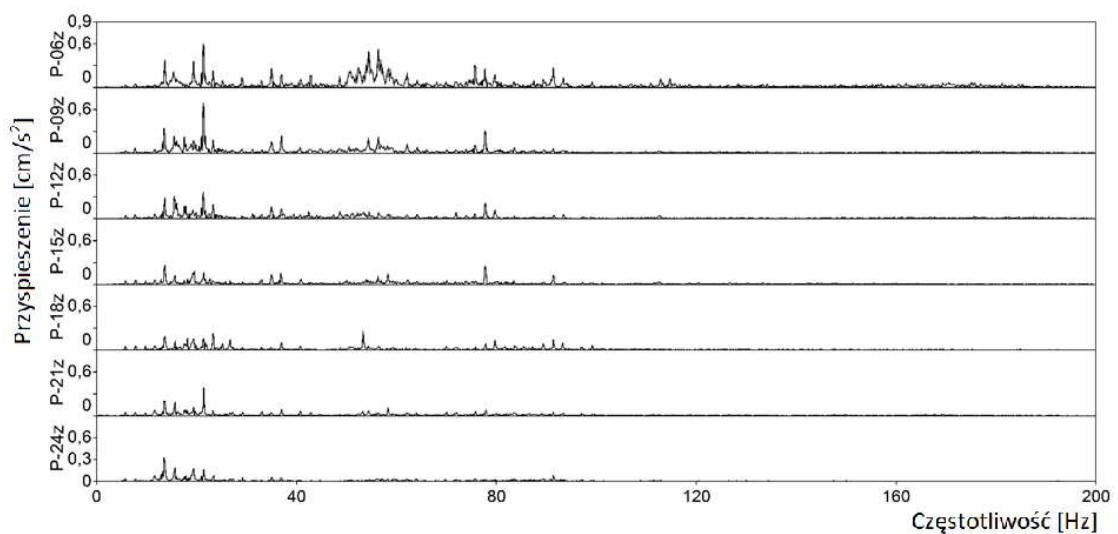
Rysunek 46 Polygon pomiarowy B – lokalizacja czujników pomiaru składowej pionowej drgań (opracowanie własne)

Na wykresie (Rysunek 47) przedstawiono rozkład zarejestrowanych przebiegów drgań wzbudzanych przejazdami pociągów z prędkością 40 km/h z wykorzystaniem FFT. Skalę pionową wykresu (amplitudy Fouriera) dla wszystkich akcelerometrów dostosowano do skali czujnika rejestrującego maksymalne wartości (P-06z). Dla czujnika znajdującego się u podnóża nasypu pasmem dominującym (wartości powyżej $0,02 \text{ cm/s}^2$) jest zakres 50 – 80 Hz. Drgania w tym zakresie częstotliwości zostają najszybciej wytłumione i w punkcie znajdującym się 10 m dalej (P-09z) pasmo dominujące przesuwa się do zakresu 10 – 70 Hz. Niewielka redukcja poziomu drgań występuje w następnych dwóch punktach pomiarowych (P-12z i P-15z). Na czujniku P-18z zaobserwowano wzmocnienie sygnału w otoczeniu częstotliwości 27 Hz oraz 53 Hz. Pasma w otoczeniu częstotliwości 27 Hz dominuje również w dwóch ostatnich punktach (P-21z i P-24z).



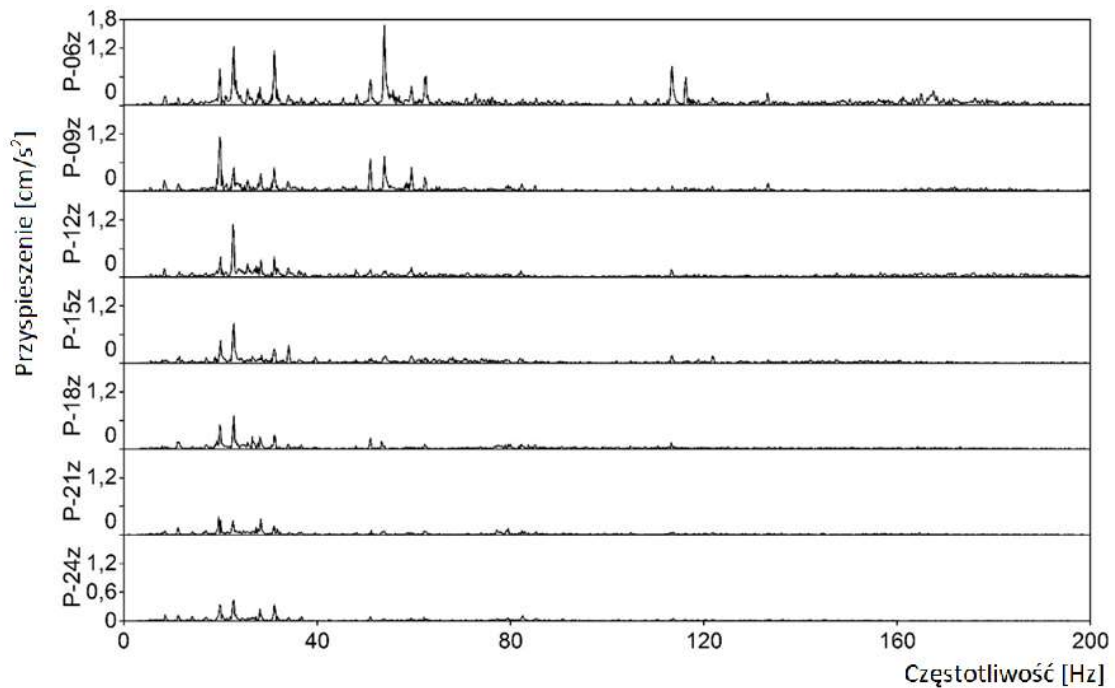
Rysunek 47 Szybka Transformata Fouriera – przejazd Pendolino z prędkością 40 km/h (opracowanie własne)

Analogicznie zestawiono FFT dla przejazdu z prędkością 160 km/h. Maksymalne amplitudy drgań przyjmowały prawie dwukrotnie większe wartości w stosunku do poprzedniego sygnału. Dominującym pasmem częstotliwości na każdym odbiorniku i najwolniej tłumionym w zależności od odległości jest pasmo 10-30 Hz. Drgania zarejestrowane za pomocą czujnika P-06z charakteryzują się dominacją częstotliwości w zakresie 50 – 60 Hz, są one jednak bardzo szybko tłumione wraz ze wzrostem odległości od źródła drgań. Uzyskane wyniki przedstawiono na wykresie poniżej (Rysunek 48).



Rysunek 48 Szybka Transformata Fouriera – przejazd Pendolino z prędkością 160 km/h (opracowanie własne)

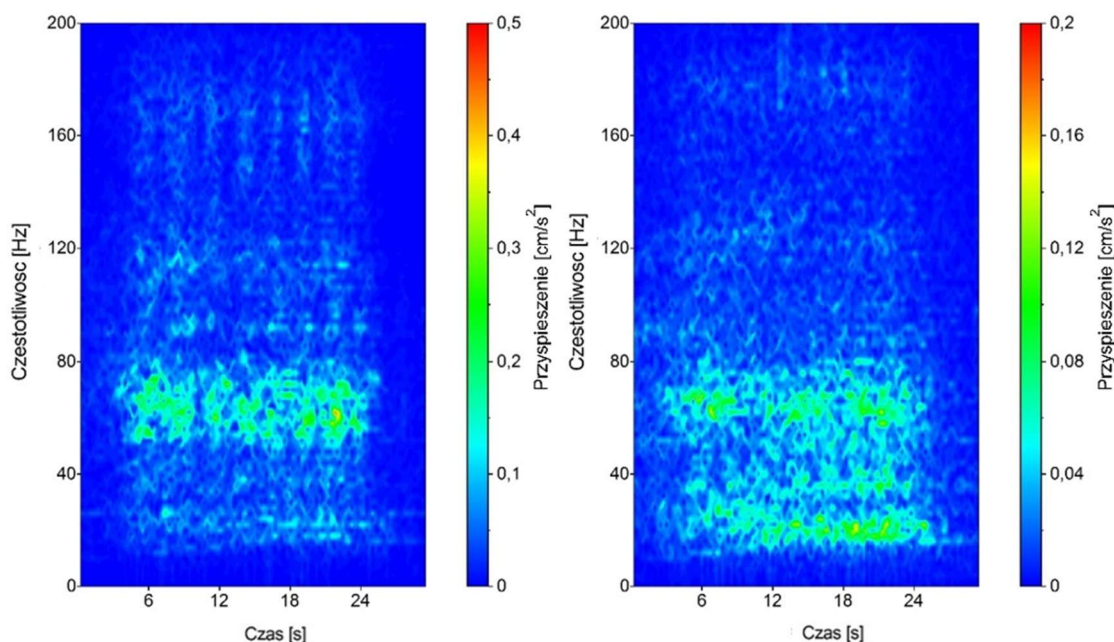
Zestawienie danych z analiz dla przejazdu z prędkością 270 km/h pokazano na wykresie (Rysunek 49). Analogicznie jak w poprzedniej analizie uzyskano jedno dominujące pasmo, które uwidacznia się na każdym czujniku (20 – 40 Hz) oraz pasmo wysokich amplitud – przedział 50 – 60 Hz, uwidaczniające się jedynie na czujniku P-06z i P-09z. Amplitudy drgań osiągają wartości dwukrotnie większe od wartości amplitud uzyskiwanych przez wzbudzenie pojazdem o prędkości 160 km/h.



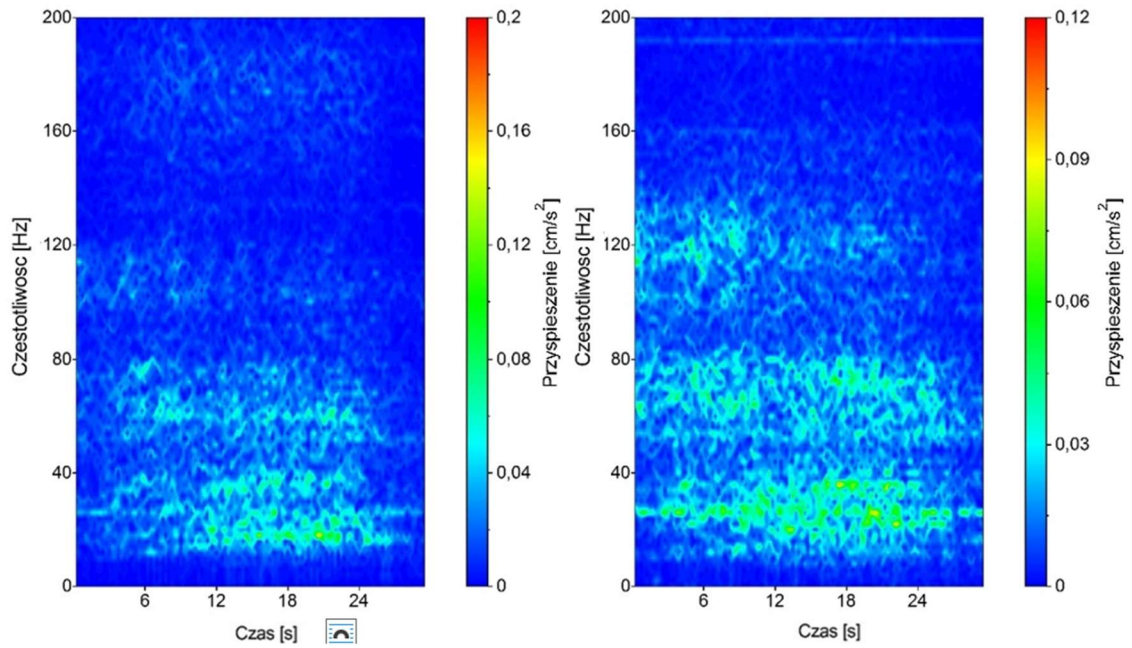
Rysunek 49 Szybka Transformata Fouriera – przejazd Pendolino z prędkością 270 km/h (opracowanie własne)

Dla każdego z analizowanych punktów pomiarowych (Rysunek 46) wykonano Krótkookresową Transformatę Fouriera (STFT). Analiza ta pozwoliła na uwypuklenie cech niewidocznych w klasycznym FFT. Na rysunku (Rysunek 51 Rysunek 50 – Rysunek 53) zestawiono wyniki uzyskane z przejazdu pociągu Pendolino z prędkością 40 km/h. Wartość drgań rejestrowanych w punkcie P-06z nie przekracza 0,5 cm/s². Na wykresie dla tego czujnika widoczne jest wzmocnienie drgań na skutek interakcji z szyną 8 grup zestawów kołowych (pierwszy i ostatni wózek składu tworzą pierwszą i ostatnią grupę – pozostałe grupy tworzone są przez wspólny sygnał drugiego wózka członu poprzedzającego i pierwszego wózka członu następnego). Schematyczny rozstaw wózków pociągu przedstawiono na ilustracji poniżej (Rysunek 54). Wyodrębnienia poszczególnych zestawów kołowych nie można dokonać na żadnym z następných czujników – drgania zostają rozproszone. Pod nasypem skarpy dominują drgania

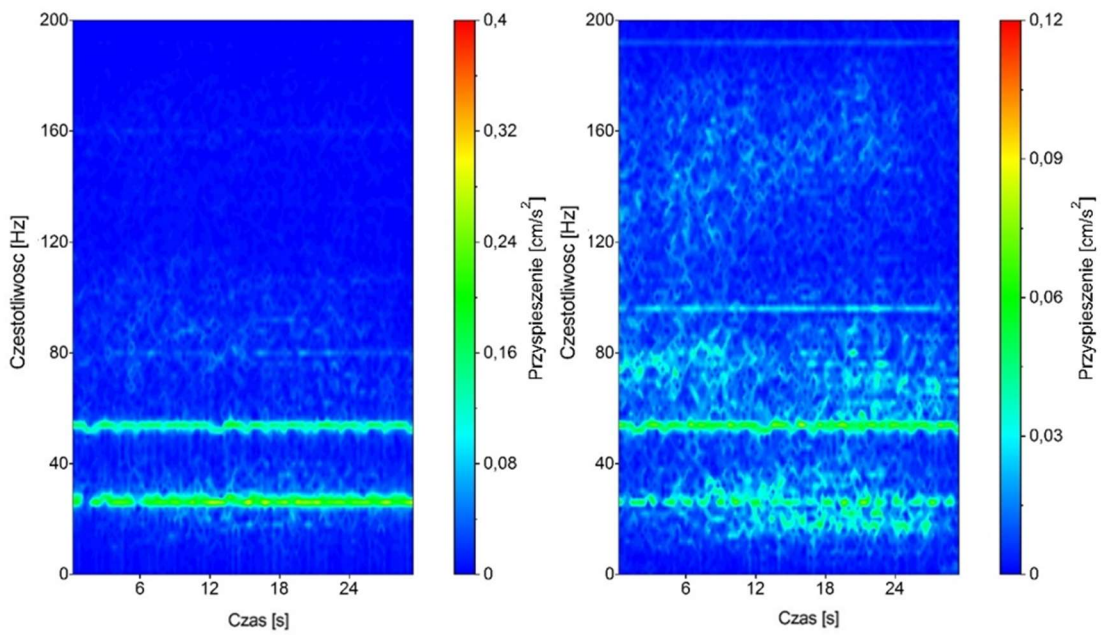
o zakresie częstotliwości 40 – 80 Hz. Na pierwszych dziesięciu metrach dochodzi do szybkiego tłumienia tego pasma (amplitudy STFT uzyskane w punkcie P-09z wykazują wartości ponad dwukrotnie mniejsze). Najślabiej tłumione jest pasmo 10 – 20 Hz, które przy dalszych odległościach stanowi najistotniejszą część sygnału. Czas odbioru sygnału o maksymalnych wartościach przyspieszeń zwiększa się wraz z odległością – czujnik P-06z – ekstremalne wartości uzyskuje w przedziale czasowym 5 – 25 s. Przy czterech ostatnich czujnikach ekstremalne wartości występują przez całą długość pomiaru. Związane jest to również z faktem, że wraz ze wzrostem odległości coraz trudniej wyodrębnić sygnał z szumu tła.



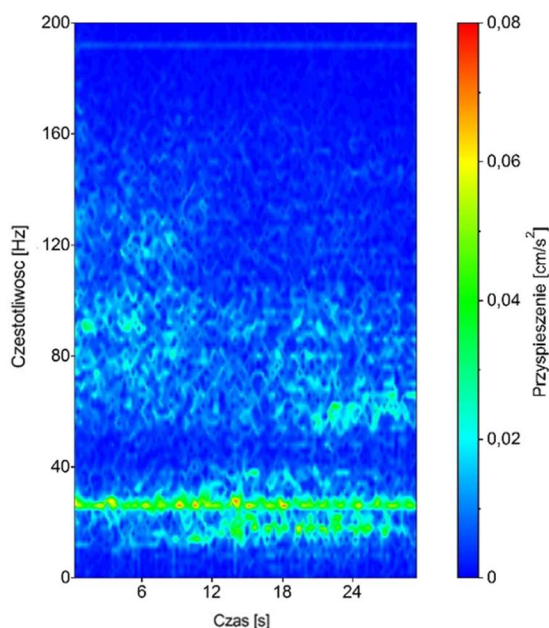
Rysunek 50 Krótkookresowa transformata Fouriera – przejazd Pendolino z prędkością 40 km/h (czujniki P-06z i P-09z) (opracowanie własne)



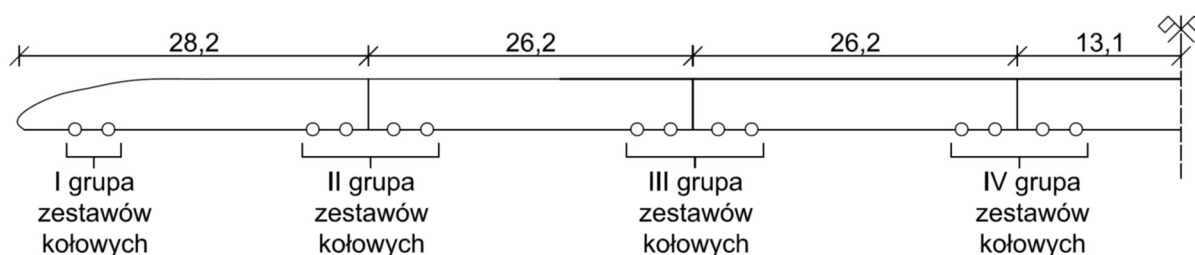
Rysunek 51 Krótkookresowa transformata Fouriera – przejazd Pendolino z prędkością 40 km/h (czujniki P-12z i P-15z) (opracowanie własne)



Rysunek 52 Krótkookresowa transformata Fouriera – przejazd Pendolino z prędkością 40 km/h (czujniki P-18z i P-21z) (opracowanie własne)

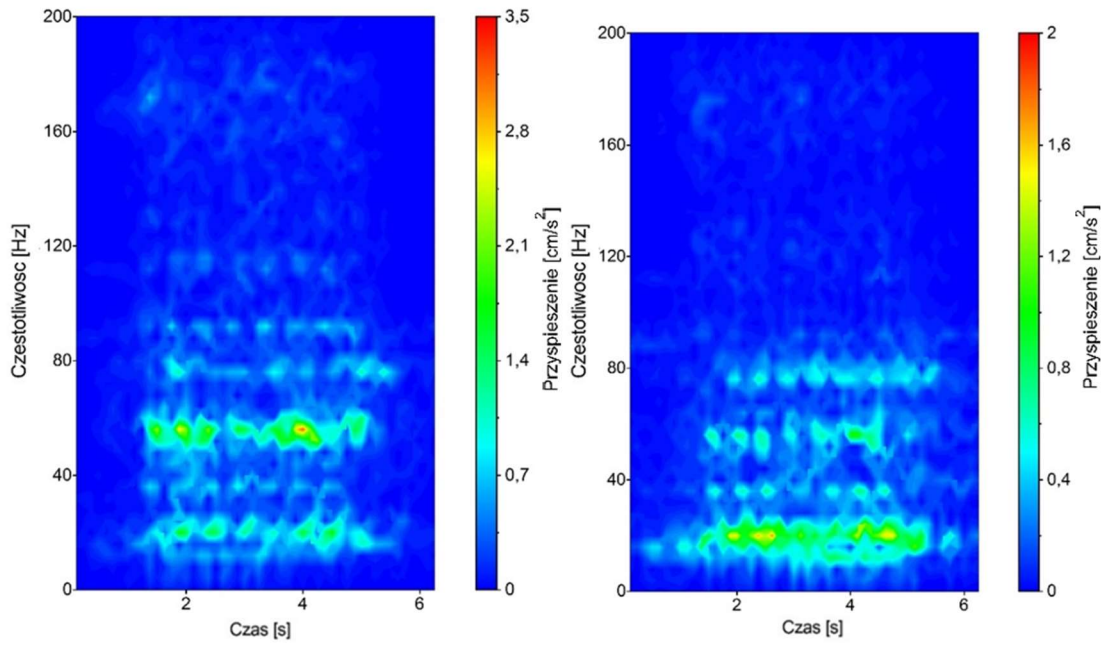


Rysunek 53 Krótkookresowa transformata Fouriera – przejazd Pendolino z prędkością 40 km/h (czujnik P-24z) (opracowanie własne)

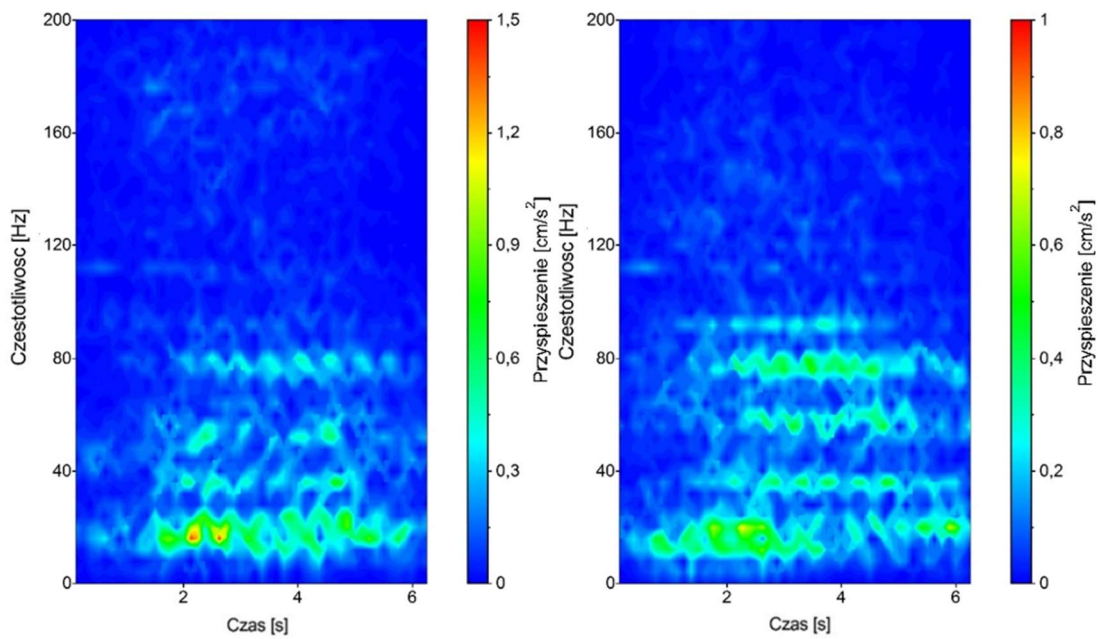


Rysunek 54 Schematyczny rozstaw kół i wózków w pociągu Pendolino

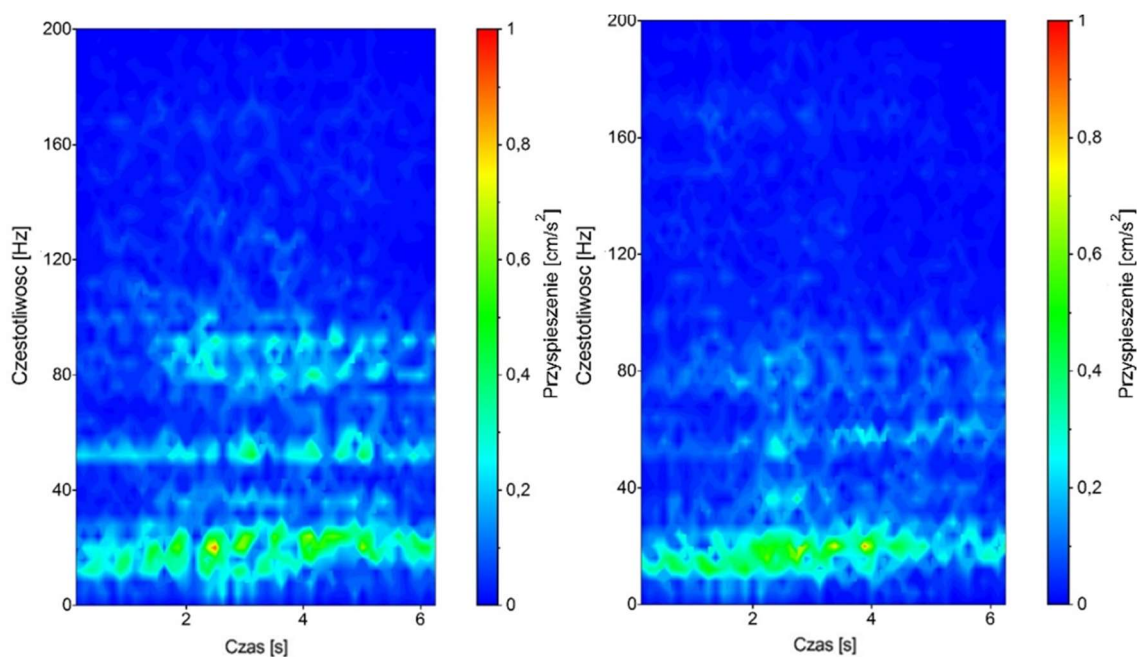
Siedmiokrotnie wyższe wartości na czujniku P-06z uzyskano dla przejazdu z prędkością 160 km/h. Nie można dokładnie wykazać liczby wózków – jednak sygnał wyraźnie posiada elementy wzmocnień sygnału w dziedzinie czasu. Pasma dominujące w pierwszym punkcie pomiarowym (otoczenie 50 Hz) zostaje bardzo szybko stłumione. Drgania dominujące w pozostałych punktach pomiarowych występują w paśmie o częstotliwości nie przekraczającej 20 Hz. Maksymalne wartości czterech ostatnich punktów pomiarowych są zbliżone (około 1 cm/s^2). Czas trwania pomiaru ze względu na prędkość pociągu skraca się czterokrotnie. Wyniki analizy przedstawiono wykresach (Rysunek 55 – Rysunek 58).



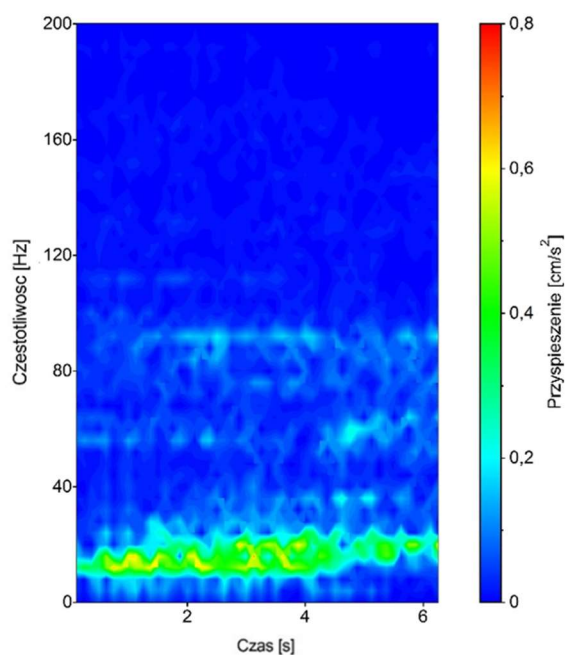
Rysunek 55 Krótkookresowa transformata Fouriera – przejazd Pendolino z prędkością 160 km/h (czujniki P-06z i P-09z) (opracowanie własne)



Rysunek 56 Krótkookresowa transformata Fouriera – przejazd Pendolino z prędkością 160 km/h (czujniki P-12 i P-15z) (opracowanie własne)



Rysunek 57 Krótkookresowa transformata Fouriera – przejazd Pendolino z prędkością 160 km/h (czujniki P-18 i P-21z) (opracowanie własne)



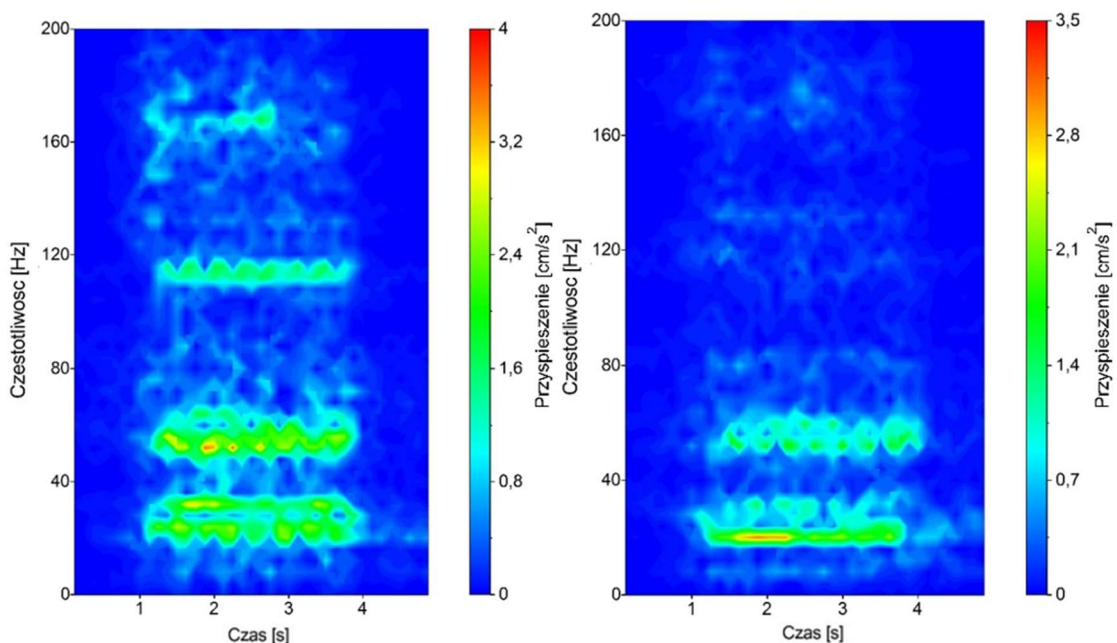
Rysunek 58 Krótkookresowa transformata Fouriera – przejazd Pendolino z prędkością 160 km/h (czujnik P-24z) (opracowanie własne)

Maksymalne wartości przyspieszeń drgań przy dalszym zwiększaniu prędkości (z 160 km/h na 270 km/h) wykazują dalszy wzrost wartości drgań. W punkcie P-06z zauważa się dwa mocno dominujące pasma (otoczenie 25 Hz i 55 Hz). Niższe z pasm jest najlepiej przenoszone wraz ze wzrostem odległości i jego dominację można

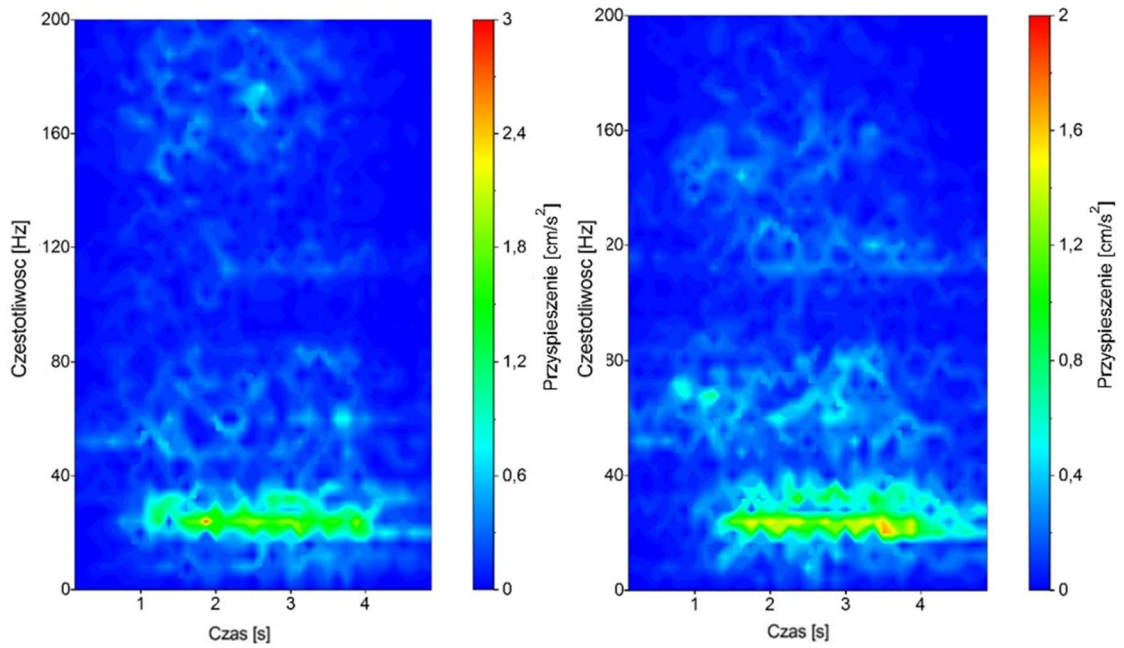
zaobserwować na każdym z czujników. Dodatkowo tylko w pierwszym punkcie pomiarowym wyróżnia się częstotliwość w otoczeniu 115 Hz – tak wysoka częstotliwość dominująca nie występowała przy przejazdach z niższą prędkością. Również ze względu na prędkość skraca się czas trwania sygnału, nie przekracza on 5 sekund. Analizę STFT dla przejazdu przedstawiono na poniższych wykresach (Rysunek 59 – Rysunek 62).

W przypadku analizy wszystkich przebiegów i ich transformat można zauważyć, iż pociąg Pendolino na całej długości przejazdu wywołuje równomierne drgania, nie występują tu jak w przypadku pociągów np. InterCity różnica w wartościach przyspieszeń drgań wzbudzanych pierwszym członem i pozostałymi (największe drgania wywoływane lokomotywą i dużo mniejsze wagonami).

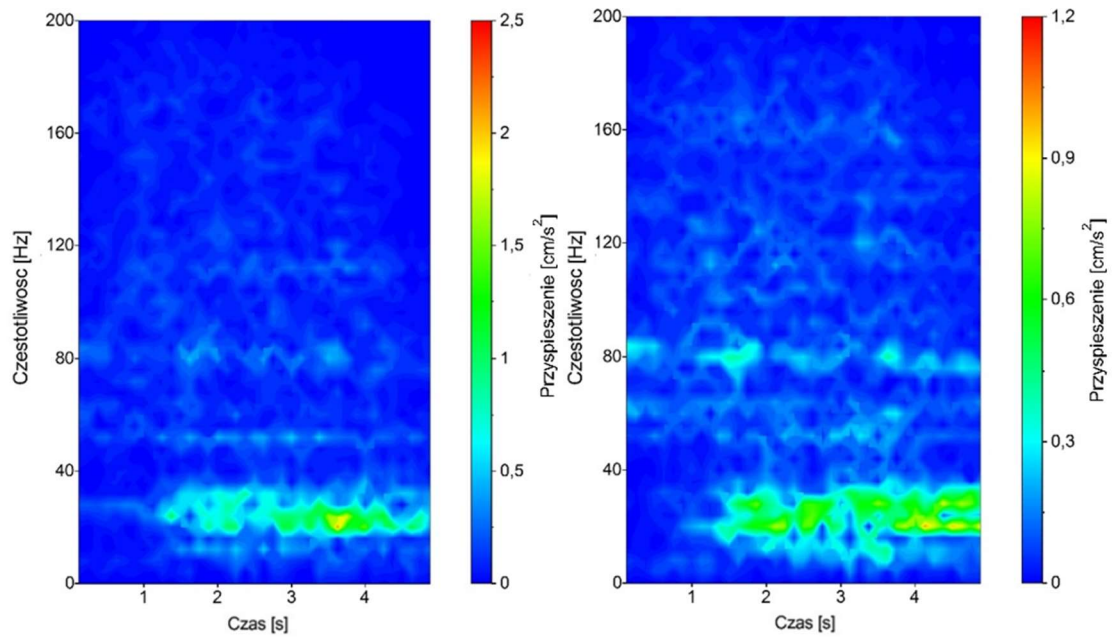
Jak pokazały analizy najszybciej tłumione są wyższe pasma częstotliwości. Przyszłościowe działania mające na celu redukcję drgań powinny się skupić przede wszystkim na tłumieniu drgań niskoczęstotliwościowych w sprecyzowanym zakresie pasma.



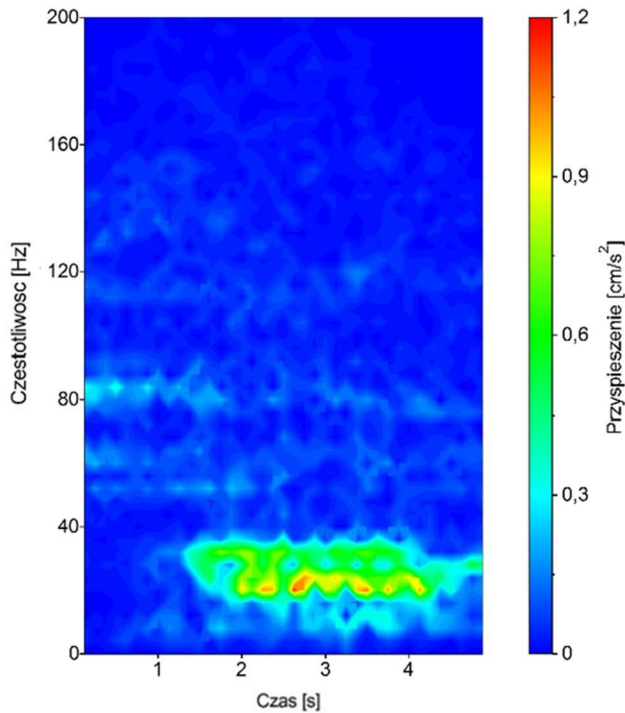
Rysunek 59 Krótkookresowa transformata Fouriera – przejazd Pendolino z prędkością 270 km/h (czujniki P-06z i P-09z) (opracowanie własne)



Rysunek 60 Krótkookresowa transformata Fouriera – przejazd Pendolino z prędkością 270 km/h (czujniki P-12z i P-15z) (opracowanie własne)



Rysunek 61 Krótkookresowa transformata Fouriera – przejazd Pendolino z prędkością 270 km/h (czujniki P-18z i P-21z) (opracowanie własne)



Rysunek 62 Krótkookresowa transformata Fouriera – przejazd Pendolino z prędkością 270 km/h (czujnik P-24z) (opracowanie własne)

5.5 Ciągłe przekształcenie falkowe (CWT)

Kolejnym krokiem w analizie sygnałów jest analiza falkowa. Ciągłą transformatą falkową (ang. CWT – Continuous Wavelet Transform) funkcji jest przekształcenie całkowe, o postaci [83]:

(5.5-1)

$$CWT_f(a, b) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt$$

gdzie:

a – parametr skali (przesunięcie w dziedzinie częstotliwości),

b – parametr przesunięcia w dziedzinie czasu (t),

t – czas,

f(t) – analizowany sygnał,

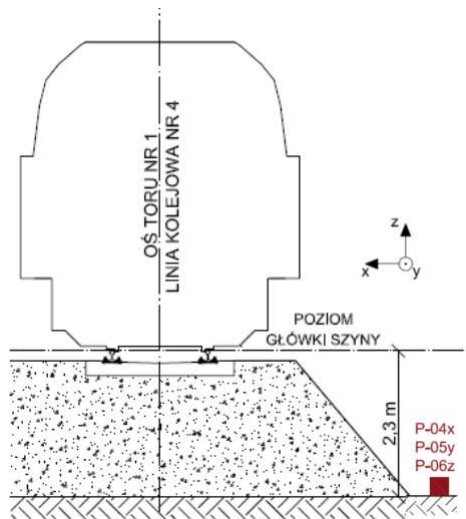
$\Psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$ – funkcja macierzysta (jądro transformacji falkowej).

Przekształcenie falkowe stosuje się w celu podzielenia funkcji ciągłej na falki. W przeciwieństwie do transformaty Fouriera, ciągła transformata falkowa posiada

zdolność do konstruowania reprezentacji czasowo-częstotliwościowej sygnału, który zapewnia bardzo dobrą lokalizację czasu i częstotliwości. CWT jest stosunkowo nową metodą i została opracowana w celu poprawy wydajności STFT. Informacje i propozycje zastosowania tej analizy są dostępne w literaturze dot. analizy sygnału [84] [85] [86], [87]. Selektywność i dobre umiejscowienie w dziedzinie czasu powoduje, że falki nadają się do aproksymacji sygnałów zmiennych w czasie. Równie istotną cechą reprezentacji falkowej jest fakt, że zawiera informacje o sygnale na różnych poziomach szczegółowości [83].

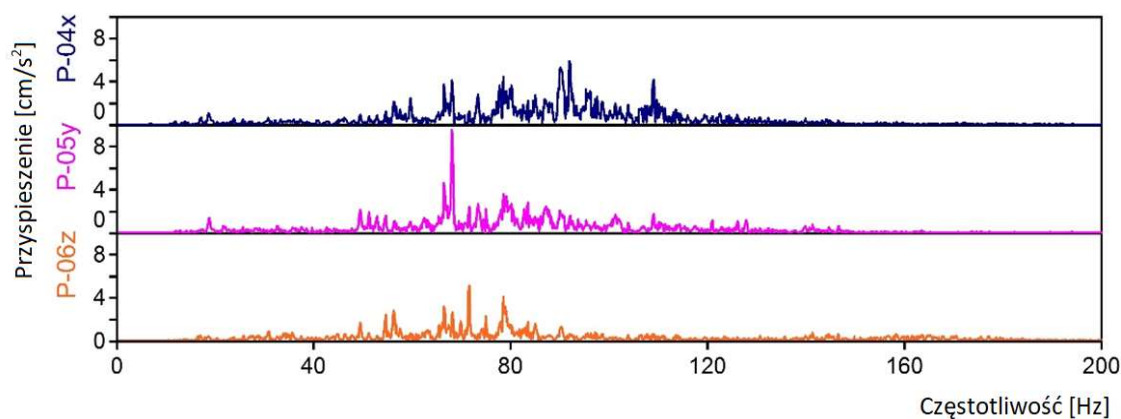
Początkowe próby zastosowań analiz falkowych do analizy drgań komunikacyjnych można znaleźć w publikacji [88]. Analizy falkowe są stosunkowo młodym i nie do końca rozpoznanym tematem i w publikacjach naukowych zestawienie drgań komunikacyjnych z analizą falkową jest swego rodzaju nowatorskim podejściem nie stosowanym na dużą skalę w budownictwie, w tym w kolejowym. Obliczenia w ramach poniższej dysertacji związane z analizą CWT wykonano przy użyciu programu FlexPro.

W rozprawie przykładowo przedstawiono analizę wyników pomiarów drgań gruntu w jednym wybranym punkcie – punkt najbliższy źródła drgań poza nasypem kolejowym na poligonie B. Położenie punktu pomiarowego przedstawiono na ilustracji (Rysunek 63). Dla optymalnych efektów porównawczych różnych analiz zbadano wyniki drgań wywołanych przez dwa typy pociągów poruszających się z prędkością 160 km/h po torze nr 1. W celu porównania wyników analiz metodą STFT i CWT przykładowo wybrano rezultaty uzyskane podczas jazdy Pendolino i InterCity.

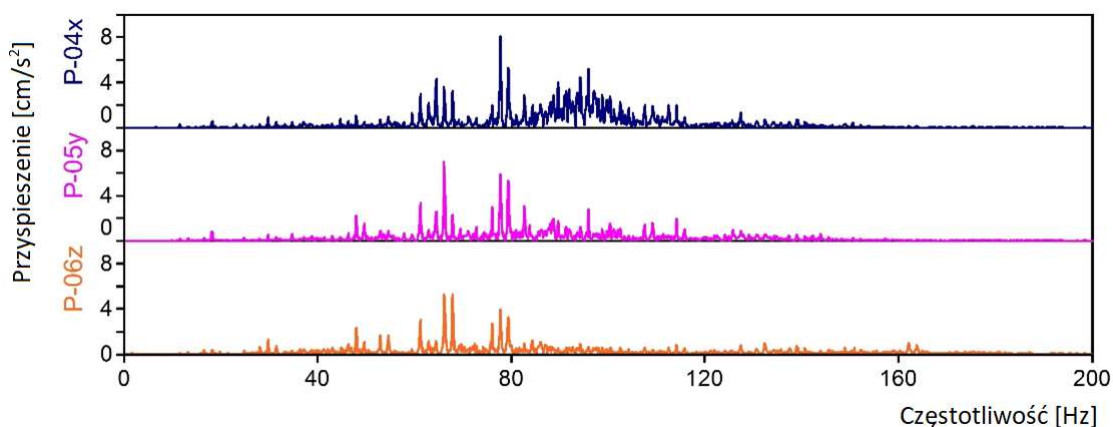


Rysunek 63 Czujniki przy nasypie - poligon B - drgania w kierunku X, Y, Z (opracowanie własne)

Przejęcie z dziedziny czasu (przebiegi czasowe przyspieszenia powierzchni gruntu) do domeny częstotliwości przeprowadzono za pomocą szybkiej transformacji Fouriera (FFT). Transformatę zaimplementowano dla częstotliwości do 200 Hz. Przedstawiono (Rysunek 64) FFT rejestrowane na powierzchni przy nasypie dla przejazdu pociągu InterCity. Analogicznie pokazano dane dla Pendolino (Rysunek 65). Największa amplituda drgań dla pociągu InterCity występuje w kierunku Y (P-05y) i wynosi $9,5 \text{ cm/s}^2$ przy częstotliwości 68 Hz. Istotnym pasmem częstotliwości składowych poziomych (P-04x i P-05y) jest pasmo częstotliwości 50 – 115 Hz. Dla składowej pionowej pasmo częstotliwości dominujących jest węższe i zawiera się w przedziale 50 – 90 Hz. W płaszczyźnie poziomej pociąg Pendolino wywołuje mniejsze drgania poziome równoległe (P-05y), ale wyższe prostopadłe (P-04x) do osi toru. Dominujące pasmo częstotliwości jest analogicznie rozłożone jak w przypadku pociągu InterCity.



Rysunek 64 FFT – przejazd pociągu InterCity z prędkością 160 km/h – tor nr 1 – poligon B (opracowanie własne)



Rysunek 65 FFT – przejazd pociągu Pendolino z prędkością 160 km/h – tor nr 1 – poligon B (opracowanie własne)

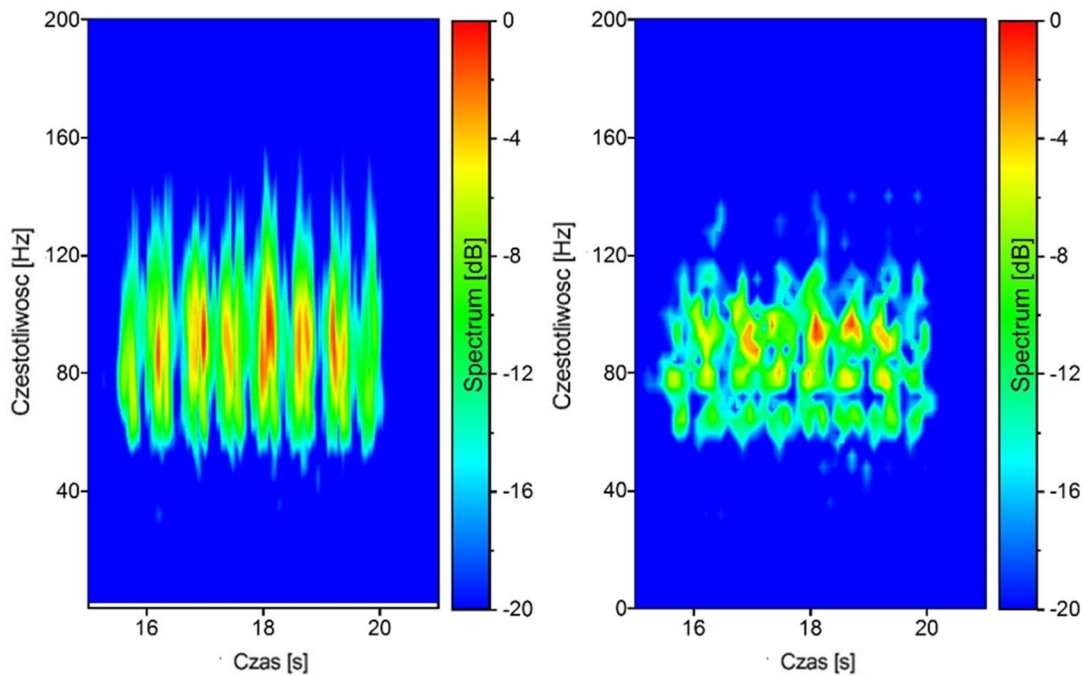
5.5.1 Analiza w dziedzinie częstotliwościowo – czasowej

Analizę sygnału z wykorzystaniem STFT i CWT dla czujników P-04x, P-05y, P-06z przedstawiono na rysunkach (Rysunek 66 – Rysunek 71). Do porównania obu analiz użyto logarytmicznej jednostki miary spektrum decybel (dB). Pozwala ona na uwidocznienie zależności i uwypuklenie zmian względnych. Wartość amplitud przyspieszeń [cm/s²], które przy tak dobranej skali pominięto, uzyskano we wcześniejszych analizach FFT. W badanym zjawisku skoncentrowano się na udziale poszczególnych wartości w dziedzinie czasowo-częstotliwościowej, dlatego zdecydowano się na taki zabieg. Na poniższych rysunkach każdorazowo pierwsza analiza to wykresy uzyskane przy zastosowaniu analizy CWT, natomiast druga porównawcza jest analizą – STFT.

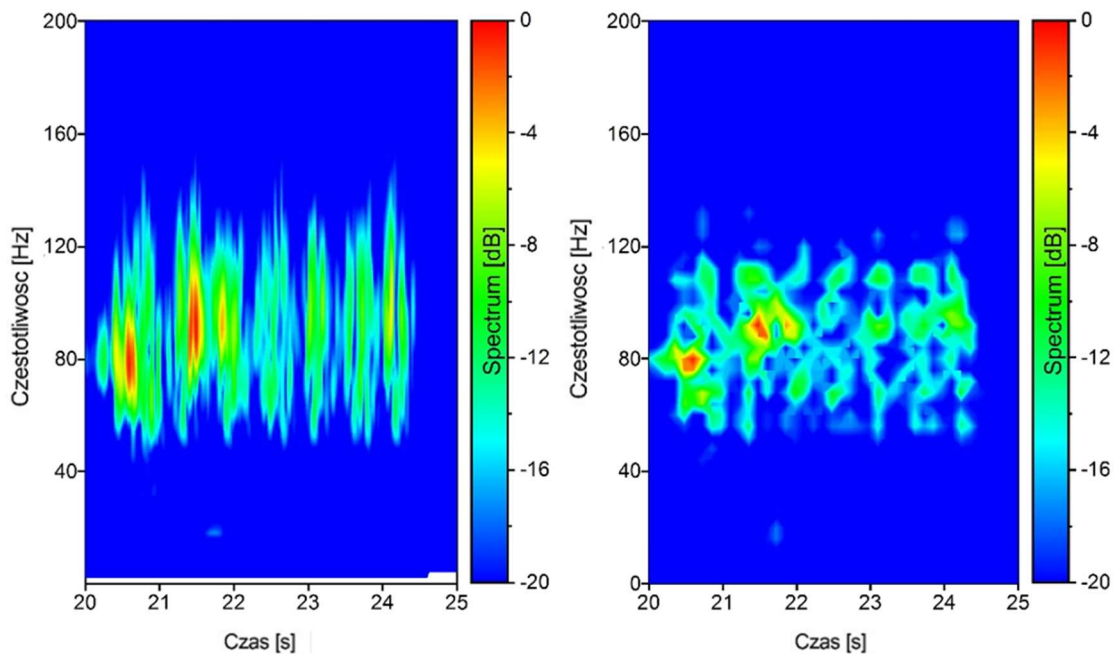
Pierwsze zestawienie (Rysunek 66) przedstawia analizę dla pociągu Pendolino – składowej poziomej X drgań prostopadłych do osi toru. Osiem punktów wzbudzenia (osiem zestawów kołowych) jest wyraźnie widocznych podczas przejazdu pociągu. Jak poprzednio przy analizie STFT, widoczne wzbudzenia generowane są grupami zestawów kołowych (Rysunek 54). Pierwsza i ostatnia grupa wózków zawiera połowę liczby kół – środkowe wózki lokalizowane są po dwa, na końcach pociągu mamy pojedynczy wózek, dlatego drgania indukowane tam są wyraźnie mniejsze. Omawiany rozkład w dziedzinie czasu lepiej obrazuje analiza CWT. Jednak przy tak dobranych parametrach analizy rozkład w dziedzinie częstotliwości lepiej przedstawia wykres STFT. Przy takim doborze parametrów widać rozmycie danych dla każdej z analiz w innej dziedzinie, co należy uwzględniać przy wyborze parametrów analizowanych sygnałów. Dla kompleksowej informacji zaleca się używania kilku różnych parametrów – zagęszczając okna w dziedzinie czasu lub częstotliwości, trzeba mieć na uwadze, że wzrost dokładności jednej z dziedzin (czas/częstotliwość) wiąże się z pogorszeniem drugiej. W omawianym przykładzie celowo dobrano inny priorytet dziedzin dla STFT i CWT – aby wykazać różnice wyników analiz, natomiast nie należy wiązać informacji jakoby STFT dawał lepsze wyniki w dziedzinie częstotliwości a CWT w dziedzinie czasu. Obie z tych metod mogą zmienić parametr dominujący z częstotliwości na czas i na odwrót.

Kolejny wykres (Rysunek 67) przedstawia analizę dla pociągu InterCity. Jest to typowy układ dla tego typu pociągu – lokomotywa plus wagony. Największą wartość obserwujemy dla pierwszego elementu (lokomotywy), a znacznie mniejszą dla reszty pociągu (wagonów). Jak powyżej, w tym przypadku CWT lepiej reprezentuje charakterystykę przyspieszenia drgań w dziedzinie czasu, ale STFT lepiej odnosi się do dziedziny częstotliwości. Analizy zarówno STFT, jak i CWT dają w przypadku pociągów, w których łatwo można wymienić lokomotywę lub poszczególne wagony – bardzo szybką możliwość redukcji drgań, które uwidoczniają się na jednym z członów trakcji. Pendolino stanowiąc elektryczny zespół wieloczłonowy w razie pogorszenia stanu jednego z wózków musi zostać jako cała jednostka wyłączone z użytku lub użytkowane do osiągnięcia granicznych wartości, natomiast w przypadku pociągów lokomotywa plus wagony mamy szybką możliwość wymiany pojedynczego wagonu/lokomotywy. Doraźne stosowanie analiz częstotliwościowo – czasowych może pomagać w szybkiej redukcji drgań przez wymianę „najgorszych elementów” – bez konieczności wymiany całego składu. Dodatkowo stosowanie szczególnych

(wyselekcjonowanych) zestawień na linii kolejowe o zwiększonej wrażliwości na drgania – np. gęsta zabudowa mieszkalna. A używanie starszych składów do ruchu manewrowego lub w terenach niezabudowanych.

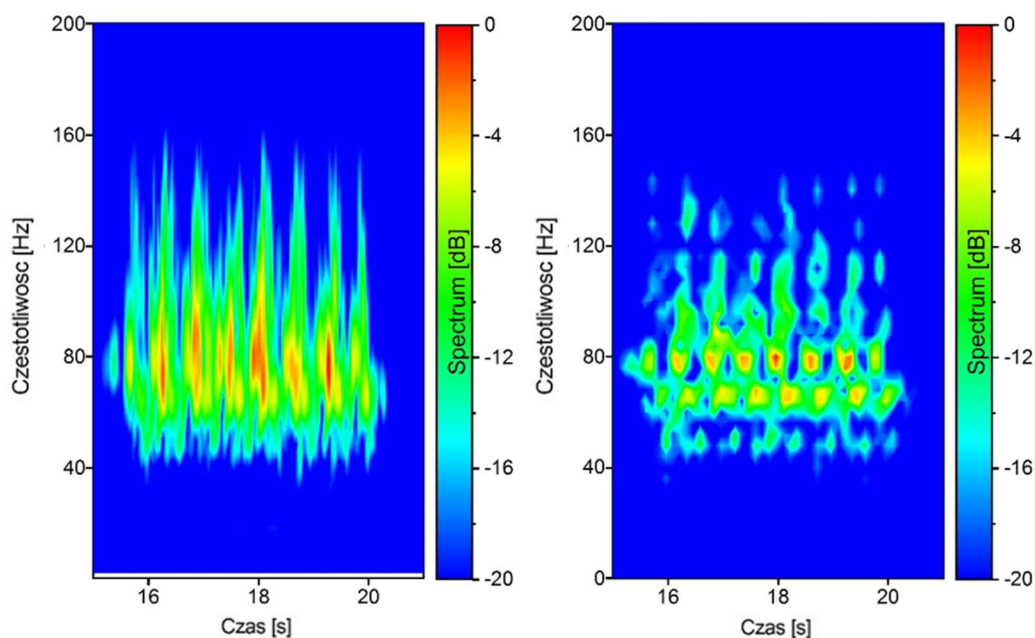


Rysunek 66 Porównanie CWT i STFT – przejazd pociągu Pendolino – prędkość 160 km/h – poligon B – czujnik P-04x (opracowanie własne)

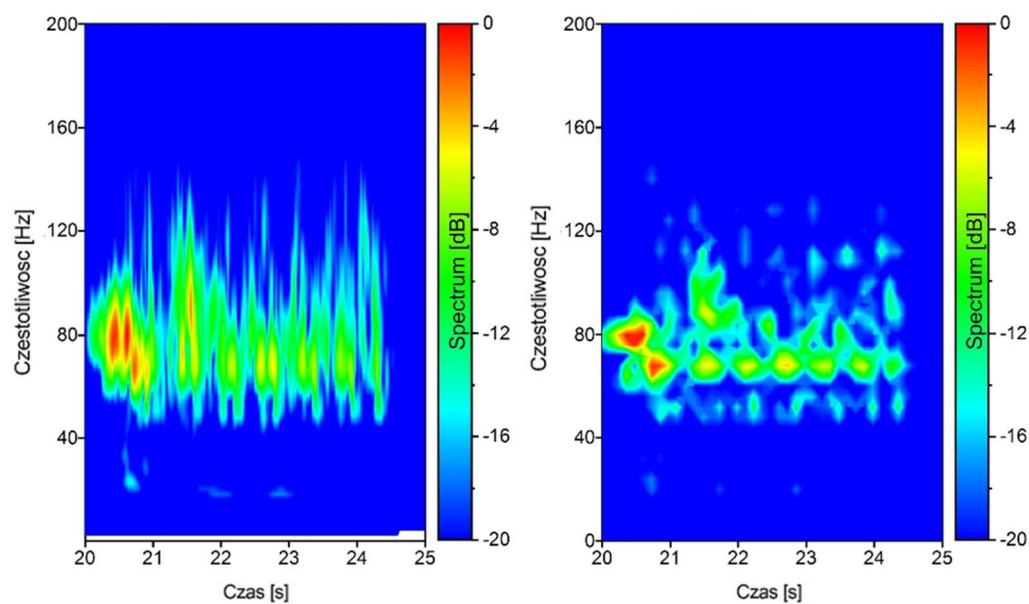


Rysunek 67 Porównanie CWT i STFT – przejazd pociągu Intercity – prędkość 160 km/h – poligon B – czujnik P-04x (opracowanie własne)

Wykresy uzyskane dla składowej poziomej Y drgań równoległej do osi toru kolejowego (P-05y) przedstawiono na poniższych wykresach (Rysunek 68 i Rysunek 69). Analizy zapisów drgań dla punktu bezpośrednio przy nasypie kolejowym wykazują bardzo podobny charakter obu składowych poziomych drgań (x i y) oraz ich reprezentację zależnościową przy pomocy rozważanych analiz.



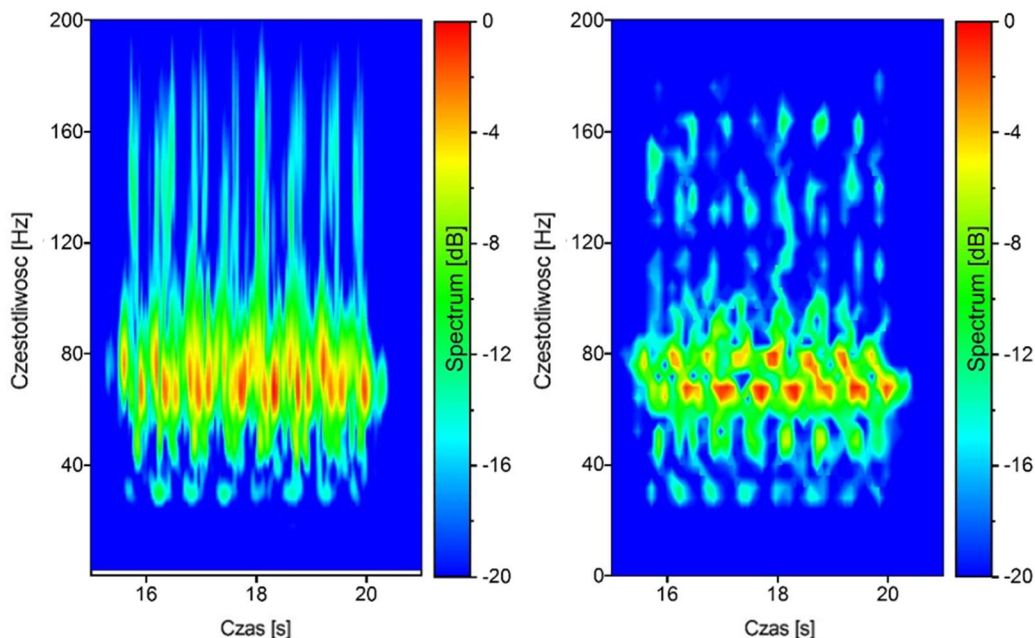
Rysunek 68 Porównanie CWT i STFT – przejazd pociągu Pendolino – prędkość 160 km/h – poligon B – czujnik P-05y (opracowanie własne)



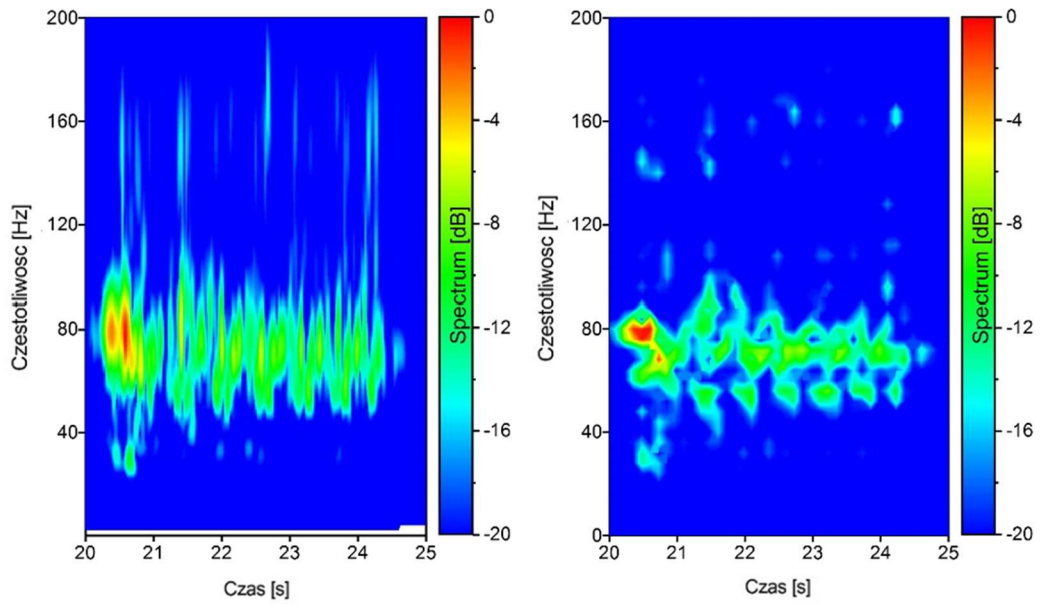
Rysunek 69 Porównanie CWT i STFT – przejazd pociągu Intercity – prędkość 160 km/h – poligon B – czujnik P-05y (opracowanie własne)

Rozkład wartości składowej pionowej drgań (P-06z) odbiega od wcześniej prezentowanych wartości składowych pionowych. Podczas przejazdów pociągów Pendolino drgania dla pierwszej i ostatniej grupy kół są wyższe w porównaniu do pozostałych grup niż w przypadku składowych poziomych (Rysunek 70). Na przykładzie pociągu InterCity największa intensywność sygnału występuje w pierwszej sekundzie przebiegu (Rysunek 71). W obu przypadkach można zaobserwować wzbudzenie drgań o częstotliwości około 160 Hz, które nie występują dla drgań poziomych X i Y. Podobnie jak w przypadku składowych poziomych drgań, reprezentację osi czasu lepiej wprowadza CWT, a oś częstotliwości jest bardziej widoczna w STFT (j.w. zależność otrzymana przez dobór parametrów analiz).

Analiza falkowa (CWT) będąc bardziej zaawansowaną formą przedstawionych w rozdziale rozważań w dziedzinach dwuwymiarowych stanowi pole rozwoju i weryfikacji dla sygnałów generujących drgania o niestacjonarnym charakterze źródła. Analiza CWT, nie przynosi znacząco więcej istotnych informacji niż krótkookresowa transformata Fouriera w przypadku bardzo prostej weryfikacji taboru. CWT posiada potencjał rozwojowy, który ciężko przypisać bardziej mechanicznemu rozkładowi dzielącemu FFT na okienka czasowe. Możliwości analiz CWT potwierdzają również najnowsze publikacje naukowe [89]–[91].



Rysunek 70 Porównanie CWT i STFT – przejazd pociągu Pendolino – prędkość 160 km/h – poligon B – czujnik P-06z (opracowanie własne)



Rysunek 71 Porównanie CWT i STFT – przejazd pociągu Intercity – prędkość 160 km/h – poligon B – czujnik P-06z (opracowanie własne)

6 Analiza wyników drgań gruntu i budynków

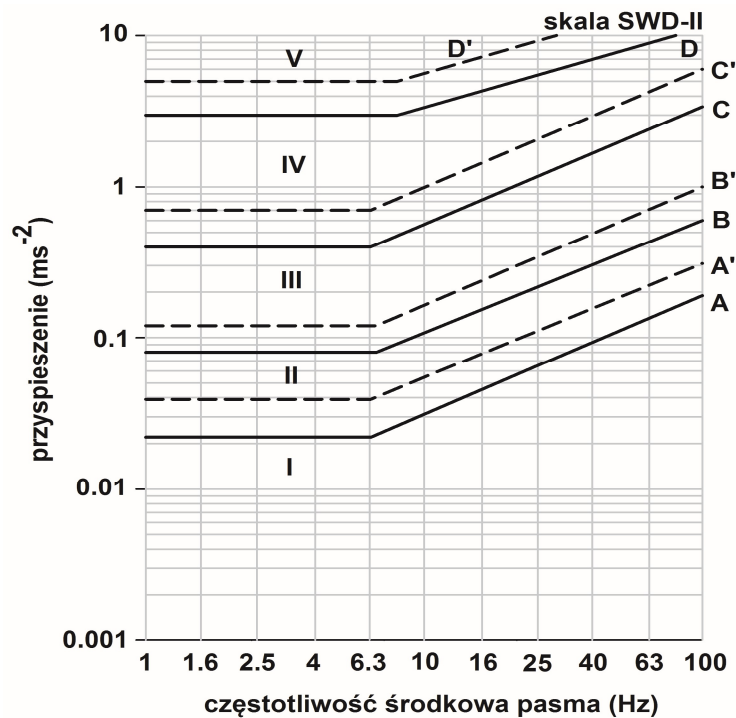
Wcześniejsze analizy pokazują możliwości i wyniki różnych metod analizy sygnału. Służą one bardziej celom wizualizacji i zrozumienia problemu oraz rozwoju nauki – niemniej jednak nie są analizami normatywnymi. Szersze i zweryfikowane zastosowanie musi poprzedzać szereg badań i ekspertyz. W związku z faktem, że skale wpływów dynamicznych (skale SWD), a nie poziom maksymalnych wartości drgań a_{max} , czy analizy wcześniej przedstawione są uznawane przez polskie prawo za obowiązujące i miarodajne, kolejny rozdział rozwinie analizy w obrębie normatywnych narzędzi.

6.1 Skala Wpływów Dynamicznych (SWD)

Zgodnie z obowiązującą normą PN-B-02170: 2016-12 Ocena szkodliwości drgań przekazywanych przez podłoże na budynki definiuje się obligatoryjne wymagania.

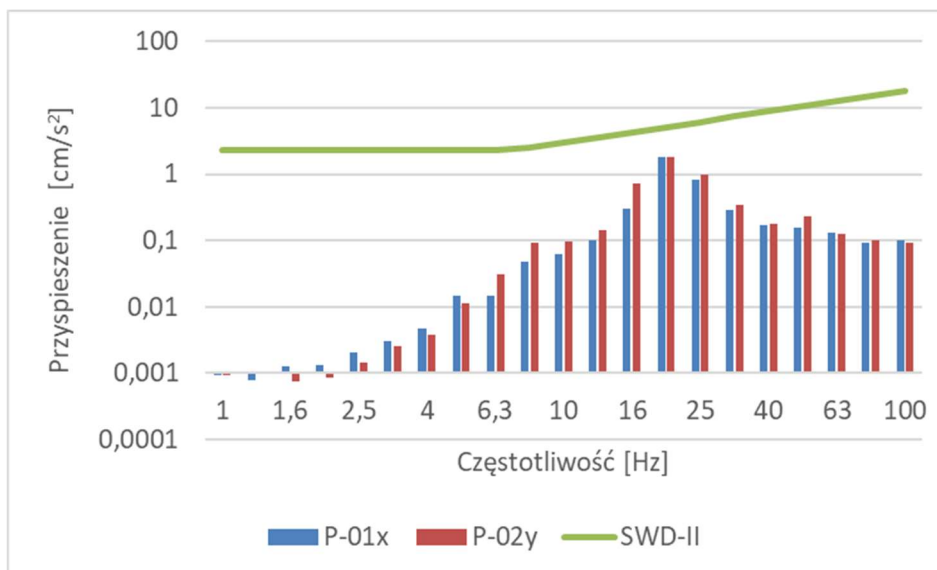
W przybliżonej ocenie wpływu drgań na budynki z zastosowaniem skal SWD wykorzystuje się rejestr drgań w punktach zgodnie z zasadami podanymi w przedmiotowej normie. Zapisy przebiegów składowych poziomych drgań analizuje się w pasmach 1/3 oktawowych i weryfikuje w ww. skalach. Na wykresie (Rysunek 72) przykładowo przedstawiono linie opisujące strefy wpływu drgań na budynki wg skali SWD-II. Na skali występuje pięć stref (I – V) oddzielonych czterema liniami granicznymi (A – D).

Strefy szkodliwości rozkładają się na skali od strefy I, w której występujące drgania są pomijalne w ocenie wpływu drgań na budynek do strefy V – drgania powodują zagrożenie życia ludzkiego i/lub awarię budynku przez destabilizację i przemieszczanie się elementów konstrukcyjnych. W przypadku groźby powstania drgań w strefie V budynek nie może być użytkowany [22].

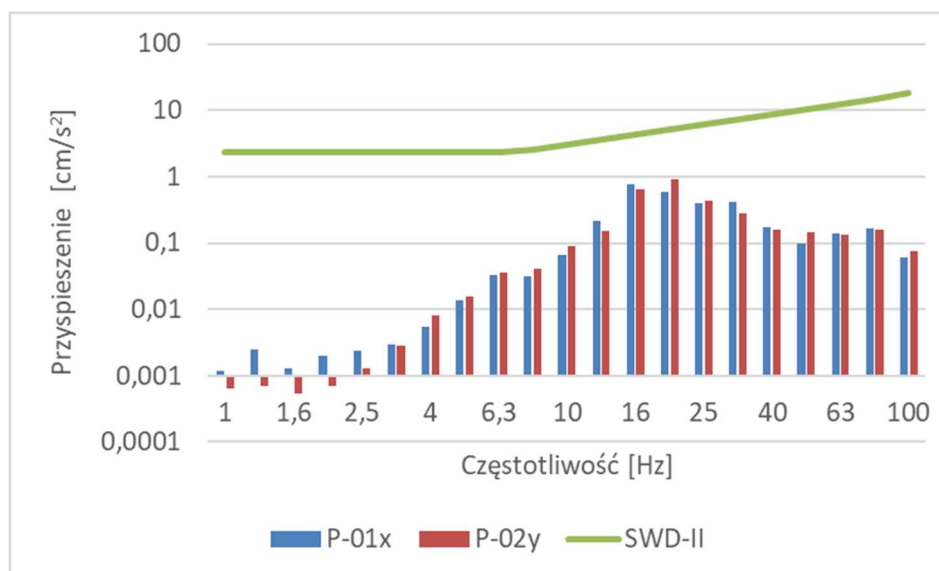


Rysunek 72 Linie opisujące strefy wpływu drgań na budynki według skali SWD-II podane we współrzędnych: częstotliwość środkowa pasma 1/3 oktawowego- maksymalne przyspieszenie drgań w paśmie [22]

Analizowany budynek na poligonie C (Rysunek 23) można ocenić korzystając z przybliżonej metody oceny za pomocą skali SWD-II, z uwagi na jego konstrukcję i wymiary. Przeanalizowano wszystkie przejazdy zarejestrowanych przebiegów pociągów (badania na poligonie C oraz porównawcze na poligonie C') pod względem wpływu drgań na budynek. Analizy przebiegów zarejestrowanych składowych poziomych drgań X, Y zgodnie ze skalą SWD-II nie wykazały negatywnych wpływów na analizowany obiekt. Głównym czynnikiem wpływającym na taki wynik, pomimo dużych prędkości pociągów w trakcie pomiarów, jest fakt, że obiekt znajdował się w znacznej odległości od torów. Przykładowo przedstawiono wykresy przyspieszeń w pasmach tercjowych składowych poziomych X, Y drgań generowanych przejazdami pociągów o największej prędkości w danym poligonie dla każdego z taboru – pociąg Pendolino – prędkość 250 km/h (Rysunek 73) i pociąg InterCity – prędkość 160 km/h (Rysunek 74). Na każdym z wykresów umieszczono linię graniczną A (rozdzielającą I i II strefę drgań).



Rysunek 73 Skala SWD - II – Pendolino 250 km/h – poligon C (opracowanie własne)



Rysunek 74 Skala SWD-II – InterCity 160 km/h – poligon C (opracowanie własne)

Drgania wzbudzone przejazdami pociągów jak wskazano wyżej nie przekraczały dopuszczalnych limitów normatywnych. Ze względu na logarymiczną skalę osi pionowej na podstawie tak zaprezentowanych wykresów nie można zweryfikować, które pasmo częstotliwości znajduje się najbliżej II strefy tzn. posiada najmniejszy zapas bezpieczeństwa. Z tego względu w zaktualizowanej w 2016 roku normie PN-B-02170: 2016-12 [22] wprowadzono Wskaźnik Odczuwalności Drgań przez Budynki.

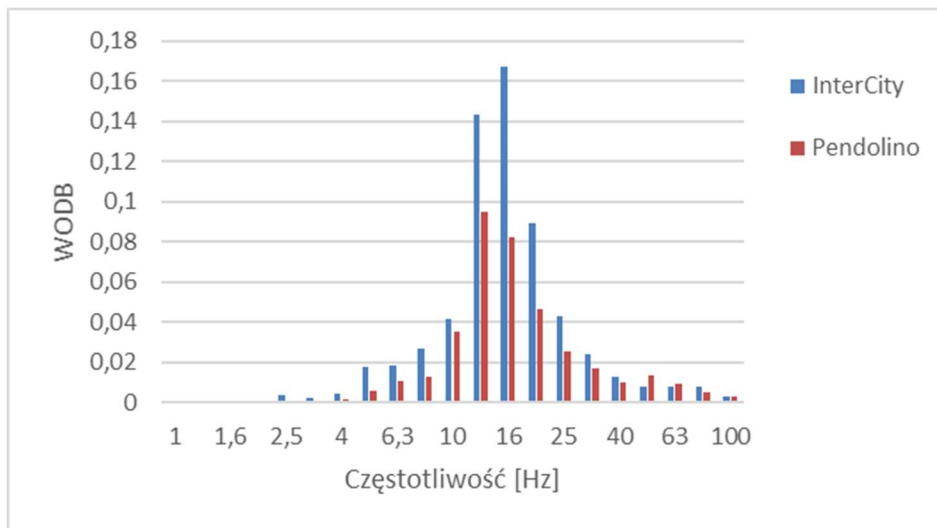
6.2 Wskaźnik Odczuwalności Drgań przez Budynki (WODB)

W ocenach wpływów drgań na budynek wykorzystuje się także Wskaźnik Odczuwalności Drgań na Budynki (WODB), szczególnie jeśli występujące drgania zakwalifikowane są do I i II strefy szkodliwości wg skal SWD. Wskaźnik daje informację, jak odległe są parametry drgań występujących w budynku od linii granicznej *A* ($WODB \leq 1$) lub ile razy została przekroczona dolna granica uwzględnienia wpływów dynamicznych na budynek ($WODB > 1$). Wskaźnik wyrażony jest w postaci dwóch liczb: bezwymiarowej, wyznaczonej przez iloraz przyspieszenia drgań w paśmie terejowym i odpowiadającej mu granicy *A* w tym paśmie oraz środkowej częstotliwości pasma 1/3 oktawy, w której wyznacza się WODB. Przydatność tego stosunku polega na tym, że wynik końcowy staje się niezależny od pasma częstotliwości dając informację automatycznie – wynik większy od jedności bezwzględnie informuje o przekroczeniach poziomu I strefy drgań w obiekcie. Zaletą wskaźnika i przewagą nad wcześniejszą prezentacją wyników jest bezpośrednia informacja o swego rodzaju zapasie bezpieczeństwa. Skale SWD będąc skalami logarytmicznymi nie dają informacji wprost szczególnie dla wyższych częstotliwości, w którym paśmie mamy do czynienia z największym zagrożeniem przekroczenia granicy szkodliwości drgań. Wadą wskaźnika, jest fakt, że odnosi się on tylko do linii *A* – tj. rozgranicza I i II strefę drgań i przestaje być pomocny, gdy mamy do czynienia z przekroczeniem następnych linii i drganiami zlokalizowanymi w III, IV i V strefie. Nie wskazuje on na strefy, wyższe konkretnie, a jedynie na fakt, czy drgania znajdują się w strefie I czy w II–V. Niemniej jednak procedurę obliczenia WODB można zmodyfikować dla wyższych linii rozgraniczających *B*, *C* i *D*. W związku z faktem, iż wszystkie zarejestrowane przejazdy mieściły się w strefie I, powyższa zmiana nie była w przedmiotowej rozprawie zasadna. Ponadto możliwe jest przejście na wskaźnik WODB w dalszej części rozprawy w analizie drgań budynku, bez konieczności powracania do tradycyjnych skal SWD i weryfikacji, czy ewentualne przekroczenie występuje w strefach wyższych niż II.

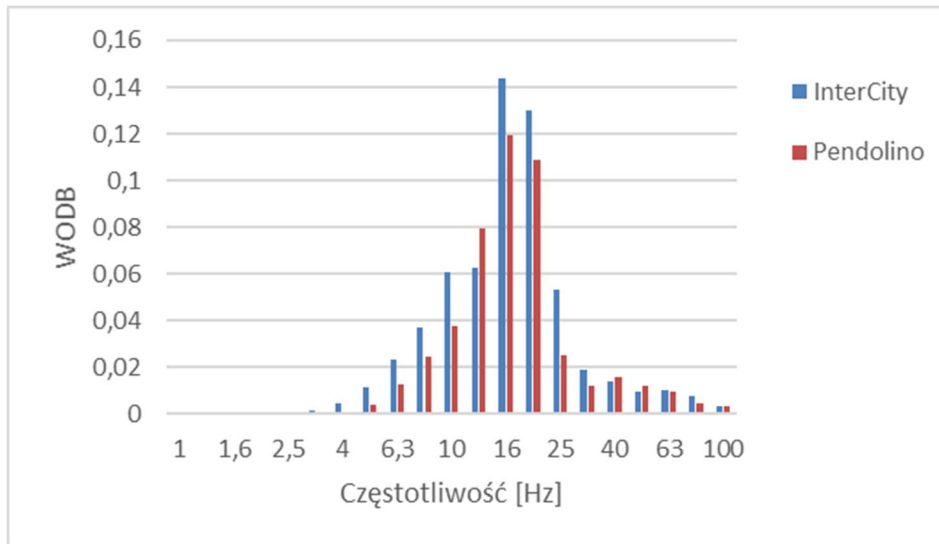
6.2.1 Analiza drgań z wykorzystaniem normatywnych analiz

W analizowanych pomiarach badany budynek znajdował się tylko na poligonie *C* i *C'*. W dalszej części pracy, jeśli nie podano inaczej analizom podlega pomiar na poligonie *C* (pomiar *C'* stanowi dla niego porównanie).

Przykładowo na wykresach (Rysunek 75 i Rysunek 76) porównywano składowe poziome drgań X i Y dla dwóch typów taboru: InterCity i Pendolino przy prędkości 160 km/h. Drgania generowane przejazdami uzyskują największe wartości wskaźnika w środkowym zakresie pasm (12,5 – 20 Hz), ale wartości uzyskane przez EMU 250 są znacząco niższe zwłaszcza w wyżej wskazanych pasmach dla drgań poziomych prostopadłych do osi toru (X). Wyniki analiz drgań równoległych do osi toru (Y) nie są zbieżne. Różnice między wartościami są mniejsze. Dominują pasma częstotliwości między 10 a 20 Hz. Dla częstotliwości 12,5 Hz tabor EMU 250 generuje wyższą wartość wskaźnik niż pociąg InterCity. Poza pojedynczą anomalią można wysunąć wniosek, że poniższe potwierdza, iż dobry stan techniczny taboru zmniejsza negatywny wpływ wibracji na środowisko.

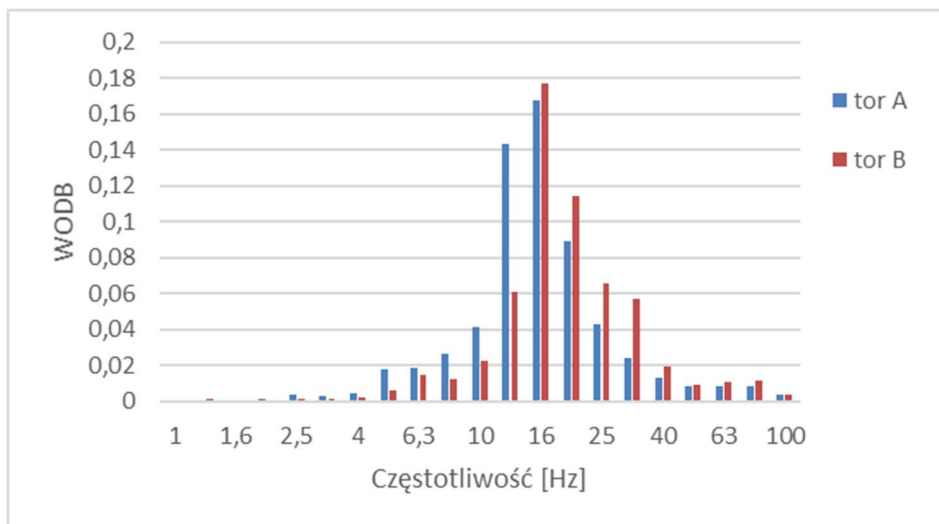


Rysunek 75 Wskaźnik WODB dla przejazdu po torze nr tor 1 – pociąg Pendolino i InterCity – prędkość $v=160$ km/h – czujnik P-01x (opracowanie własne)

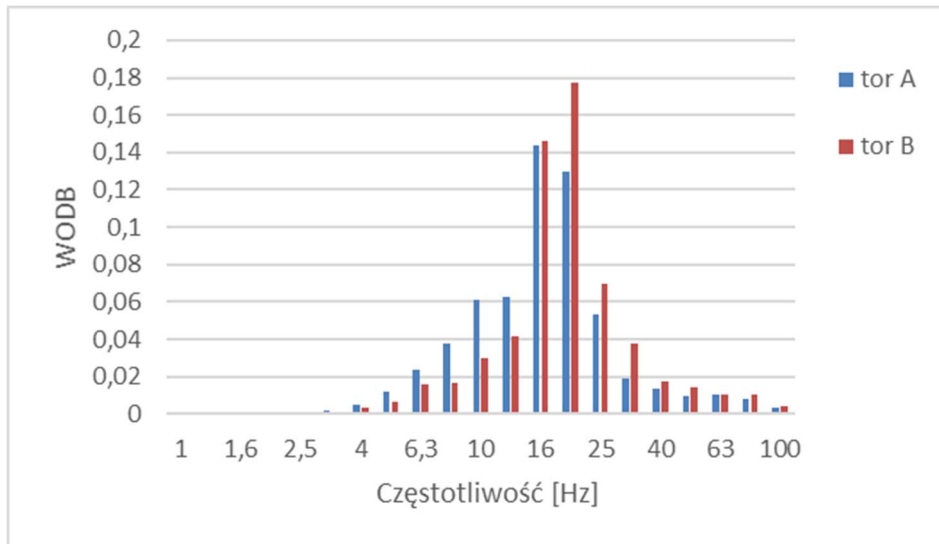


Rysunek 76 Wskaźnik WODB dla przejazdu po torze nr tor 1 – pociąg Pendolino i InterCity – prędkość $v=160$ km/h – czujnik P-02y (opracowanie własne)

W pracy wykonano również analizy wpływu drgań na budynek w zależności od toru poruszania się pociągu. Analiza taka była możliwa tylko dla pociągu InterCity. Przykładowo na rysunkach (Rysunek 77 i Rysunek 78) podano wskaźniki WODB uzyskane z analizy składowych X i Y. Wyniki analiz całego materiału pomiarowego wskazują, że wyższe wartości parametrów przyspieszania odpowiadają częstotliwości do 12,5 Hz dla toru dalszego A (tor nr 1). Powyższe może być wynikiem różnego stopnia wypełnienia pociągów pasażerami oraz stanem technicznym taboru.

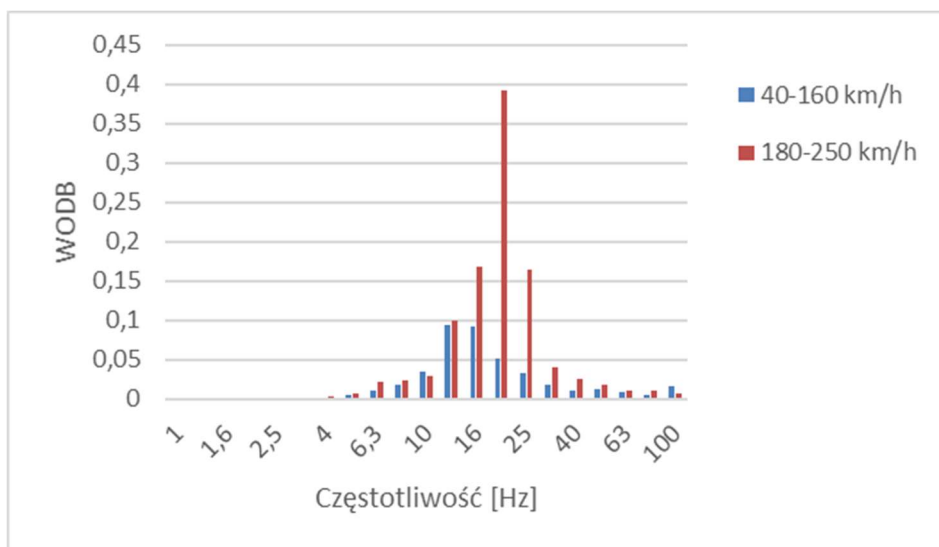


Rysunek 77 Wskaźnik WODB dla przejazdu po torze nr tor 1 i 2 – pociąg InterCity – prędkość $v=160$ km/h – czujnik P-01x (opracowanie własne)

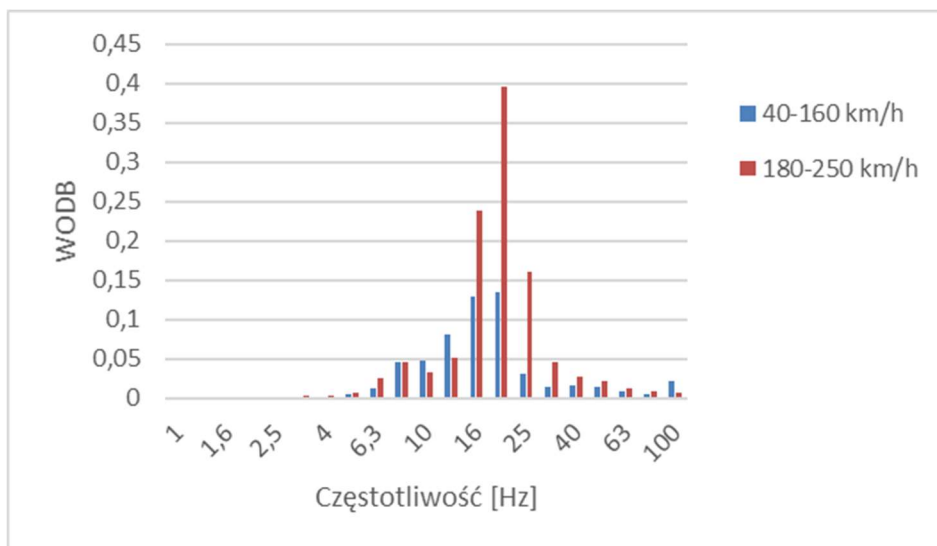


Rysunek 78 Wskaźnik WODB dla przejazdu po torze nr tor 1 i 2 – pociąg InterCity – prędkość $v=160$ km/h – czujnik P-02y (opracowanie własne)

Jednym z celów analizy było zbadanie wpływu dużych prędkości na generowane drgania od przejazdów Pendolino. Przejazdy podzielono na dwie kategorie: przejazdy o prędkości do i powyżej 160 km/h (granica wybrana ze względu na maksymalną prędkość pociągów rozkładowo kursujących po linii). Dla każdej z kategorii wybrano największe wartości wskaźnika WODB w odpowiadającym paśmie częstotliwości. Wynik analiz uzyskanych dla składowej X i Y przedstawiono na rysunkach (Rysunek 79 i Rysunek 80). Z analiz całego materiału wynika, że pasma dominujących częstotliwości 20 – 25 Hz generowanych drgań silnie zależą od wzrostu prędkości pociągu.

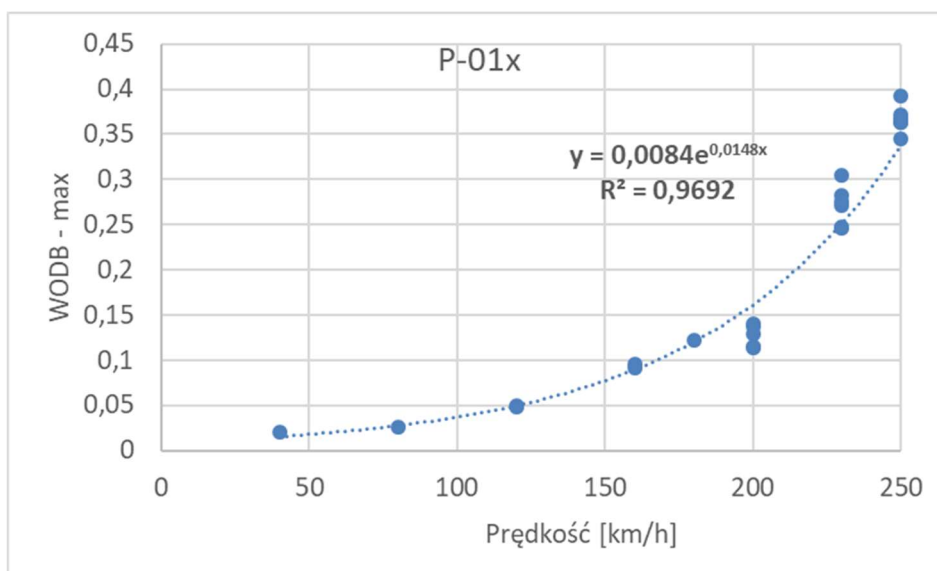


Rysunek 79 Wskaźnik WODB dla przejazdu po torze nr tor 1 – pociąg Pendolino – porównanie maksymalnych wartości dla przejazdów do 160 km/h i od 180 km/h rejestrowanych na czujniku P-01x (opracowanie własne)

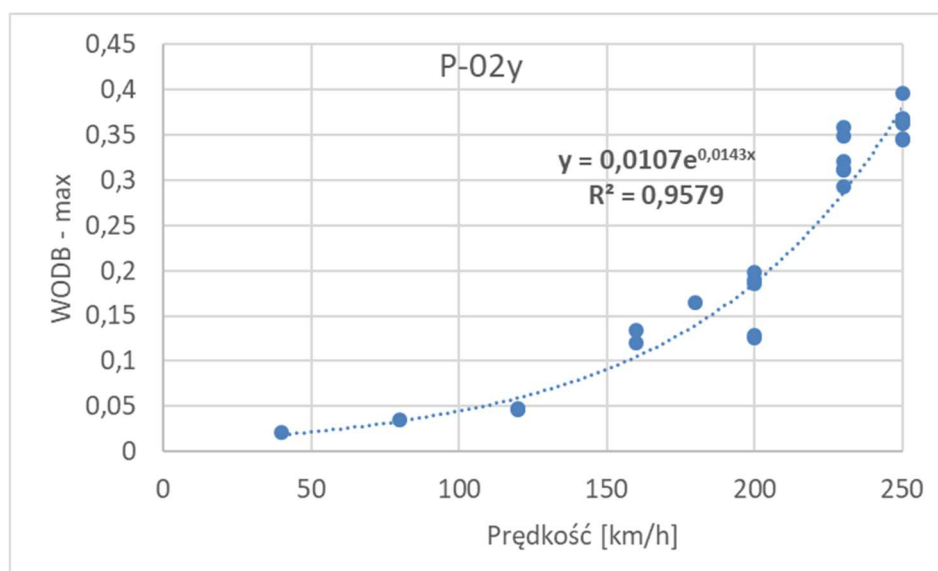


Rysunek 80 Wskaźnik WODB dla przejazdu po torze nr tor 1 – pociąg Pendolino – porównanie maksymalnych wartości dla przejazdów do 160 km/h i od 180 km/h rejestrowanych na czujniku P-02y (opracowanie własne)

Etapem finalizującym wyznaczanie prędkości granicznych dla badanego obiektu było zestawienie maksymalnych wartości wskaźnika WODB dla każdego z przejazdów – tzn. każdy przejazd reprezentowany był przez jedną wartość wskaźnika – najbardziej niekorzystną. Do tak zestawionych danych dla drgań prostopadłych (Rysunek 81) i równoległych (Rysunek 82) do osi toru dopasowano funkcje. Współczynnik determinacji R^2 dla funkcji wynosi powyżej 95% co świadczy o bardzo dobrym dopasowaniu, jednak funkcja zaniża wynik dla najwyższych prędkości przejazdu.



Rysunek 81 Zestawienie maksymalnych wartości WODB dla różnych prędkości przejazdu pociągu – czujnik P-01x (opracowanie własne)



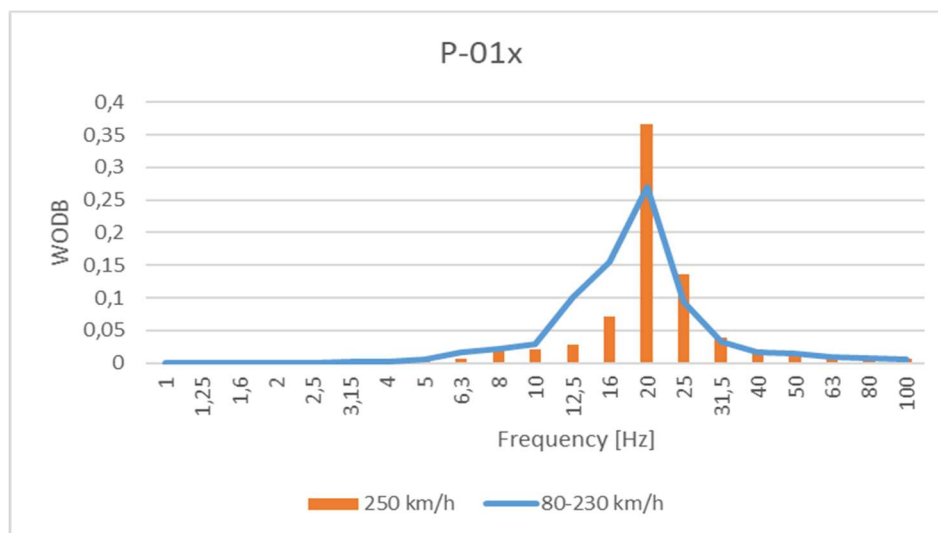
Rysunek 82 Zestawienie maksymalnych wartości WODB dla różnych prędkości przejazdu pociągu – czujnik P-02y (opracowanie własne)

Z zebranych wartości WODB wszystkich przejazdów (zarówno o niskiej jak i wysokiej prędkości) w 73% przypadków odnotowano maksymalne wartości w paśmie o częstotliwości środkowej 20 Hz. Wszystkie maksymalne wartości mieściły się w przedziale 10 – 25 Hz. Co świadczy nie tylko o najszybszym wzroście wartości drgań w danym paśmie wraz z prędkością, ale również o największych wartościach dla każdego z przejazdów – tzn. pasmo częstotliwości powinno być tłumione bez względu na planowaną prędkość, gdyż w tym zakresie występują największe amplitudy.

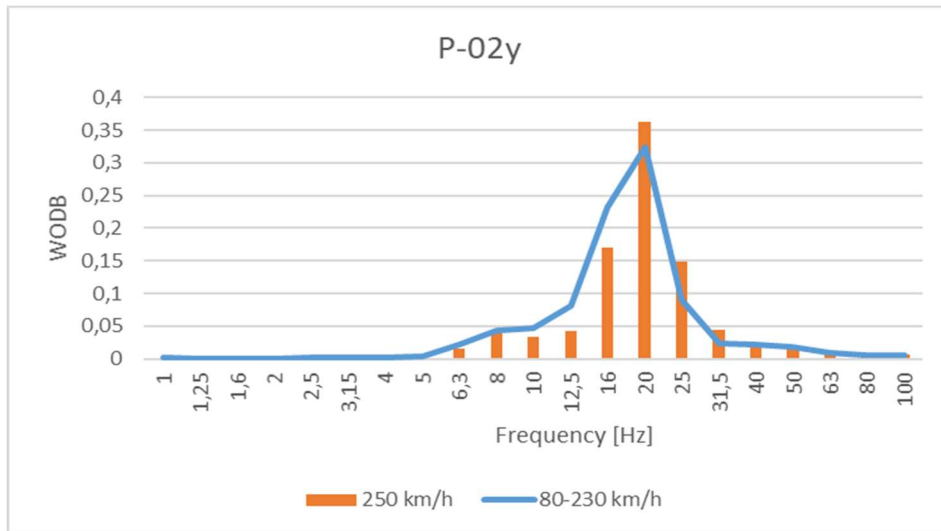
Dla wyznaczonej funkcji dopasowania zależności wartości wskaźnika WODB od wzrostu prędkości aproksymuje się prędkość, dla której WODB wynosi 1, tj. prędkość, powyżej której drgania dla badanego obiektu wykazywałyby oddziaływania lokowane w II strefie szkodliwości. Dla drgań poziomych prostopadłych do osi toru (X) wartością krytyczną prędkości pociągu byłaby prędkość 322 km/h, natomiast dla drgań równoległych do osi toru (Y) prędkość 317 km/h. Zważając na fakt, że uzyskana na poligonie B prędkość wynosiła 293 km/h, przyszłościowe osiągnięcie prędkości niewiele przekraczających 300 km/h wydaje się być realne, niemniej jednak osiągnięcie takiej prędkości będzie się wiązać z koniecznością modernizacji infrastruktury linii nr 4 i dostosowanie jej do odpowiednich prędkości, co wpłynie na redukcje generowanych drgań – dlatego przedstawiona prędkość jest prędkością teoretyczną na linii kolejowej nr 4. Obecna konstrukcja linii nie pozwala, na przejazd z prędkością osiąganą w trakcie testów. Uzyskanie ww. prędkości było możliwe wyłącznie przy zapewnieniu

odpowiednich warunków bezpieczeństwa (m.in. brak pasażerów oraz innych jednostek trakcyjnych, jak również bieżący monitoring wszystkich parametrów przejazdu) celem przeprowadzenia jazd testowych, a nie normalnej eksploatacji.

Celem weryfikacji pasm najbardziej wrażliwych na zmiany prędkościowe wykonano kolejne zestawienia. Otrzymane wartości WODB podzielono na dwie grupy. Dla przejazdów z prędkością do 230 km/h dla każdego pasma częstotliwości wybrano największe wartości WODB. Wyniki całej analizy porównano z wartościami uzyskanymi z przejazdu pociągu z prędkością 250 km/h. Wyniki przedstawiono na wykresach (Rysunek 83 i Rysunek 84). Analizowana maksymalna prędkość 250 km/h wywołała bardzo duży wzrost wartości WODB w pasmie 20 Hz i niewielki dla pasma 25 Hz. Natomiast wykazała redukcję poziomu drgań dla częstotliwości o pasmach środkowych 10 – 16 Hz. Wcześniejsze wyniki przy innego rodzaju zestawieniach wskazujące na wzrost poziomu drgań w paśmie częstotliwości 16 Hz wraz ze wzrostem prędkości. Drgania w paśmie częstotliwości 16 Hz osiągały coraz większe wartości przy wzroście prędkości natomiast przy przekroczeniu prędkości do 250 km/h występuje spadek poziomu drgań. Widoczna jest zmiana częstotliwości dominujących przy zwiększaniu prędkości.

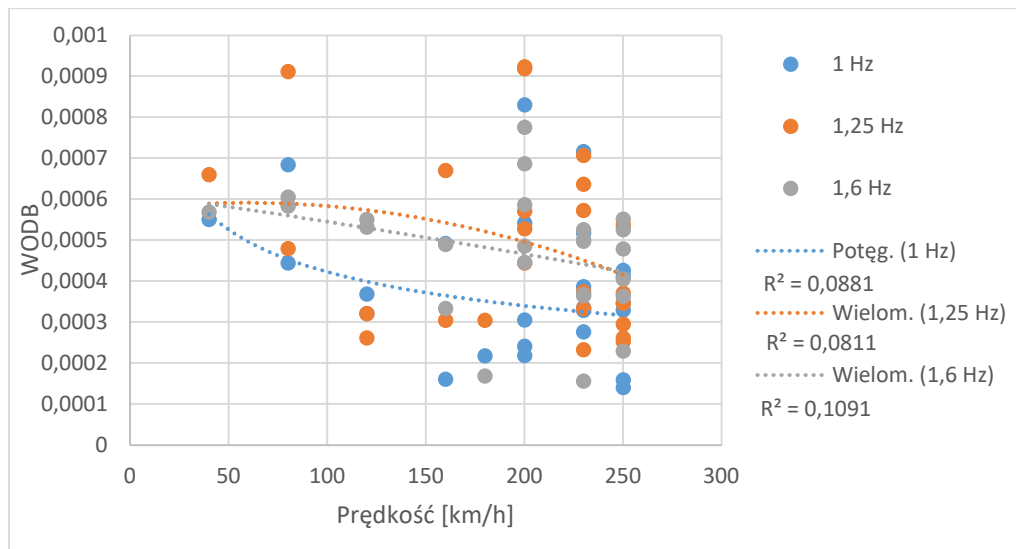


Rysunek 83 Wskaźnik WODB dla przejazdu po torze nr tor 1 – pociąg Pendolino – prędkość do 250 km/h- czujnik P-01x (opracowanie własne)

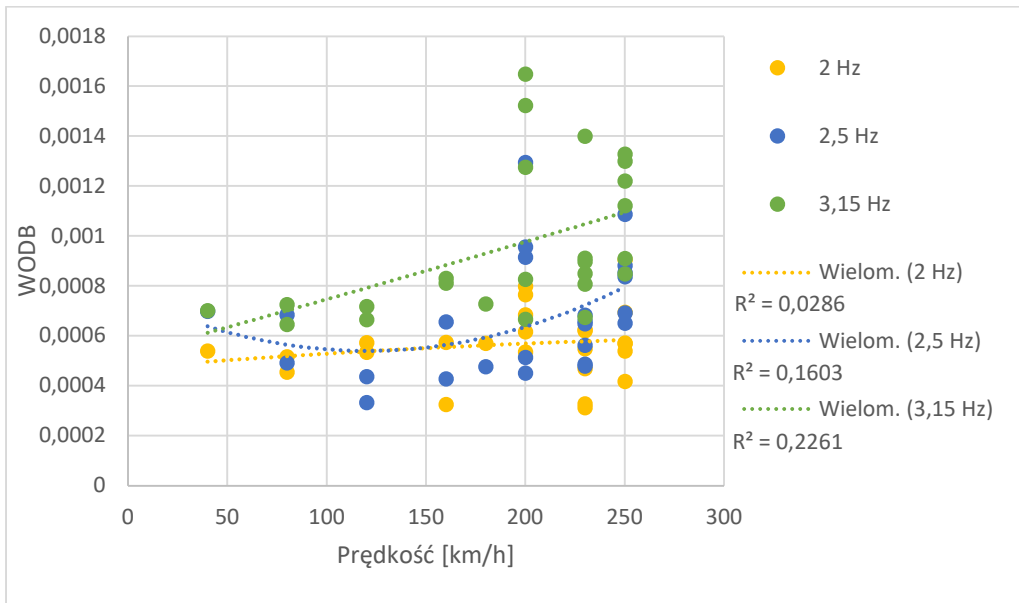


Rysunek 84 Wskaźnik WODB dla przejazdu po torze nr tor 1 – pociąg Pendolino – prędkość do 250 km/h – czujnik P-02y (opracowanie własne)

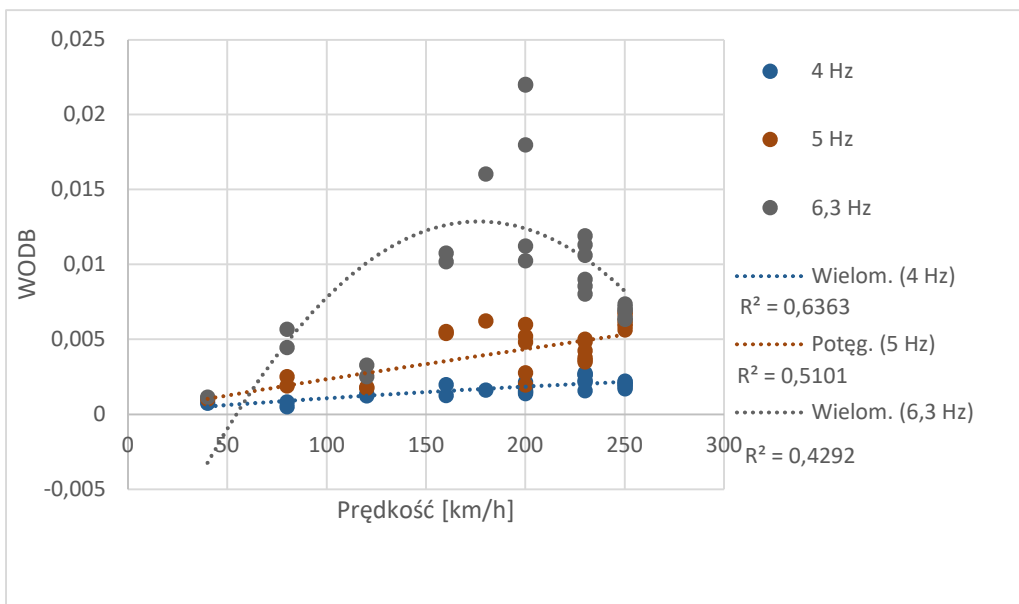
Osiągane przy różnych prędkościach wartości WODB nie tylko mogą wzrastać wraz ze wzrostem prędkości, ale również mogą zmieniać rozkład całego widma i zmieniać zakres częstotliwościowy. Z tego względu przykładowo wykonano analizę wzrostu wskaźnika WODB wraz z prędkością w pasmach 1/3 oktawowych dla czujnika P-01x. Na wykresach (Rysunek 85 – Rysunek 91) przedstawiono wyniki tych analiz. Dla każdej z częstotliwości środkowych dopasowano funkcję i obliczono współczynnik determinacji R^2 .



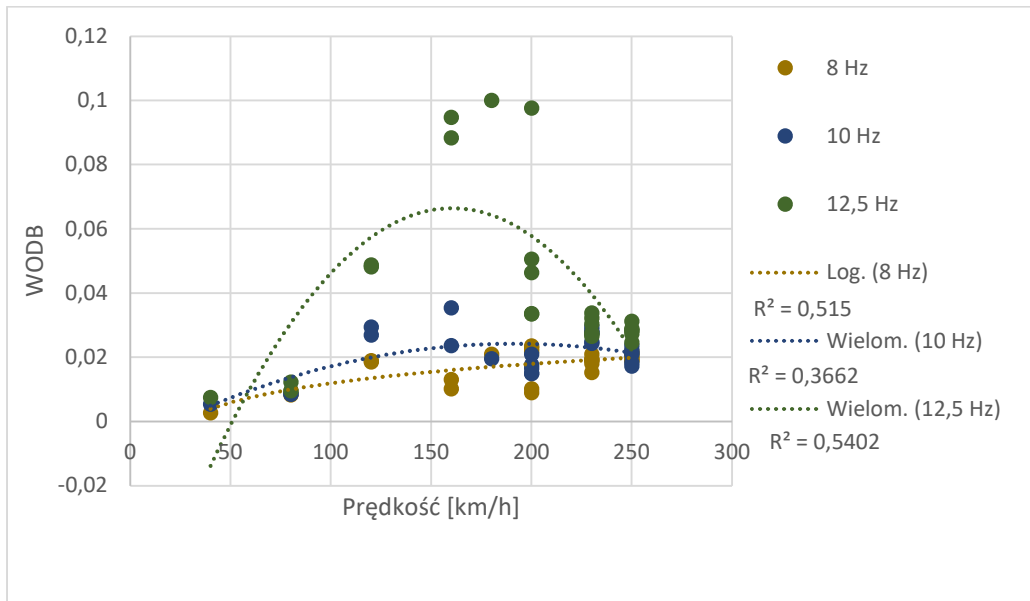
Rysunek 85 Zależność WODB od prędkości dla częstotliwości 1; 1,25; 1,6 Hz – czujnik P-01x (opracowanie własne)



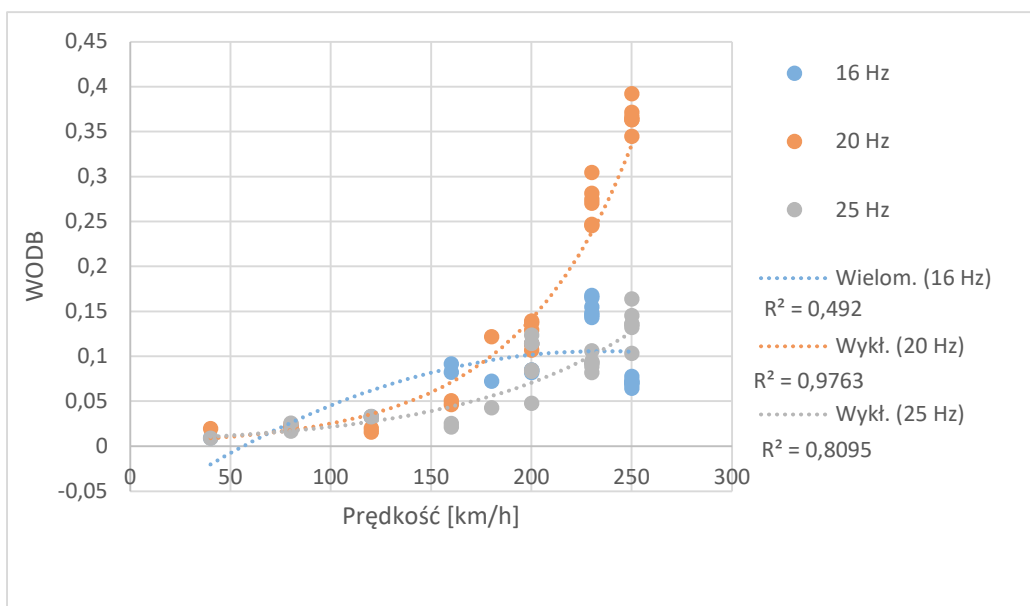
Rysunek 86 Zależność WODB od prędkości dla częstotliwości 2; 2,5; 3,15 Hz – czujnik P-01x (opracowanie własne)



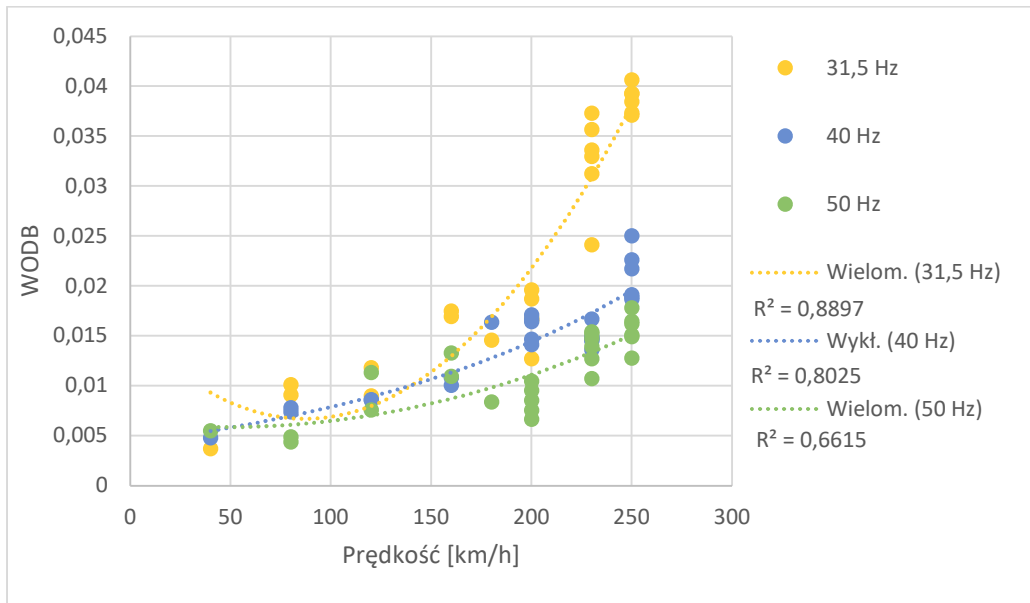
Rysunek 87 Zależność WODB od prędkości dla częstotliwości 4 Hz, 5 Hz, 6,3 Hz – czujnik P-01x (opracowanie własne)



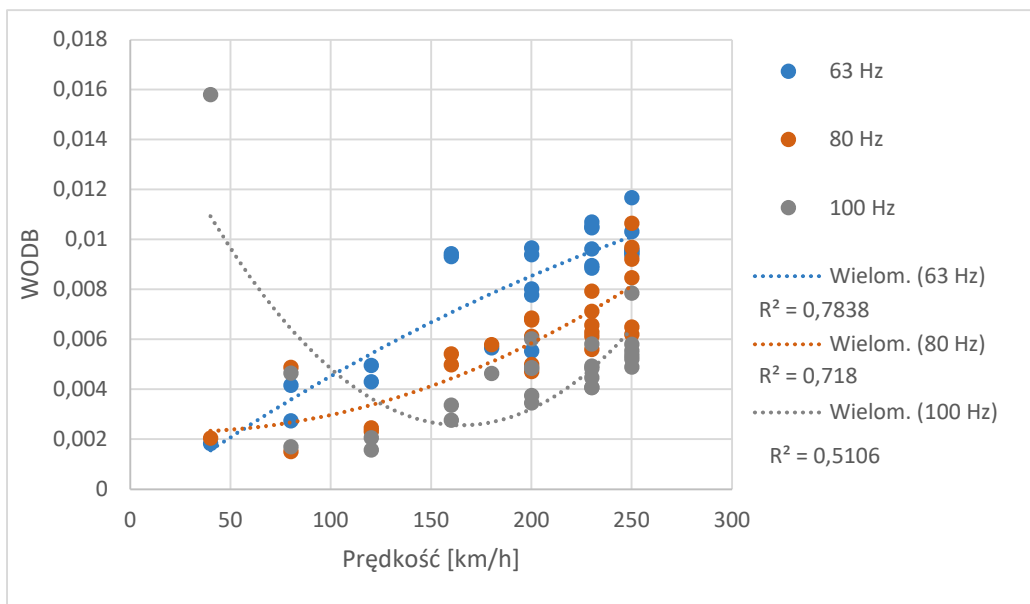
Rysunek 88 Zależność WODB od prędkości dla częstotliwości 8 Hz, 10 Hz, 12,5 Hz – czujnik P-01x (opracowanie własne)



Rysunek 89 Zależność WODB od prędkości dla częstotliwości 16 Hz, 20 Hz, 25 Hz – czujnik P-01x (opracowanie własne)



Rysunek 90 Zależność WODB od prędkości dla częstotliwości 31,5 Hz, 40 Hz, 50 Hz – czujnik P-01x (opracowanie własne)



Rysunek 91 Zależność WODB od prędkości dla częstotliwości 63 Hz, 80 Hz, 100 Hz – czujnik P-01x (opracowanie własne)

Rozkład wartości wskaźnika WODB w funkcji prędkości pociągu w paśmie do 5 Hz wykazuje charakter losowy. W zakresie częstotliwości lokalne maksima wartości WODB dla pasma 5 – 12,5 Hz lokalizowane są przy prędkościach rzędu 150 – 200 km/h, a dla pasma 16 Hz przesuwają się do prędkości 200 – 230 km/h wykazując większe uporządkowanie występowania i możliwość dopasowania funkcji. Silną zależność od prędkości wykazują wskaźnik WODB dla częstotliwość 20 Hz. Analizowana

oddzielnie bez zestawienia z maximami z innych przebiegów (różniących się dominującą prędkością) wykazuje większe usystematyzowanie i możliwość przypisania funkcji ze współczynnikiem $R^2 = 0,97$. Wówczas funkcja opisująca zależność WODB od prędkości pociągu opisana jest wzorem:

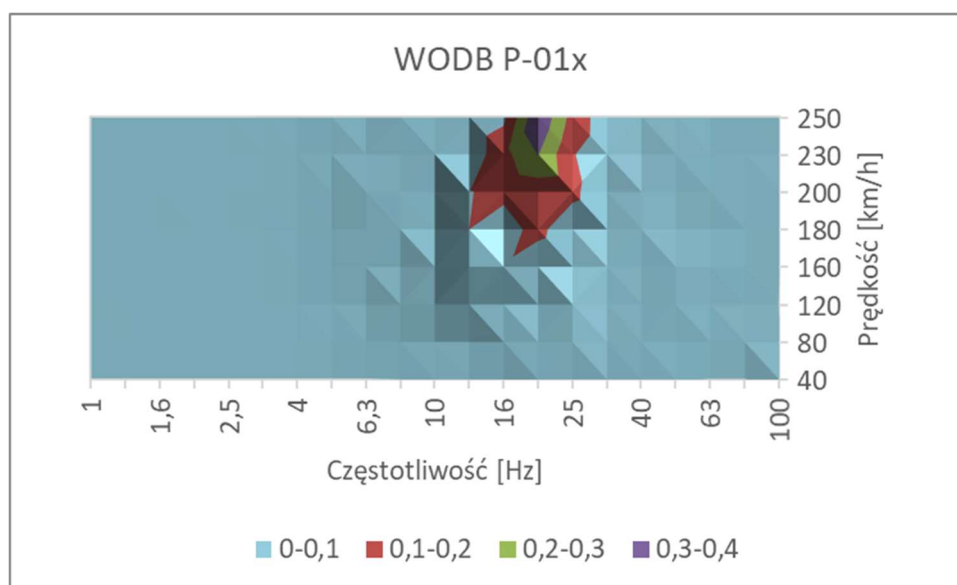
(6.2-1)

$$f(v) = 0,0045e^{0,0172v}$$

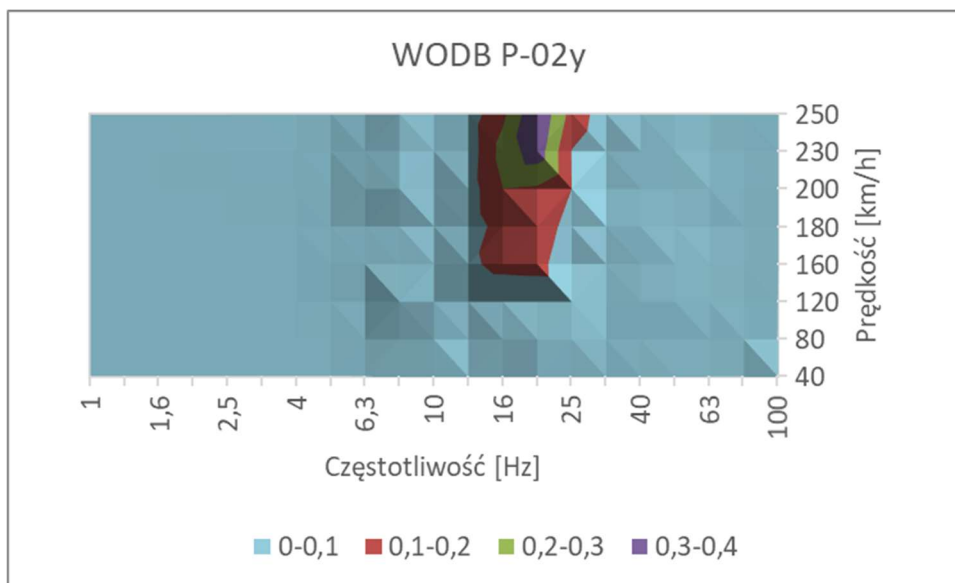
gdzie:

v – prędkości pociągu.

Funkcja ta daje wartości wskaźnika WODB równe 1 przy prędkości 315 km/h i częstotliwości 20 Hz. Pasma częstotliwości powyżej 25 Hz wykazują wzrost maksymalnych wartości wskaźnika WODB przy prędkości 250 km/h, jednak ich wartości są znacznie niższe niż przy częstotliwości 20 Hz, co nie stanowi zagrożenia szybkim przekroczeniem wartości normatywnej. Na wykresach mapowych (Rysunek 92, Rysunek 93) przedstawiono najbardziej podatne na drgania częstotliwości wraz z zakresem prędkości odpowiednio dla czujników P-01x i P-02y.



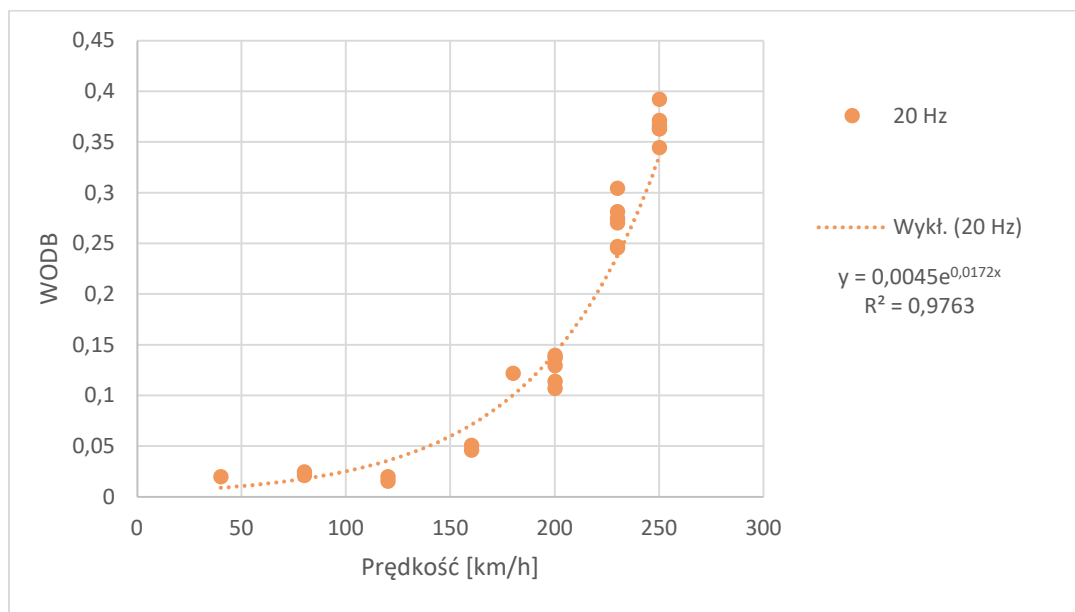
Rysunek 92 Wartości WODB dla poszczególnych pasm tercjowych dla różnych prędkościach – czujnik P-01x (opracowanie własne)



Rysunek 93 Wartości WODB dla poszczególnych pasm tercjowych dla różnych prędkości – czujnik P-02y (opracowanie własne)

Tak przedstawione wykresy wskazują silną zależność wartości WODB od zmian prędkości w wąskim paśmie częstotliwości, tak dla obu poziomych składowych drgań – zbieżnego na osi X i Y. Niemniej jednak jak pokazano w późniejszych rozdziałach przedstawione tu obliczenia są obliczeniami na budynku – odbiorniku, i mimo iż jasno z nich wynika, iż celem zmniejszenia wpływu drgań na budynek przy wzroście prędkości należy głównie tłumić częstotliwość 20 Hz, to mowa tu o tłumieniu drgań przy odbiorniku, gdyż drgania generowane przez źródło – pociąg w drodze propagacji ulegają częstotliwościowej zmianie. I generowana na budynku częstotliwość dominująca 20 Hz jest sumą składowych innych częstotliwości zmienionych na drodze propagacji.

Wykres (Rysunek 89) wskazuje, że pomimo uwzględnienia wszystkich wartości WODB (odpowiadającej składowej poziomej X drgań) w paśmie częstotliwości środkowej 20 Hz oraz analizowanych prędkości, a także wysokiego współczynnika R^2 widoczne jest niedoszacowanie wartości WODB dla dwóch największych prędkości przejazdów pociągów 230 i 250 km/h.



Rysunek 94 Zależność WODB od prędkości pociągu dla częstotliwości 20 Hz (opracowanie własne)

W kolejnym etapie analiz podjęto próbę określenia prędkości pociągu przy której wartość wskaźnika WODB osiągnie wartość 1, a wykres przy dobrym współczynniku dopasowania R^2 będzie w większą dokładnością wpisywał się w wartości uzyskane dla przejazdów najwyższych prędkości.

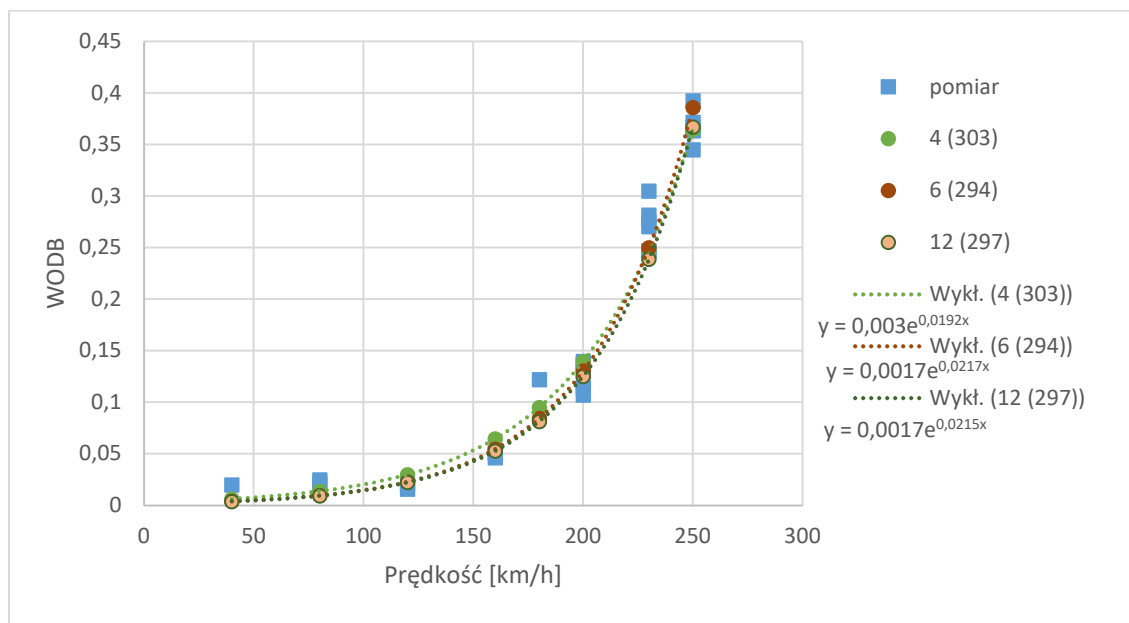
Wprowadzono następujący model działania – program badań ograniczono i zaproponowano scenariusze pomiarowe. Dla każdego scenariusza dopasowano funkcję wykładniczą, obliczono minimalną prędkość, dla której zostaje przekroczony WODB i uzyskuje wartość większa od jedności. Z tak uzyskanej funkcji obliczono wartość WODB dla wszystkich pomierzonych punktów (40 – 250km/h) weryfikując najlepsze dopasowanie do danych uzyskanych z pomiarów. W tabeli (Tabela 4) zestawiono otrzymane wyniki wraz z krótkim opisem wyboru danych pomiarowych.

Tabela 4 Selekcja otrzymanych wyników drgań w zależności od prędkości (opracowanie własne)

Lp.	Scenariusz pomiarowy	Zakres prędkości	V [km/h] gdzie WODB=1
1	Wszystkie przejazdy	40 km/h – 250 km/h	315
2	Usunięcie wyników dla v = 250 km/h	40 km/h – 230 km/h	321

3	Usunięcie wyników dla $v = 230$ i 250 km/h	40 km/h – 200 km/h	358
4	Usunięcie wyników dla $v = 40$ km/h	80 km/h – 250 km/h	303
5	Usunięcie wyników dla $v = 40$ i 80 km/h	120km/h – 250 km/h	289
6	Analizowana wyników dla $v= 200, 230$ i 250	40 km/h – 180 km/h	294
7	Wartość losowa dla każdej prędkości	40 km/h – 250 km/h	333
8	Wartość maksymalna dla każdej prędkości	40 km/h – 250 km/h	325
9	Analizowana wyników dla $v= 230$ i 250	230 km/h – 250 km/h	316
10	Średnia wartość dla każdej prędkości	40 km/h – 250 km/h	332
11	Jak punkt 10 z usunięciem wartości dla $v= 40$ i 80	120 km/h – 250 km/h	287
12	Analiza wyników dla $v= 200$ i 250	200 km/h, 250 km/h	297

Na wykresie (Rysunek 95) przedstawiono 3 najlepiej korespondujące z wynikami pomiarowymi funkcje otrzymane po selekcji danych. Otrzymane rezultaty wskazują, że do próby aproksymacji nie powinno się brać wyników generowanych przejazdami o niskiej prędkości (tu 40 km/h), zawyżają one wynik początkowy przez co prowadzą do niedoszacowania wartości prędkości najwyższych. Z kolei pominięcie prędkości niskich, lecz rozkładowych – 80 km/h prowadzi do przeszacowania wyników i wykazywania zawyżonych wartości WODB dla najwyższych prędkości – niemniej jednak wyniki po bezpiecznej stronie. Użycie celem wyznaczenia funkcji tylko 3 najwyższych danych pomiarowych (poz.6) oraz najwyższej i trzeciej z kolei (poz.12) dają wyniki nieco wyższe niż po usunięciu tylko najniższej prędkości (poz.4). Przedstawione analizy pozwalają prognozować, że wartość jednostkowa wskaźnika WODB zostanie przekroczona w zakresie prędkości 294 km/h – 303 km/h, co nie różni się więcej niż 10 % od pierwotnie szacowanej prędkości 315 km/h. Zwracając uwagę na wyniki pomiarów, które dla tego samego przejazdu, tego samego pociągu z dedykowaną, tą samą prędkością, w tym samym kierunku wykazują różnice w poziomie generowanych drgań. Spójność prognoz w granicach 10 % jest spójnością wystarczającą, a próba wyznaczenia bardziej dokładnego wyniku nie jest zasadna.



Rysunek 95 Zależność WODB od prędkości pociągu i weryfikacji danych pomiarowych dla częstotliwości 20 Hz (opracowanie własne)

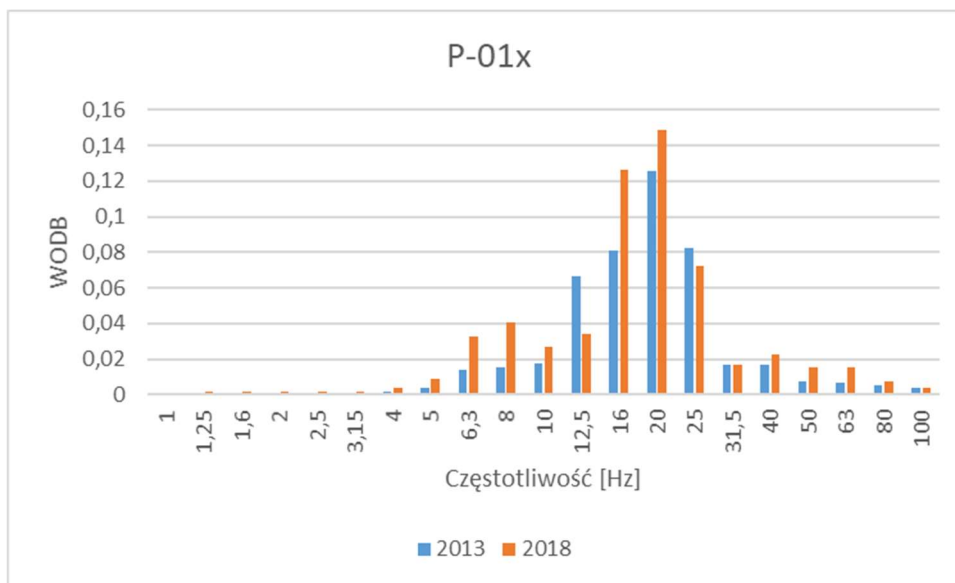
Reasumując w celu aproksymacji prędkości, dla której wartość wskaźnika WODB przekroczony wartość jednostkową należy wyznaczyć każdorazowo pasmo częstotliwości silnie zależne od prędkości i na podstawie wartości pomiarów najwyższych (proponowane dane dla 3 najwyższych wartości prędkości) wyznaczenie funkcji oraz na jej podstawie obliczenie prędkości, dla której drgania odbierane przez budynek przekroczą I strefę szkodliwości.

Obecnie obowiązującą norma [22] pod określonymi warunkami zezwala na pominięcie oddziaływania drgań w odległości większej niż 25 m od osi toru kolejowego. Powyższa analiza wykazała że przytoczone uproszczenie nie może być stosowane dla KDP, gdyż negatywny wpływ pociągów dużej prędkości na drgania odbierane przez budynki, może występować na znacznie większych odległościach. Każdorazowo obiekty reprezentatywne powinny być wyznaczone przez ekspertów w dziedzinie.

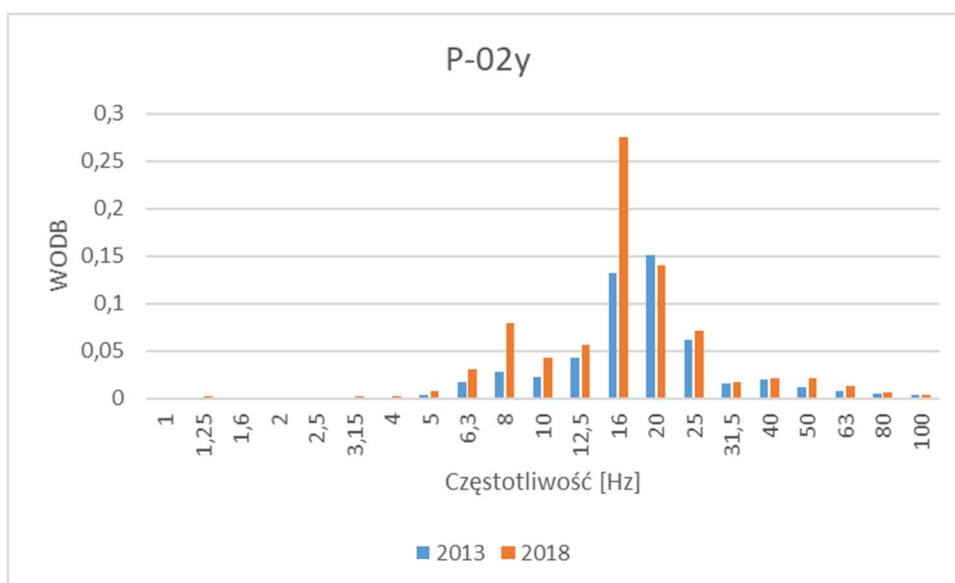
Analiza wskaźnika WODB po 5 latach eksploatacji

Badania budynku na poligonie C powtórzono po 5 latach eksploatacji pociągu Pendolino. Wykresy WODB uwiadcniają różnice po 5 letniej eksploatacji (Rysunek 96 i Rysunek 97). Poza częstotliwością 12,5 Hz dla czujnika P-01x oraz 20 Hz dla czujnika P-02y wzrósł wpływ przejazdów pociągu na budynek szczególnie dla częstotliwości

środkowej paska 16 Hz.. Zwiększenie emisji w dalszym ciągu nie przekracza granicznej linii A i budynek znajduje się w I strefie drgań skali SWD-II.



Rysunek 96 Spektrum WODB - porównanie pociągu Pendolino – porównanie wartości średnich – czujnik P-01x (opracowanie własne)



Rysunek 97 Spektrum WODB - porównanie pociągu Pendolino – porównanie wartości średnich – czujniki P-02y (opracowanie własne)

7 Analiza parametryczna

Badania in situ, w przypadku zrealizowanych badań przejazdów pociągów, nie są badaniami laboratoryjnymi, w których możliwe jest wyizolowanie pojedynczego parametru i weryfikacja jego zmian przy pozostałych warunkach niezmiennych. Osiągnięciem niniejszej rozprawy jest dobór maksymalnie podobnych warunków dla zmiany jednego lub kilku parametrów. Powtórzenie badań w takiej skali po 5 latach eksploatacji dla tego samego taboru, tej samej lokalizacji poligonu oraz odtworzenie identycznego toru pomiarowego jest wartością rzadko spotykaną w badaniach poligonowych przejazdów pociągów.

Poniżej zestawiono zmienne które w dalszych analizach mogą stanowić parametr:

- Prędkość
- Odległość czujnika od źródła drgań
- Tor (bliższy lub dalszy)
- Rozważany typ taboru
- Rok eksploatacji
- Poligon/ przekrój pomiarowy

Z powyższej listy zmiennymi, które da się wyizolować i analizować ich zmianę bez znacznego wpływu na pozostałe parametry są:

- Prędkość
- Odległość czujnika od źródła drgań

W pozostałych przypadkach każdy parametr ma następujące podstawowe ograniczenia:

- Tor (bliższy lub dalszy)
 - Poligony A, B, C – pomiary nowej jednostki – wykonywane były przy przejazdach po jednym torze, analizować tu można różny tabor w obrębie jednego przewoźnika (InterCity)
 - Poligon C' – przejazd składu Pendolino z różnym napełnieniem pasażerami (zmienna masa)
- Rozważany typ taboru
 - Różny załadunek (masa dodatkowa pociągu)
- Rok eksploatacji pociągu

- Przed pierwszymi pomiarami (2013 r.) nawierzchnia podlegała renowacji celem osiągnięcia odpowiednich prędkości
- Zmiana pogody, wilgotności powietrza i gruntu (pierwsze pomiary odbyły się listopadzie, powtórzone we wrześniu) – co wpływa na prędkość fali w gruncie
- Pierwsze pomiary realizowane z wyznaczonym załadunkiem modelującym obciążenie pasażerami, powtórzone z załadunkiem realnym (zmienny ciężar pociągu)
- Poligon/ przekrój pomiarowy
 - Pogoda
 - Lokalizacja czujników (ze względu na długość i szerokość nasypu kolejowego)
 - Rodzaj nawierzchni kolejowej
 - Geometria układu torowego (tor w łuku/ na prostej)
 - Rodzaj gruntu
 - Wysokość nasypu (pionowa odległość od główki szyny do czujnika pomiarowego)

Do wykonania analizy parametrycznej zdecydowano się użyć analizy CWT, maksymalnych przyspieszeń uzyskanych z przebiegów oraz wartości przyspieszeń w pasmach 1/3 oktaowych w zakresie drgań 1–100 Hz – w zależności od zamierzonego efektu.

7.1 Prędkość pociągu

Zestawiono wyniki drgań zmierzonych na gruncie przy nasypie poligonu B (czujnik P-4x, P-05y, P-06z). Celem zbadania zależności przyjęto wskaźnik W_f :

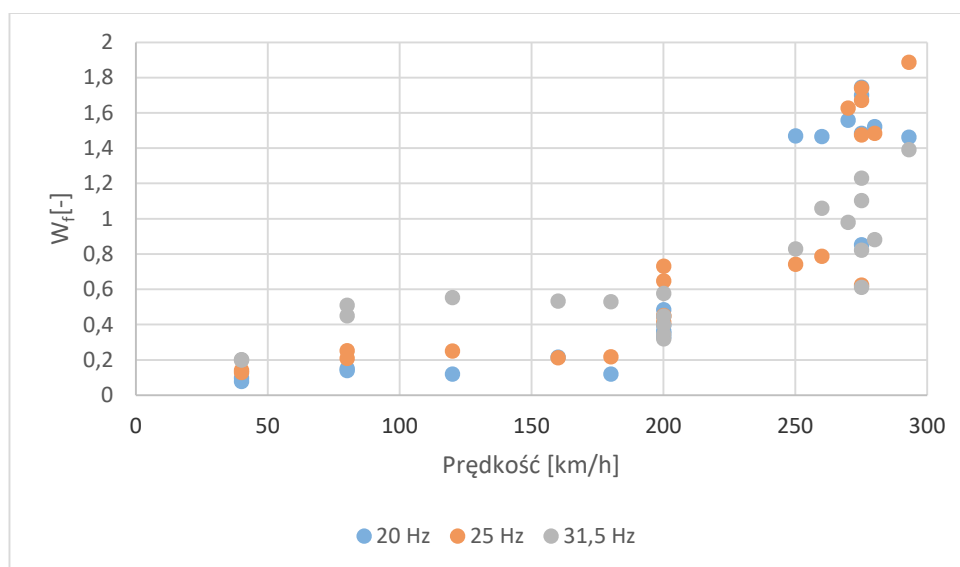
$$W_f = \frac{a_f}{d_f}$$

Gdzie:

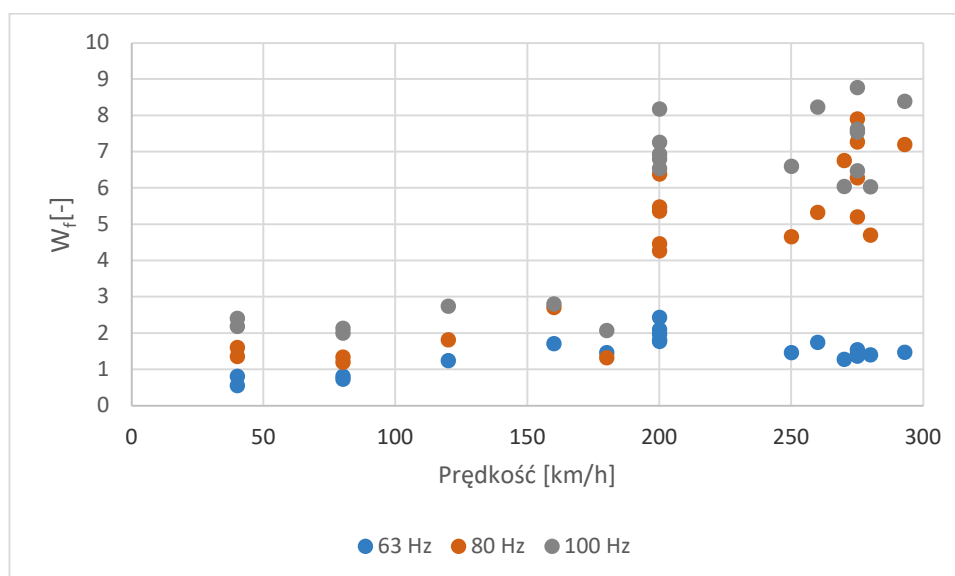
a_f – wartości przyspieszeń w pasmach 1/3 oktawowych

d_f – przyjęta wartość graniczna dla każdej z częstotliwości

Granice d_f dla gruntu przyjęta analogicznie do dolnej granicy skali SWD-II dla budynków. Skala SWD-II odnosi się do budynków o odpowiedniej konstrukcji i wymiarach i tylko w takich wypadku może być użyta. W pracy przyjęto granicę d_f do celów analizy i zbadania zjawiska na gruncie zagrożenia dla budynków odpowiadających skali SWD-II. Zabiegu użyto wyłącznie dla naukowego zbadania zależności i analizy zjawiska, nie jest to normatywna ani dozwolona inżyniersko metoda. Wyodrębniono sześć pasm częstotliwości dla których próg szkodliwości ($W_f=1$) został przekroczony (20; 25; 31,5; 63; 80; 100 Hz). Na rysunkach (Rysunek 98 Rysunek 99) przedstawiono wykresy składowych poziomych drgań prostopadłych do osi toru dla tych częstotliwości.



Rysunek 98 Zależność wskaźnika W_f od prędkości pociągu dla częstotliwości 20; 25; 31,5 Hz – czujnik P-04x – poligon B (opracowanie własne)



Rysunek 99 Zależność wskaźnika W_f od prędkości pociągu dla częstotliwości 63; 80; 100 Hz – czujnik P-04x – poligon B (opracowanie własne)

Ponownie potwierdzono, że największe wartości drgań niezależnie od prędkości pociągu w bliskiej odległości toru (przy nasypie) odbierane są w pasmach najwyższych częstotliwości (63 – 100 Hz). W tak bliskiej odległości od osi toru co do zasady nie ma budynków mieszkalnych, niemniej jednak lokalizowane są obiekty obsługi podróżnych i infrastruktury kolejowej, jak stacje, przystanki, perony i małe nastawnie.

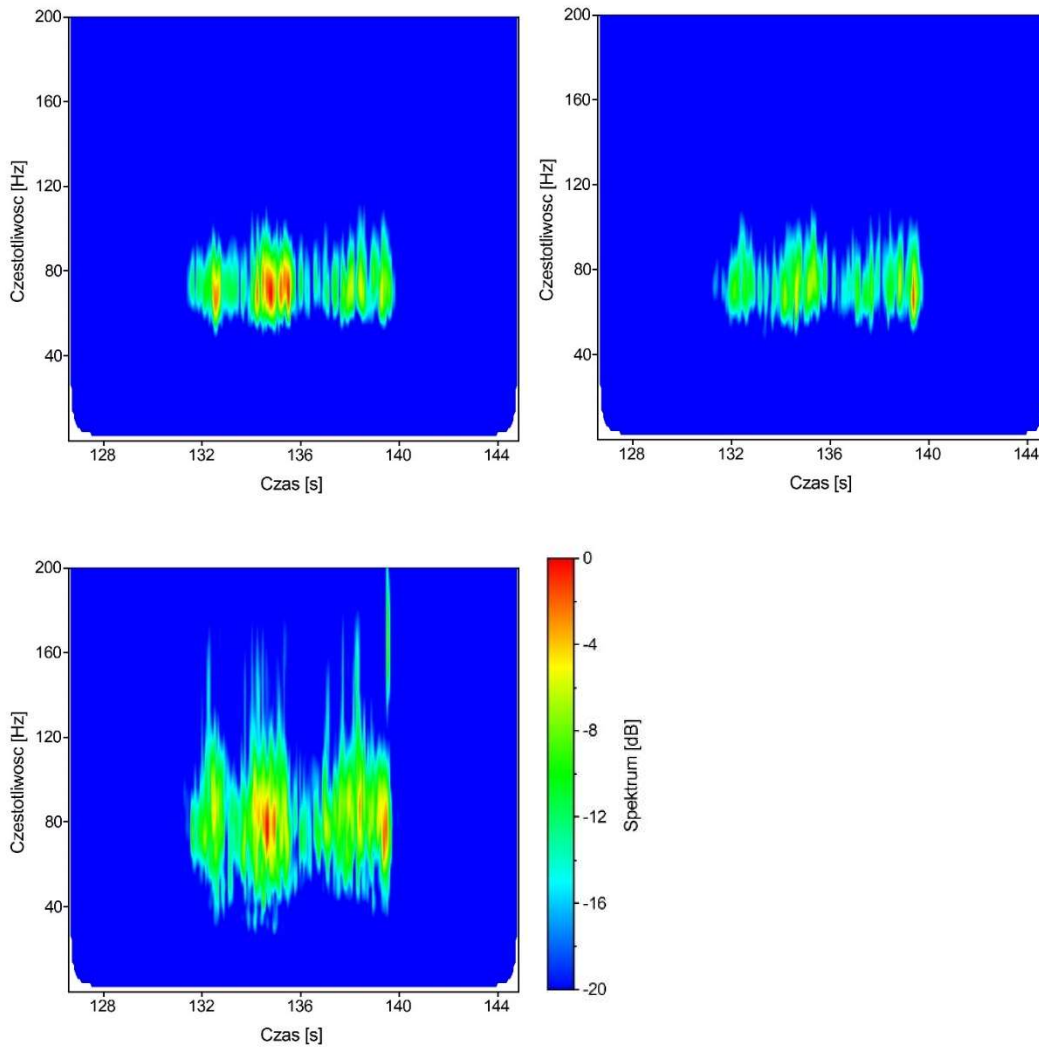
Dodatkowo wykazano, że pomiary in situ, które ograniczyłyby się tylko do prędkości pociągów obecnie eksploatowanych (do 200 km/h) nie wykazały szkodliwości dla konstrukcji w zakresie częstotliwości 20; 25 i 31,5 Hz. Dopiero próby przy przejazdach o prędkości 250 km/h i więcej wykazały silną zależność poziomu drgań oraz przekroczenia wartości normatywnych dla tych pasm częstotliwości. Jest to szczególnie ważna informacja przy pierwszych próbach projektowania linii KDP w Polsce.

Analogiczne wyniki uzyskano dla składowej poziomej drgań w kierunku równoległym do osi toru (czujnik P-05y).

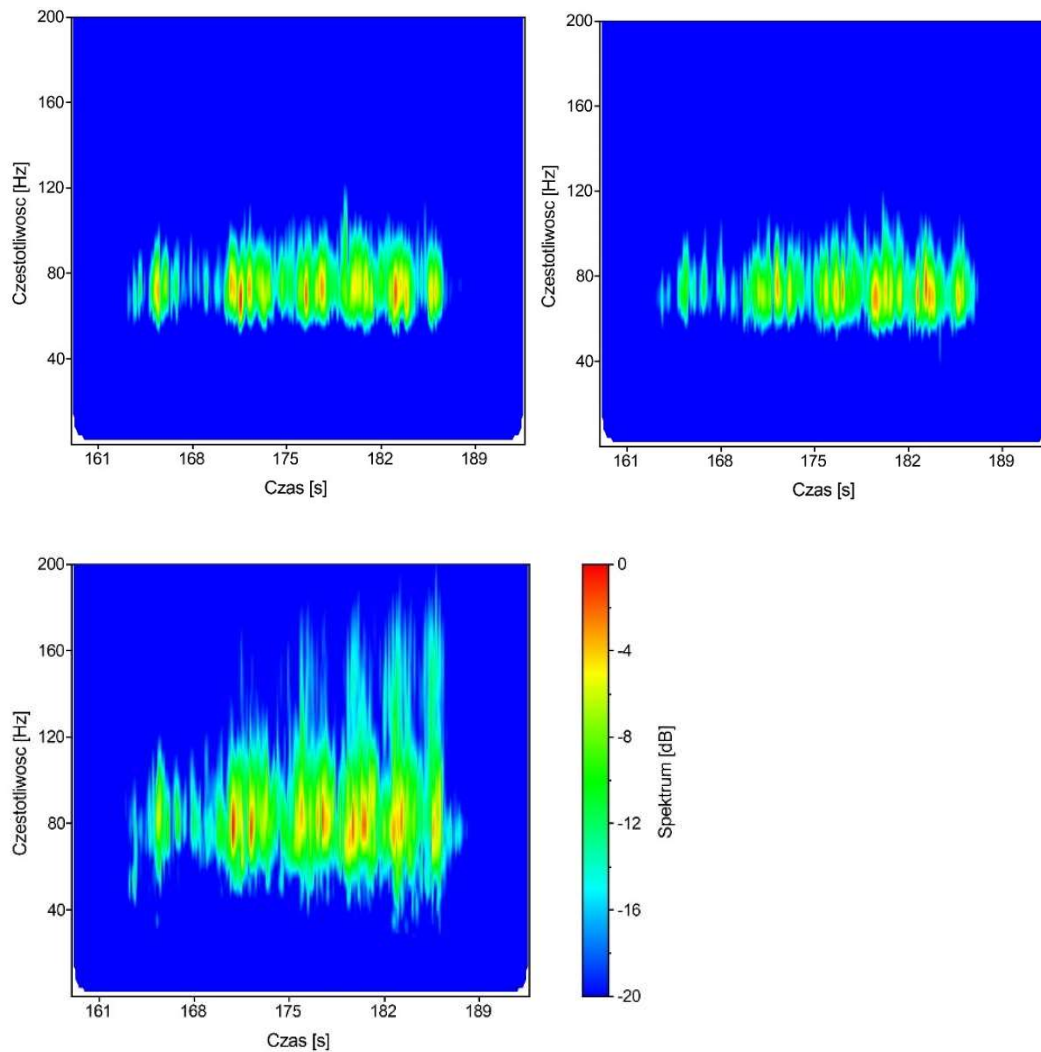
7.1.1 Zmienna prędkość pociągu w czasie przejazdu – hamowanie i ruszanie

Dla tego samego punktu pomiarowego przeanalizowano przejazdy pociągu ze zmienną prędkością w trakcie jazdy (hamowanie i ruszanie). Ze względu na dodatkową zmienność zjawiska wyniki przedstawiono przy użyciu analizy falkowej.

Widma częstotliwościowo – czasowe dla pociągu hamującego w obrębie poligону pomiarowego (prędkość maleje do zera) przedstawiono na wykresach dla trzech wzajemnie prostopadłych kierunków drgań (Rysunek 100).



Rysunek 100 Przejazdy pociągu Pendolino ze zmienną prędkością – hamowanie – CWT – poligon B – czujniki P-4x, P-5y, P-6z (opracowanie własne)

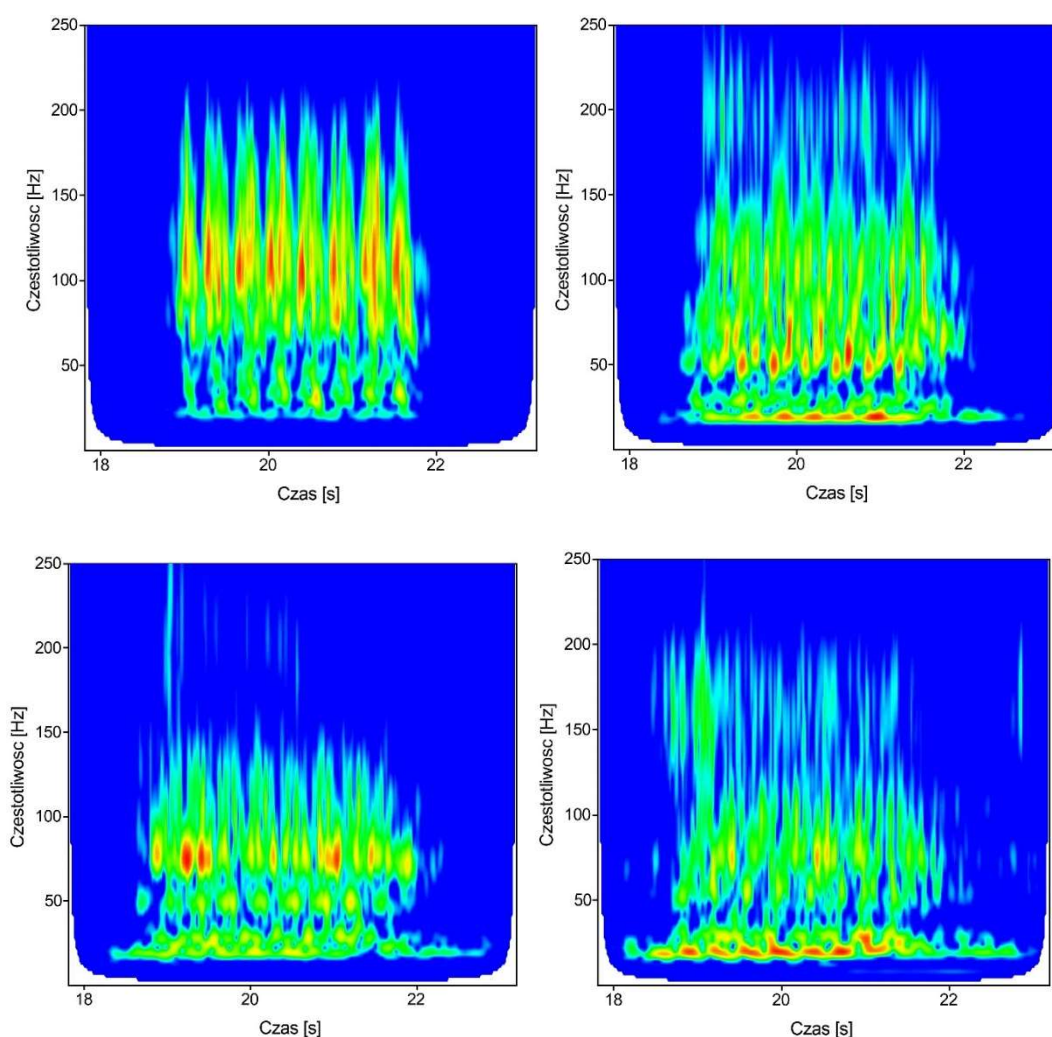


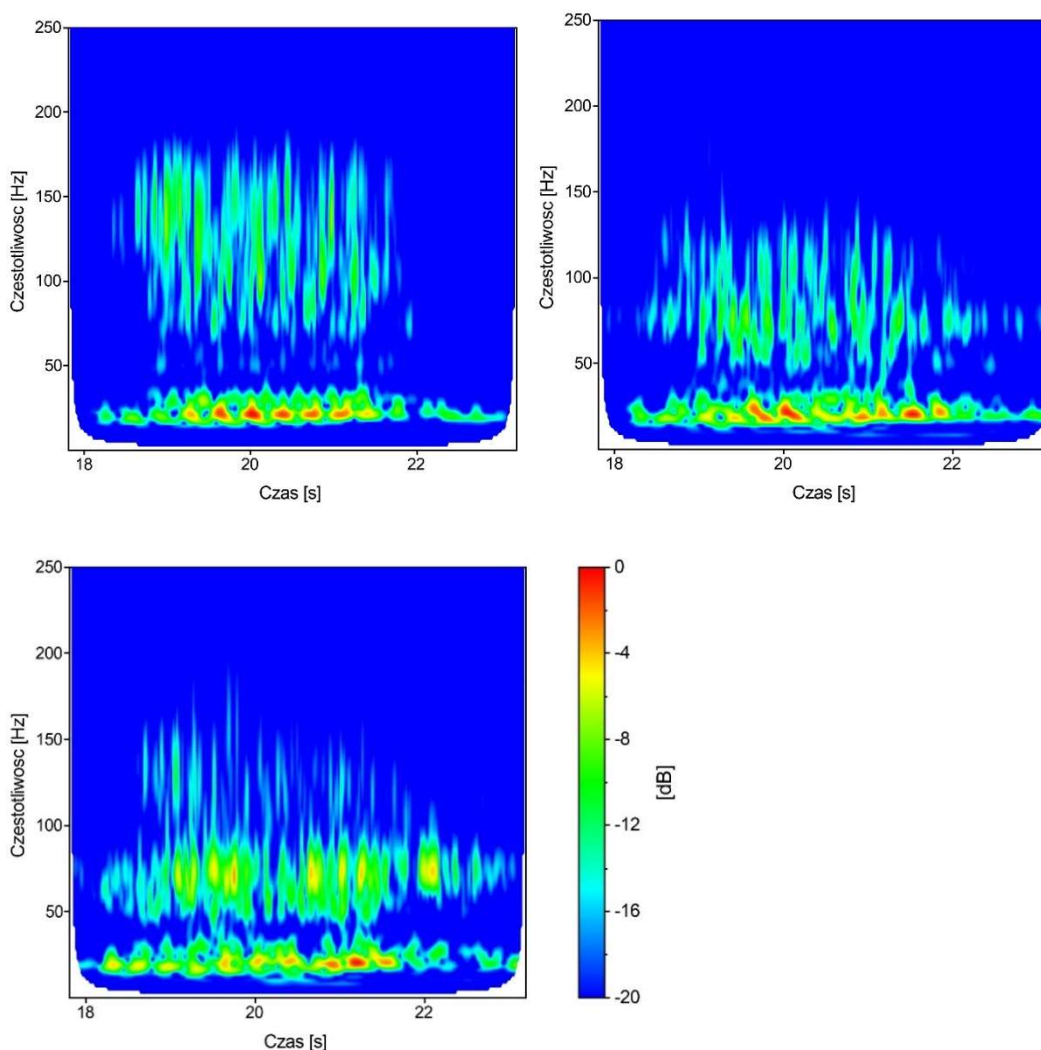
Rysunek 101 Przejazdy pociągu Pendolino ze zmienną prędkością – ruszanie – CWT – poligon B – czujniki P-4x, P-5y, P-6z (opracowanie własne)

Szczególną zmienność częstotliwościową zarówno przy ruszaniu jak i hamowaniu widać dla składowych pionowych drgań. Jest to istotna informacja m.in. przy konieczności lokalizacji rozjazdów kolejowych na obiektach inżynieryjnych. W związku z faktem, że przy rozjazdach zwykle następuje zmiana prędkości pociągu zgodnie z aktualnymi standardami CPK nie powinno lokalizować się ich na obiektach ze względu na dodatkowe obciążenie dynamiczne konstrukcji. Warunkiem zezwolenia na tak zaprojektowaną infrastrukturę jest wykonanie odpowiednich analizy dynamicznych. W czym pomocne mogą być również analizy CWT.

7.2 Odległość od źródła drgań

Zależność poziomu drgań od odległości od źródła przedstawiono w początkowych rozdziałach za pomocą FFT i przebiegów czasowych. Dla uzupełnienia o analizy trójwymiarowe na wykresach (Rysunek 102) zestawiono pionowe składowe drgań na poligonie B dla przejazdów pociągu Pendolino z prędkością 250 km/h. Dominujące częstotliwości w okolicach pasma 100 Hz (czujniki najbliższej toru) przesuwać się wraz ze wzrostem odległości w niższe pasma częstotliwościowe, a pasma wyodrębniane z szumu otoczenia zawężają się. Czas trwania zdarzenia wydłuża się ze wzrostem odległości.





Rysunek 102 Przejazdy pociągu Pendolino z prędkością 250 km/h – CWT – poligon B – czujniki 6z, 9z, 12z, 15z, 18z, 21z, 24z (opracowanie własne)

7.3 Rozważany typ taboru

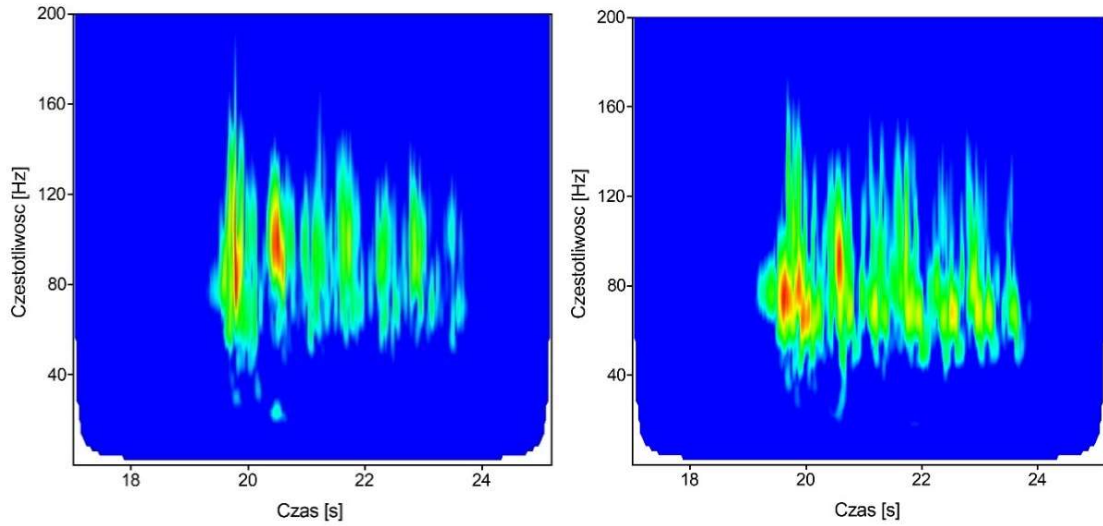
Charakterystyka widma drgań generowanych przez ruch kolejowy ma specyficzne właściwości w zależności od rodzaju taboru. Pomijając specyfikę metra (opisaną również w publikacjach autora rozprawy [92,93]) oraz tramwaju, tabor szynowy, co do specyficznej charakterystyki można podzielić na dwie grupy ze względu na prędkość:

- Pociągi dużych prędkości — stanowiące źródło drgań o podwyższonej wartości maksymalnych przyspieszeń ze względu na ich zwiększoną

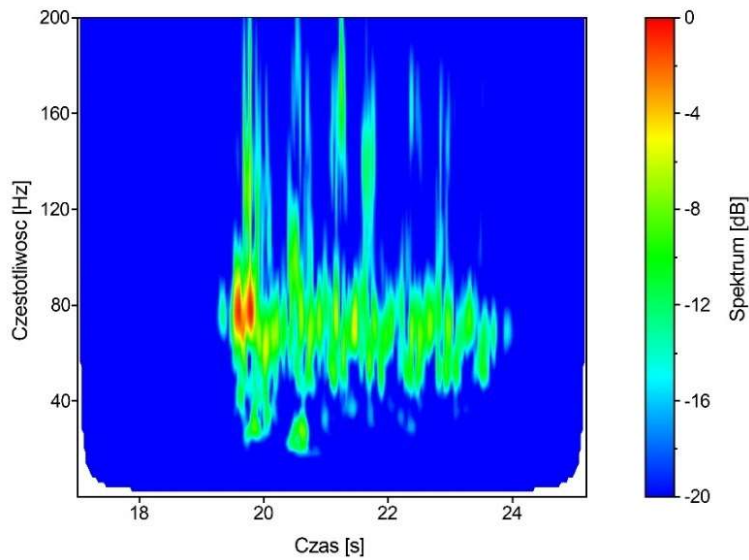
prędkość (jeśli prędkość osiągnie prędkość krytyczną drgania gwałtownie wzrastają)

- Pociągi towarowe — generują wibracje o wysokiej wartości przyspieszeń drgań i niskiej częstotliwości (ze względu na małą prędkość), które mogą rozprzestrzeniać się na duże odległości od źródła [3, 57]

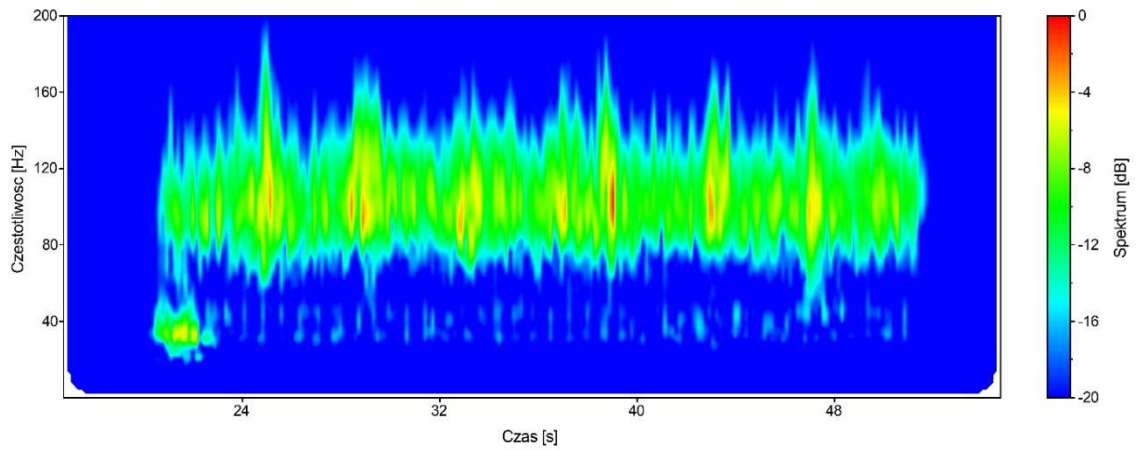
Zestawiono charakterystyki widma drgań wzbudzanego przejazdami – pociągu InterCity (Rysunek 104) oraz pociągu towarowego (Rysunek 107). Wybór porównania pociągu towarowego z pociągiem InterCity związany jest z faktem układu lokomotywa o kołach napędnych i wagony o kołach tocznych w obu pociągach. Ze względu na różne prędkości nie odczytuje się wartości maksymalnych przyspieszeń drgań, a ich zależności od maksymalnych wartości wzbudzanych dla każdego ze składów. W obu przypadkach wyraźnie widać wzbudzenie wywołane kołami napędowymi i dużo słabsze kołami tocznymi. Dodatkowo w składzie towarowym koła toczne wzbudzają niskie częstotliwości drgań ok. 30 Hz, a słabiej wzbudzone są drgania o wyższych częstotliwościach. Koła toczne wzbudzają drgania o małych wartościach przyspieszeń i niższych częstotliwościach, ale w dużo większym zakresie drgania o częstotliwości z pasma 100 Hz. Tak wyraźnego rozdziału drgań na różne częstotliwości od kół napędnych i tocznych nie ma w przypadku pociągu InterCity poruszającego się z prędkością 160 km/h. W widmie drgań od przejazdu pociągu towarowego można zauważyć dominację drgań wywołanych lokomotywą. Poziom tych drgań jest kilkukrotnie większy dla składowej pionowej drgań (Z).



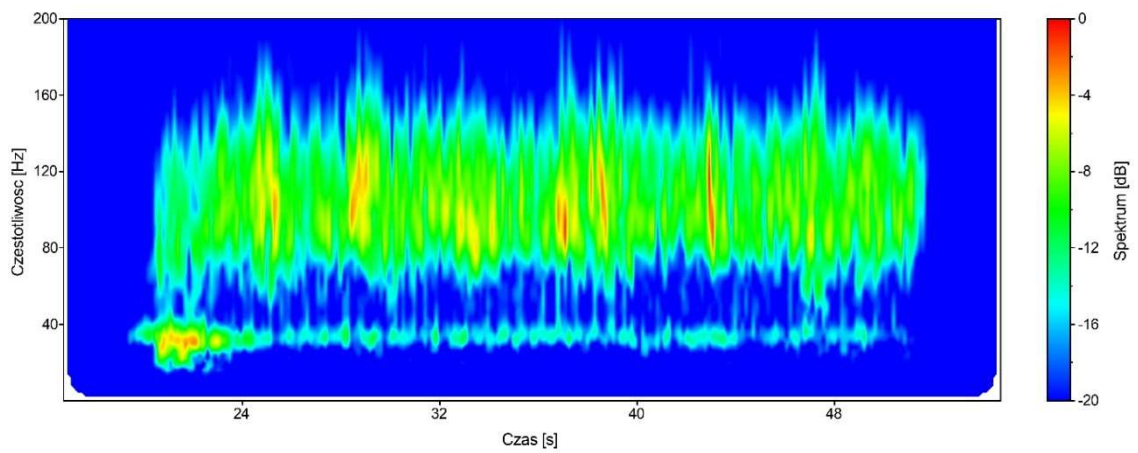
Rysunek 103 Przejazd pociągu InterCity z prędkością 160 km/h - poligon B - czujniki 4x, 5y – CWT (opracowanie własne)



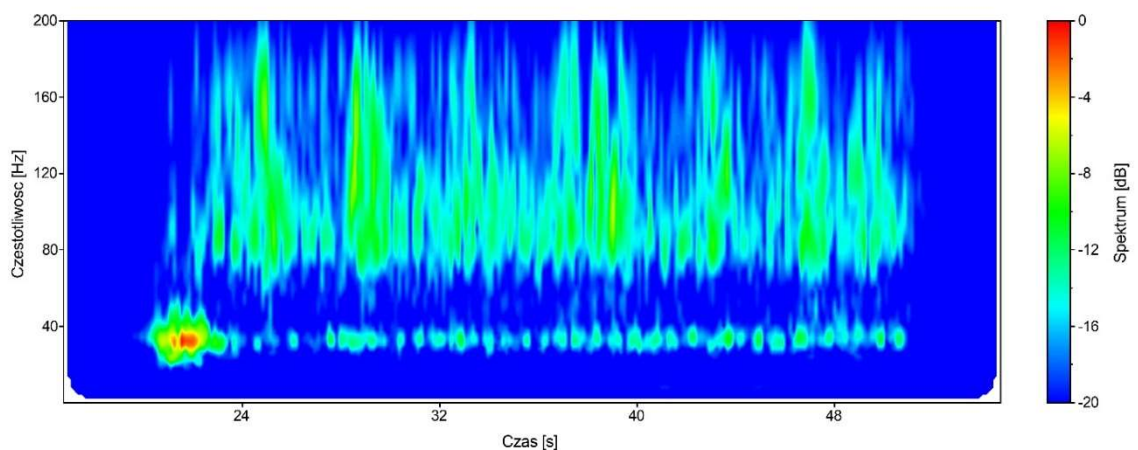
Rysunek 104 Przejazd pociągu InterCity z prędkością 160 km/h - poligon B - czujniki 6z – CWT (opracowanie własne)



Rysunek 105 Przejazd pociągu towarowego z prędkością 67 km/h - tor B - poligon B - czujniki 4x – CWT (opracowanie własne)

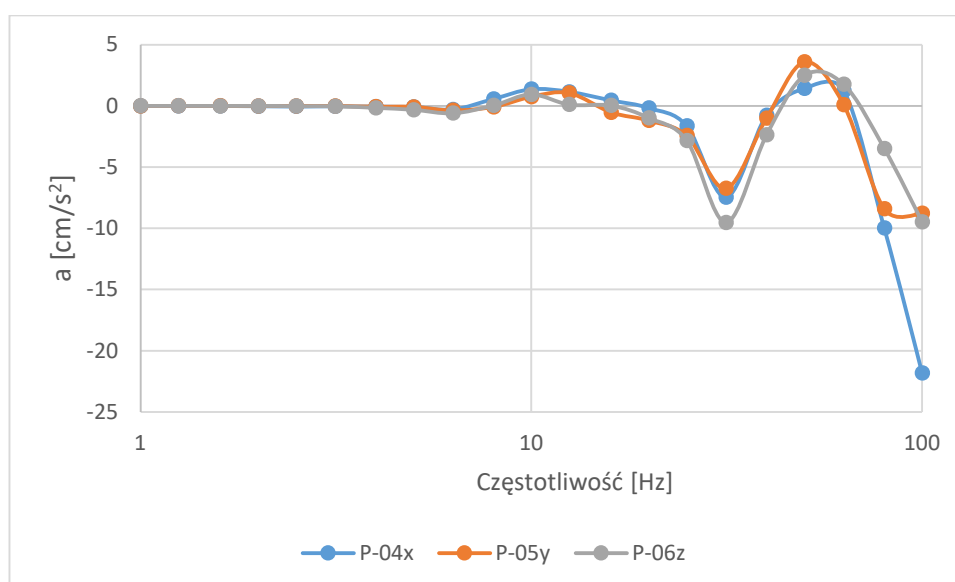


Rysunek 106 Przejazd pociągu towarowego z prędkością 67 km/h - tor B - poligon B - czujniki 5y – CWT (opracowanie własne)



Rysunek 107 Przejazd pociągu towarowego z prędkością 67 km/h - tor B - poligon B - czujniki 6z – CWT (opracowanie własne)

Celem porównania wartości generowanych przez oba typy taborów porównano widma drgań – wartości a_{\max} w pasmach tercjowych. Aby najlepiej uwidocznic tę różnicę na wykresie (Rysunek 108) przedstawiono różnice pomiędzy wartościami maksymalnych przyspieszeń drgań generowanych przejazdami pociągu pasażerskiego i pociągu towarowego. Widoczne są większe wzbudzenia w pasmach wysokoczęstotliwościowych generowanych przejazdami taboru ciężkiego. Pociągi pasażerskie generują większe drgania w zakresach częstotliwości 1,25 Hz i w pasmach 8-16 Hz oraz 50-63 Hz, a największą różnicę uzyskuje się w paśmie o częstotliwości środkowej 50 Hz. Różnice poziomym drgań od pociągu towarowego sięgają do ponad 20 cm/s^2 dla częstotliwości 100 Hz. Wyraźnie widać też jak wcześniej w analizach CWT duże wzbudzenie kołami napędowymi pociągu towarowego drgań o częstotliwości środkowej 31,5 Hz.



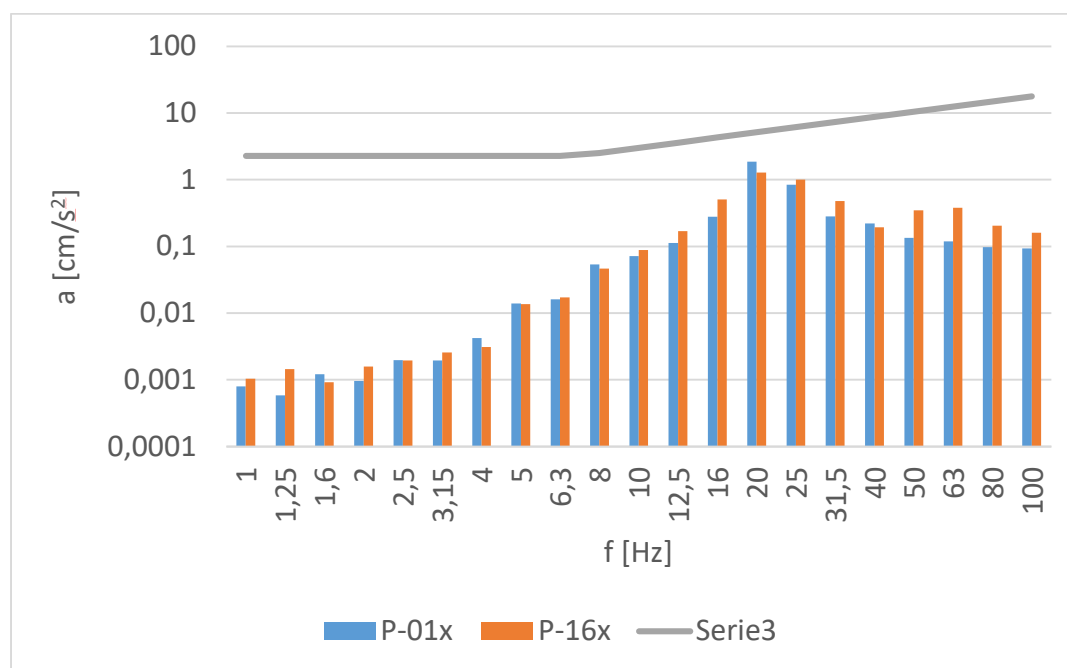
Rysunek 108 Różnica amplitud drgań w pasmach tercjowych dla pociągu osobowego i towarowego - poligon B (opracowanie własne)

W pokazanym przypadku dobrze widać kompatybilność obu metod (analizy tercjowej i CWT). O ile w analizie falkowej dobrze widoczny jest charakter przejazdu, rozdzielone źródła głównych drgań (początek/koniec składu/konkretne elementy taboru) o tyle nie daje informacji w wartościach normatywnych odnoszących się do limitów w skali SWD. Przedstawione wcześniej w skali logarytmicznej CWT (jak również STFT) można przedstawiać w wartościach amplitud drgań w jednostce $[\text{cm/s}^2]$ natomiast nie są to wartości bezpośrednio korespondujące z wyznaczoną polskimi normami granicą wpływu obliczoną dla pasm tercjowych jako wartość przyspieszenia drgań a_{\max} .

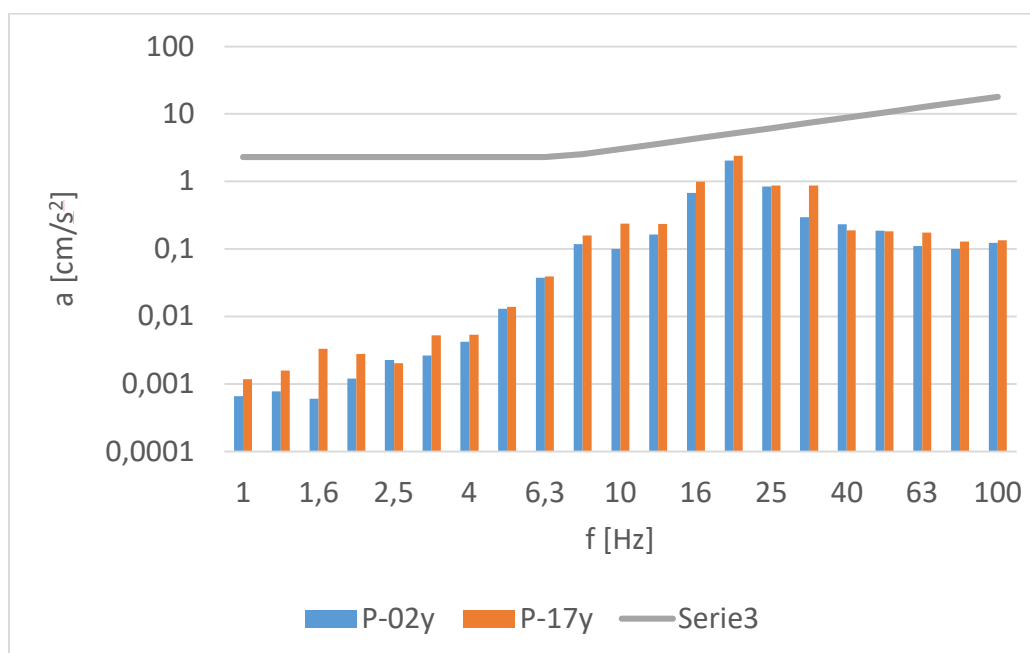
7.4 Drgania odbierane przez budynek

7.4.1 Współczynnik redukcji

Przykładowo zestawiono drgania poziome rejestrowane w trakcie przejazdu pociągu Pendolino z prędkością 250 km/h równocześnie na budynku i czujniku zlokalizowanym na gruncie w tej samej odległości od osi toru co budynek. Wyniki zestawienia analiz tercjowych przedstawiono oddzielnie dla składowych prostopadłych i równoległych do osi toru (Rysunek 109 i Rysunek 110).



Rysunek 109 Porównanie drgań poziomych X (budynek – grunt) - przejazd Pendolino z prędkością 250 km/h (opracowanie własne)



Rysunek 110 Porównanie drgań poziomych Y (budynek – grunt) - przejazd Pendolino z prędkością 250 km/h (opracowanie własne)

Podany we wstępie współczynnik amplitudalnej redukcji zdefiniowany wg wzoru (3.4-1), dla celów rozprawy przekształcono i wprowadzono następujące zależności

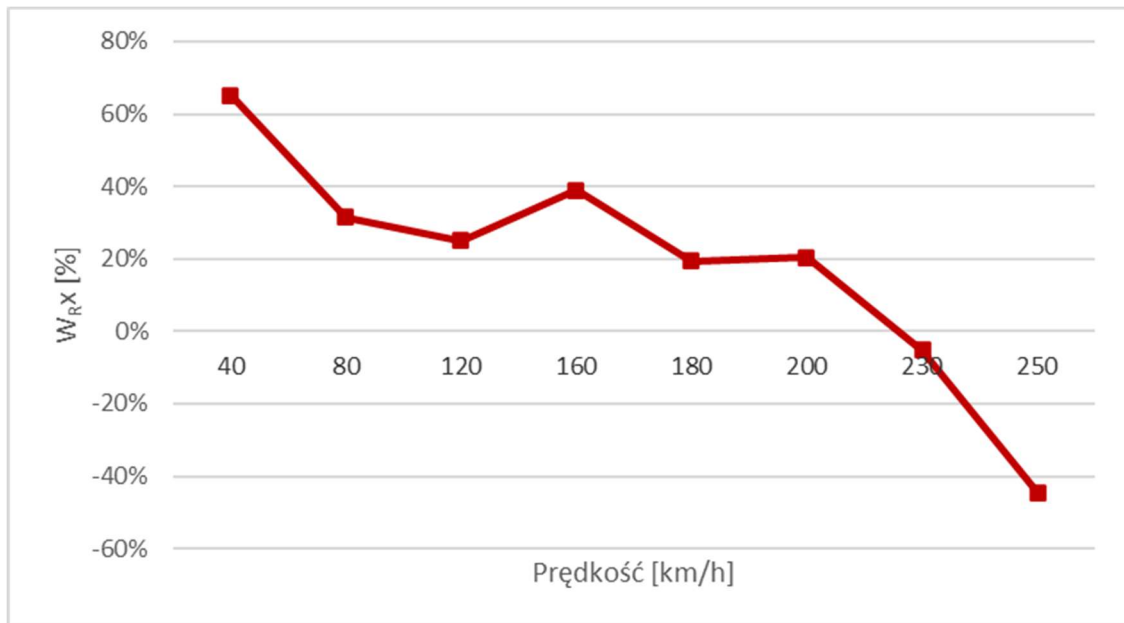
(7.4-1)

$$W_{R(f)} = \frac{a_{g(f)} - a_{b(f)}}{a_{g(f)}} 100\%$$

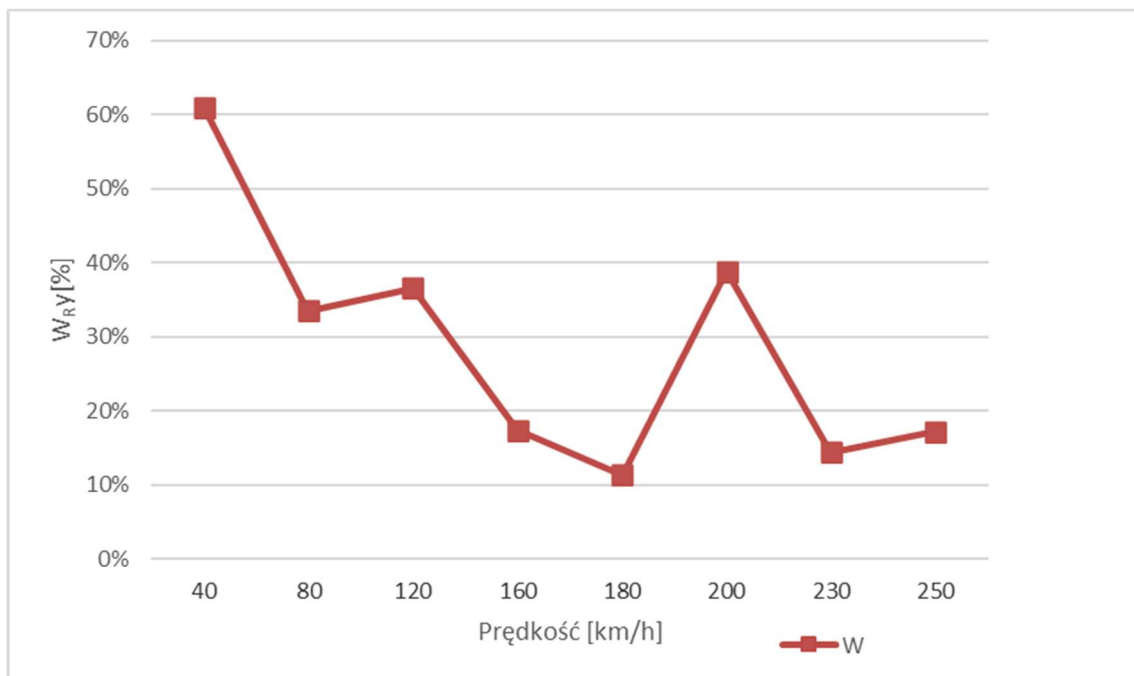
gdzie:

- f – częstotliwość środkowa w danym paśmie 1/3 oktawowym,
- $W_{R(f)}$ – współczynnik amplitudalnej redukcji w danym paśmie 1/3 oktawowym,
- $a_{g(f)}$ – wartość przyspieszenia drgań w danym paśmie 1/3 oktawowym uzyskana na gruncie,
- $a_{b(f)}$ – wartość przyspieszenia drgań w danym paśmie 1/3 oktawowym uzyskana na budynku.

Na rysunkach (Rysunek 111 i Rysunek 112) przedstawiono wyniki analiz współczynnika przeniesienia drgań z gruntu na budynek w zależności od prędkości przejeżdżającego pociągu Pendolino kolejno dla składowej składowych poziomej X i Y.



Rysunek 111 Współczynnik redukcji maksymalnych wartości drgań prostopadłych do osi toru (X) w pasmach tercyjnych w zależności od prędkości pociągu (opracowanie własne)

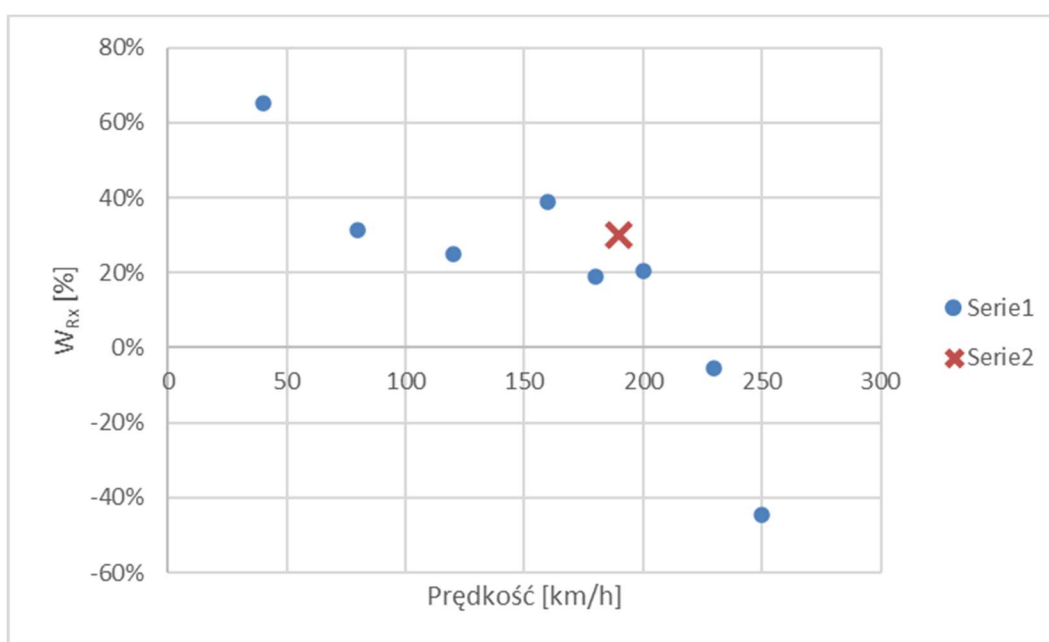


Rysunek 112 Współczynnik redukcji maksymalnych wartości drgań równoległych do osi toru (Y) w pasmach tercyjnych w zależności od prędkości pociągu (opracowanie własne)

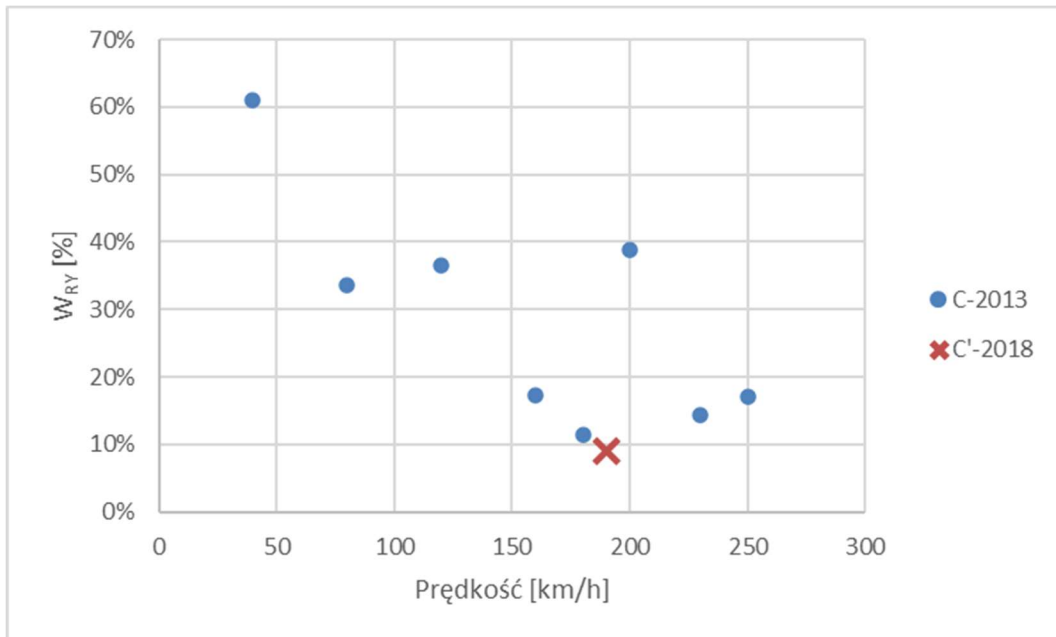
Z analiz wartości współczynnika redukcji wynika, że prędkość przejazdu wynosząca 200 km/h jest prędkością „graniczną” dla składowej poziomej X, powyżej tej prędkości budynek zaczyna wzmocniać drgania. Składowa pozioma X drgań poza niewielkim odchyleniem dla prędkości 160 km/h przybiera prawie liniową zależność przeniesienia drgań (współczynnik determinacji funkcji liniowej $R=0,78$). Dla składowej poziomej Y bez względu na prędkość następuje redukcja drgań na styku budynek – grunt. Wartości uzyskiwane przy prędkości pociągu 200 km/h stanowią ekstremum lokalne, a drgania przekazywane przez grunt na budynek są mocniej tłumione (40%) niż drgania przy prędkościach sąsiadujących – 180 i 230 km/h.

7.5 Czas eksploatacji

Wpływ czasu eksploatacji taboru na współczynnik redukcji drgań oceniono na podstawie analizy wyników pomiarów drgań na poligonie C i C'. Porównanie możliwe było tylko w odniesieniu do pociągów Pendolino przejeżdżających z prędkością ok. 190 km/h. Przykładowo na rysunkach (Rysunek 113 i Rysunek 114) pokazano zmianę redukcji drgań w zależności od prędkości EMU 250 odpowiadającą kierunkowi X i Y.



Rysunek 113 Współczynnik redukcji maksymalnych wartości drgań prostopadłych do osi toru (X) w pasmach tercjowych w zależności od prędkości pociągu i roku eksploatacji (opracowanie własne)



Rysunek 114 Współczynnik redukcji maksymalnych wartości drgań równoległych do osi toru (Y) w pasmach tercjowych w zależności od prędkości pociągu i roku eksploatacji (opracowanie własne)

Z porównania wartości współczynnika redukcji odpowiadającego składowym poziomym drgań X i Y wynika, że po 5 latach eksploatacji:

- współczynnik redukcji składowej Y drgań wzbudzanych pozostał na podobnym poziomie,
- następuje pomijalna amplifikacja składowej X drgań.

8 Wnioski, oryginalne osiągnięcia w pracy oraz kierunki dalszych badań

Celem rozprawy było zaproponowanie metodyki pomiarowo – interpretacyjnej badań poligonowych drgań wywołanych przejazdami pociągów dużej prędkości na terytorium Polski. W ramach dysertacji dokonano przeglądu aktualnego stanu wiedzy i prowadzonych prac naukowo – badawczych w zakresie propagacji drgań wzbudzanych ruchem pociągów.

Na podstawie przeprowadzonej analizy sformułowano następujące wnioski, które potwierdzają przyjęte tezy:

1. Drgania w pasmach tercjowych o częstotliwościach środkowych 20 – 31,5 Hz stanowią drgania zmienne wykładniczo w stosunku do prędkości pociągu zarówno przy źródle drgań jak i w dalszej odległości. Drgania wysokich częstotliwości 80 – 100 Hz zmieniają się wraz ze wzrostem prędkości, w bardzo bliskiej odległości od źródła, ale bardzo szybko maleją wraz ze zwiększaniem odległości. Pozostałe pasma częstotliwości są nisko wrażliwe na zmiany prędkości pociągu – potwierdzono tezę nr 1.
2. Przedstawione analizy i wyniki prezentowane w dziedzinie częstotliwościowo – czasowej (np. STFT lub CWT) uzupełniają informacje szczególnie przydatną dla sygnałów drgań niestacjonarnych, zmiennych w czasie. Wynik rozkładu wzbudzanych drgań jest pomocny w diagnostyce eksploatowanego taboru – potwierdzono tezę nr 2.
3. Prędkości powyżej 200 km/h silnie wpływają na zmiany wartości przyspieszeń drgań, a oszacowana prędkość fali Rayleigha, daje podstawy do wyznaczenia przybliżonej prędkości krytycznej pociągu $v_0=290$ km/h, której przekroczenie powoduje istotne wzmocnienie drgań gruntu w otoczeniu linii kolejowej – potwierdzono tezę nr 3.

Ponadto przeprowadzone badania w ramach pracy pozwalają na sformułowanie dodatkowego wniosku:

Badania wpływów dynamicznych nie powinny ograniczać się do odległości 25 m od osi toru, szczególnie w przypadku wpływu drgań generowanych przejazdami pociągów dużej prędkości.

Oryginalne wątki pracy doktorskiej stanowią:

1. Analiza wielkoskalowych badań in situ drgań generowanych przejazdami pociągów z prędkościami przekraczającymi 200 km/h na terenie Polski.
2. Analiza wpływu przejazdu pociągu z najwyższymi osiągniętymi do tej pory prędkościami taboru kolejowego na terenie Polski i wnioski z interpretacji propagacji drgań w gruncie oraz ich wpływu na budynek.
3. Ponowienie badań po pięciu latach użytkowania Pendolino, w tym samym punkcie pomiarowym, przy tym samym torze pomiarowym, w warunkach eksploatacyjnych.
4. Wyznaczenie prędkości pociągu na podstawie aproksymacji pomiarów drgań, przy której przekroczona zostaje I strefa szkodliwości drgań dla wskazanego budynku.
5. Propozycja zastosowanie analiz falkowych (CWT) do wielkoskalowych badań przejazdu pociągów i porównanie z analizami normatywnymi.
6. Zasadniczą wartość dodaną rozprawy stanowi wyznaczenie pasm częstotliwości drgań silnie zależnych od zmiany prędkości taboru generującego te drgania.
7. Wykazanie szkodliwości drgań pociągów w odległości większej niż 25 m od toru.
8. Oszacowanie prędkości krytycznej linii kolejowej w badanej lokalizacji na podstawie prędkości fali Rayleigha ($v_R=115$ m/s).
9. Wykazanie, że przejazdy pociągu z prędkościami przyjmowanymi do projektowania linii kolejowych dużych prędkości generują gwałtowny wzrost rejestrowanych drgań.

Kierunki dalszych badań

Autorka planuje badania i analizę wyników aktualnie projektowanej infrastruktury dla kolei dużych prędkości w Polsce z zakładaną prędkością do 350 km/h.

Dodatkowo zamierza uwzględnić wpływ nowoprojektowanych KDP na ludzi w budynkach.

Ponadto planuje się rozszerzenie zakresu badań o inny rodzaj nawierzchni – nawierzchnia bezpodsypkowa.

Spis rysunków

Rysunek 1 Parametry interakcji koło/szyna [43]	17
Rysunek 2 Siły działające na wózek w łuku [41]	17
Rysunek 3 Siły działające na styku koła z szyną w łuku [41]	18
Rysunek 4 Rozprzestrzenianie drgań, $v=0$ (opracowanie własne)	19
Rysunek 5 Rozprzestrzenianie drgań przy nakładających się falach z więcej niż jednego źródła, $v=0$ (opracowanie własne)	19
Rysunek 6 Rozprzestrzenianie drgań przy ruchomych źródłach, prędkość pociągu mniejsza od prędkości fali (opracowanie własne)	19
Rysunek 7 Rozprzestrzenianie drgań przy ruchomych źródłach, prędkość pociągu równa prędkości fali (opracowanie własne)	20
Rysunek 8 Podział fal parasejsmicznych [55]	22
Rysunek 9 Lokalizacja poligonu pomiarowego na linii kolejowej nr 4 [66].....	27
Rysunek 10 Obciążenie pociągu symulujące pełne napełnienie [49]	28
Rysunek 11 Schemat układu wózków i członów pociągu Pendolino (opracowanie własne)	28
Rysunek 12 Pociąg Pendolino (EMU 250) (opracowanie własne).....	29
Rysunek 13 Tor pomiarowy [68][42]	31
Rysunek 14 Akcelerometry piezoelektryczne PCB Piezotronics – model 393B12 i 356B18 [69]	32
Rysunek 15 Przykładowe lokalizacje czujników w trakcie pomiarów drgań: (a) czujnik na krzyżaku na gruncie, (b) czujnik na podkładzie kolejowym, (c) czujnik na budynku (opracowanie własne)	33
Rysunek 16 Schemat standardu zasilania ICP [69]	33
Rysunek 17 LMS SCADAS Mobile [68]	34
Rysunek 18 Układ sterowania i zarządzania torem pomiarowym – widok analizatora w trakcie trwania pomiaru [68]	35
Rysunek 19 Mapa lokalizacji poligonów (opracowanie własne).....	36
Rysunek 20 Schemat rozmieszczenia czujników - poligon A i B (opracowanie własne).....	37
Rysunek 21 Schemat rozmieszczenia czujników - poligon C (opracowanie własne).....	38

Rysunek 22 Schemat rozmieszczenia czujników - poligon C' (opracowanie własne).....	39
Rysunek 23 Badany obiekt – poligon C – Przyłek 49 (opracowanie własne)....	40
Rysunek 24 Przekrój poziomy budynku (opracowanie własne).....	41
Rysunek 25 Widok z boku budynku (opracowanie własne).....	41
Rysunek 26 Typy nawierzchni kolejowej w przekrojach pomiarowych (a) – poligon A, C b) – poligon B [62].....	42
Rysunek 27 Przekrój geotechniczny w km 176+800 linii kolejowej nr 4 [74]...	43
Rysunek 28 Przebieg czasowy drgań składowej poziomej X – czujnik P-04x – poligon C – młotek modalny (opracowanie własne)	45
Rysunek 29 Przebiegi czasowe drgań – czujnik P-04x, P-05y, P-06z – poligon C – młotek modalny (opracowanie własne)	46
Rysunek 30 Przebiegi czasowe przyspieszeń drgań zarejestrowane na budynku - przejazd pociągu Pendolino - prędkość 250 km/h (opracowanie własne).....	47
Rysunek 31 Maksymalne wartości przyspieszeń drgań zarejestrowanych na budynku – przejazd pociągu Pendolino – czujnik P-01x (opracowanie własne)	48
Rysunek 32 Maksymalne wartości przyspieszeń drgań zarejestrowanych na budynku – przejazd pociągu Pendolino – czujnik P-02y (opracowanie własne)	49
Rysunek 33 Schemat rozmieszczenia czujników w przyjętym profilu pomiarowym - poligon B - składowa pozioma prostopadła do osi toru (x) (opracowanie własne).....	50
Rysunek 34 Przebiegi czasowe składowej poziomej X przyspieszeń drgań gruntu wywołane przejazdem składu Pendolino z prędkością $v = 160$ km/h (opracowanie własne)	51
Rysunek 35 Przebiegi czasowe składowej poziomej X przyspieszeń drgań gruntu wywołane przejazdem składu InterCity z prędkością $v = 160$ km/h (opracowanie własne)	51
Rysunek 36 Maksymalne wartości składowej poziomej x przyspieszeń drgań gruntu z zarejestrowanych przebiegów przy prędkości przejazdów pociągów $v = 120$ km/h (opracowanie własne).....	53
Rysunek 37 Ciągłe widmo drgań (FFT) – pociąg InterCity – prędkość $v = 160$ km/h (opracowanie własne).....	54

Rysunek 38 Mapa propagacji drgań – pociąg InterCity – prędkość $v = 160$ km/h (opracowanie własne)	55
Rysunek 39 Stosunek widma drgań uzyskanych na podstawie przebiegów drgań zarejestrowanych w ostatnim (P-22x) i pierwszym (P-04x) punkcie pomiarowym – pociąg InterCity – prędkość $v = 160$ km/h (opracowanie własne)	56
Rysunek 40 Analiza STFT – przejazd pociągu Intercity z prędkością 160 km/h – tor nr 1 (opracowanie własne)	58
Rysunek 41 Analiza STFT – przejazd pociągu Intercity z prędkością 160 km/h – tor nr 2 (opracowanie własne)	59
Rysunek 42 Analiza STFT – przejazd pociągu towarowego z prędkością 80 km/h – tor nr 2 (opracowanie własne)	60
Rysunek 43 Analiza STFT - przejazd pociągu Pendolino z prędkością 160 km/h - tor nr 1 (opracowanie własne)	61
Rysunek 44 Analiza STFT - przejazd pociągu Pendolino z prędkością 250 km/h - tor nr 1 (opracowanie własne)	61
Rysunek 45 Analiza STFT - przejazd pociągu Pendolino z prędkością 80 km/h - tor nr 1 (opracowanie własne)	62
Rysunek 46 Poligon pomiarowy B – lokalizacja czujników pomiaru składowej pionowej drgań (opracowanie własne)	63
Rysunek 47 Szybka Transformata Fouriera – przejazd Pendolino z prędkością 40 km/h (opracowanie własne)	64
Rysunek 48 Szybka Transformata Fouriera – przejazd Pendolino z prędkością 160 km/h (opracowanie własne)	64
Rysunek 49 Szybka Transformata Fouriera – przejazd Pendolino z prędkością 270 km/h (opracowanie własne)	65
Rysunek 50 Krótkookresowa transformata Fouriera – przejazd Pendolino z prędkością 40 km/h (czujniki P-06z i P-09z) (opracowanie własne)	66
Rysunek 51 Krótkookresowa transformata Fouriera – przejazd Pendolino z prędkością 40 km/h (czujniki P-12z i P-15z) (opracowanie własne)	67
Rysunek 52 Krótkookresowa transformata Fouriera – przejazd Pendolino z prędkością 40 km/h (czujniki P-18z i P-21z) (opracowanie własne)	67
Rysunek 53 Krótkookresowa transformata Fouriera – przejazd Pendolino z prędkością 40 km/h (czujnik P-24z) (opracowanie własne)	68

Rysunek 54 Schematyczny rozstaw kół i wózków w pociągu Pendolino	68
Rysunek 55 Krótkookresowa transformata Fouriera – przejazd Pendolino z prędkością 160 km/h (czujniki P-06z i P-09z) (opracowanie własne)	69
Rysunek 56 Krótkookresowa transformata Fouriera – przejazd Pendolino z prędkością 160 km/h (czujniki P-12 i P-15z) (opracowanie własne)	69
Rysunek 57 Krótkookresowa transformata Fouriera – przejazd Pendolino z prędkością 160 km/h (czujniki P-18 i P-21z) (opracowanie własne)	70
Rysunek 58 Krótkookresowa transformata Fouriera – przejazd Pendolino z prędkością 160 km/h (czujnik P-24z) (opracowanie własne)	70
Rysunek 59 Krótkookresowa transformata Fouriera – przejazd Pendolino z prędkością 270 km/h (czujniki P-06z i P-09z) (opracowanie własne)	71
Rysunek 60 Krótkookresowa transformata Fouriera – przejazd Pendolino z prędkością 270 km/h (czujniki P-12z i P-15z) (opracowanie własne)	72
Rysunek 61 Krótkookresowa transformata Fouriera – przejazd Pendolino z prędkością 270 km/h (czujniki P-18z i P-21z) (opracowanie własne)	72
Rysunek 62 Krótkookresowa transformata Fouriera – przejazd Pendolino z prędkością 270 km/h (czujnik P-24z) (opracowanie własne)	73
Rysunek 63 Czujniki przy nasypie - poligon B - drgania w kierunku X, Y, Z (opracowanie własne)	75
Rysunek 64 FFT – przejazd pociągu InterCity z prędkością 160 km/h – tor nr 1 – poligon B (opracowanie własne)	76
Rysunek 65 FFT – przejazd pociągu Pendolino z prędkością 160 km/h – tor nr 1 – poligon B (opracowanie własne)	76
Rysunek 66 Porównanie CWT i STFT – przejazd pociągu Pendolino – prędkość 160 km/h – poligon B – czujnik P-04x (opracowanie własne)	78
Rysunek 67 Porównanie CWT i STFT – przejazd pociągu Intercity – prędkość 160 km/h – poligon B – czujnik P-04x (opracowanie własne)	78
Rysunek 68 Porównanie CWT i STFT – przejazd pociągu Pendolino – prędkość 160 km/h – poligon B – czujnik P-05y (opracowanie własne)	79
Rysunek 69 Porównanie CWT i STFT – przejazd pociągu Intercity – prędkość 160 km/h – poligon B – czujnik P-05y (opracowanie własne)	79
Rysunek 70 Porównanie CWT i STFT – przejazd pociągu Pendolino – prędkość 160 km/h – poligon B – czujnik P-06z (opracowanie własne)	80

Rysunek 71 Porównanie CWT i STFT – przejazd pociągu Intercity – prędkość 160 km/h – poligon B – czujnik P-06z (opracowanie własne).....	81
Rysunek 72 Linie opisujące strefy wpływu drgań na budynki według skali SWD-II podane we współrzędnych: częstotliwość środkowa pasma 1/3 oktawowego- maksymalne przyspieszenie drgań w paśmie [22].....	83
Rysunek 73 Skala SWD - II – Pendolino 250 km/h – poligon C (opracowanie własne).....	84
Rysunek 74 Skala SWD-II – InterCity 160 km/h – poligon C (opracowanie własne).....	84
Rysunek 75 Wskaźnik WODB dla przejazdu po torze nr tor 1 – pociąg Pendolino i InterCity – prędkość $v=160$ km/h – czujnik P-01x (opracowanie własne)	86
Rysunek 76 Wskaźnik WODB dla przejazdu po torze nr tor 1 – pociąg Pendolino i InterCity – prędkość $v=160$ km/h – czujnik P-02y (opracowanie własne)	87
Rysunek 77 Wskaźnik WODB dla przejazdu po torze nr tor 1 i 2 – pociąg InterCity – prędkość $v=160$ km/h – czujnik P-01x (opracowanie własne).....	87
Rysunek 78 Wskaźnik WODB dla przejazdu po torze nr tor 1 i 2 – pociąg InterCity – prędkość $v=160$ km/h – czujnik P-02y (opracowanie własne).....	88
Rysunek 79 Wskaźnik WODB dla przejazdu po torze nr tor 1 – pociąg Pendolino – porównanie maksymalnych wartości dla przejazdów do 160 km/h i od 180 km/h rejestrowanych na czujniku P-01x (opracowanie własne).....	88
Rysunek 80 Wskaźnik WODB dla przejazdu po torze nr tor 1 – pociąg Pendolino – porównanie maksymalnych wartości dla przejazdów do 160 km/h i od 180 km/h rejestrowanych na czujniku P-02y (opracowanie własne).....	89
Rysunek 81 Zestawienie maksymalnych wartości WODB dla różnych prędkości przejazdu pociągu – czujnik P-01x (opracowanie własne).....	89
Rysunek 82 Zestawienie maksymalnych wartości WODB dla różnych prędkości przejazdu pociągu – czujnik P-02y (opracowanie własne).....	90
Rysunek 83 Wskaźnik WODB dla przejazdu po torze nr tor 1 – pociąg Pendolino – prędkość do 250 km/h- czujnik P-01x (opracowanie własne).....	91
Rysunek 84 Wskaźnik WODB dla przejazdu po torze nr tor 1 – pociąg Pendolino – prędkość do 250 km/h – czujnik P-02y (opracowanie własne)	92
Rysunek 85 Zależność WODB od prędkości dla częstotliwości 1; 1,25; 1,6 Hz – czujnik P-01x (opracowanie własne).....	92

Rysunek 86 Zależność WODB od prędkości dla częstotliwości 2; 2,5; 3,15 Hz – czujnik P-01x (opracowanie własne)	93
Rysunek 87 Zależność WODB od prędkości dla częstotliwości 4 Hz, 5 Hz, 6,3 Hz – czujnik P-01x (opracowanie własne)	93
Rysunek 88 Zależność WODB od prędkości dla częstotliwości 8 Hz, 10 Hz, 12,5 Hz – czujnik P-01x (opracowanie własne)	94
Rysunek 89 Zależność WODB od prędkości dla częstotliwości 16 Hz, 20 Hz, 25 Hz – czujnik P-01x (opracowanie własne)	94
Rysunek 90 Zależność WODB od prędkości dla częstotliwości 31,5 Hz, 40 Hz, 50 Hz – czujnik P-01x (opracowanie własne)	95
Rysunek 91 Zależność WODB od prędkości dla częstotliwości 63 Hz, 80 Hz, 100 Hz – czujnik P-01x (opracowanie własne)	95
Rysunek 92 Wartości WODB dla poszczególnych pasm tercjowych dla różnych prędkościach – czujnik P-01x (opracowanie własne).....	96
Rysunek 93 Wartości WODB dla poszczególnych pasm tercjowych dla różnych prędkościach – czujnik P-02y (opracowanie własne).....	97
Rysunek 94 Zależność WODB od prędkości pociągu dla częstotliwości 20 Hz (opracowanie własne)	98
Rysunek 95 Zależność WODB od prędkości pociągu i weryfikacji danych pomiarowych dla częstotliwości 20 Hz (opracowanie własne)	100
Rysunek 96 Spektrum WODB - porównanie pociągu Pendolino – porównanie wartości średnich – czujnik P-01x (opracowanie własne).....	101
Rysunek 97 Spektrum WODB - porównanie pociągu Pendolino – porównanie wartości średnich – czujniki P-02y (opracowanie własne).....	101
Rysunek 98 Zależność wskaźnika W_f od prędkości pociągu dla częstotliwości 20; 25; 31,5 Hz – czujnik P-04x – poligon B (opracowanie własne)	104
Rysunek 99 Zależność wskaźnika W_f od prędkości pociągu dla częstotliwości 63; 80; 100 Hz – czujnik P-04x – poligon B (opracowanie własne)	105
Rysunek 100 Przejazdy pociągu Pendolino ze zmienną prędkością – hamowanie – CWT – poligon B – czujniki P-4x, P-5y, P-6z (opracowanie własne)	106
Rysunek 101 Przejazdy pociągu Pendolino ze zmienną prędkością – ruszanie – CWT – poligon B – czujniki P-4x, P-5y, P-6z (opracowanie własne)	107

Rysunek 102 Przejazdy pociągu Pendolino z prędkością 250 km/h – CWT – poligon B – czujniki 6z, 9z, 12z, 15z, 18z, 21z, 24z (opracowanie własne).....	109
Rysunek 103 Przejazd pociągu InterCity z prędkością 160 km/h - poligon B - czujniki 4x, 5y – CWT (opracowanie własne)	111
Rysunek 104 Przejazd pociągu InterCity z prędkością 160 km/h - poligon B - czujniki 6z – CWT (opracowanie własne).....	111
Rysunek 105 Przejazd pociągu towarowego z prędkością 67 km/h - tor B - poligon B - czujniki 4x – CWT (opracowanie własne)	112
Rysunek 106 Przejazd pociągu towarowego z prędkością 67 km/h - tor B - poligon B - czujniki 5y – CWT (opracowanie własne)	112
Rysunek 107 Przejazd pociągu towarowego z prędkością 67 km/h - tor B - poligon B - czujniki 6z – CWT (opracowanie własne).....	112
Rysunek 108 Różnica amplitud drgań w pasmach tercjowych dla pociągu osobowego i towarowego - poligon B (opracowanie własne).....	113
Rysunek 109 Porównanie drgań poziomych X (budynek – grunt) - przejazd Pendolino z prędkością 250 km/h (opracowanie własne	114
Rysunek 110 Porównanie drgań poziomych Y (budynek – grunt) - przejazd Pendolino z prędkością 250 km/h (opracowanie własne).....	115
Rysunek 111 Współczynnik redukcji maksymalnych wartości drgań prostopadłych do osi toru (X) w pasmach tercjowych w zależności od prędkości pociągu (opracowanie własne)	116
Rysunek 112 Współczynnik redukcji maksymalnych wartości drgań równoległych do osi toru (Y) w pasmach tercjowych w zależności od prędkości pociągu (opracowanie własne)	116
Rysunek 113 Współczynnik redukcji maksymalnych wartości drgań prostopadłych do osi toru (X) w pasmach tercjowych w zależności od prędkości pociągu i roku eksploatacji (opracowanie własne).....	117
Rysunek 114 Współczynnik redukcji maksymalnych wartości drgań równoległych do osi toru (Y) w pasmach tercjowych w zależności od prędkości pociągu i roku eksploatacji (opracowanie własne).....	118

Bibliografia

- [1] D. P. Connolly, G. P. Marecki, G. Kouroussis, I. Thalassinakis, P. K. Woodward, The growth of railway ground vibration problems — A review, *Science of The Total Environment*, nr 568, str. 1276–1282, 2016.
- [2] Centralny Port Komunikacyjny, online: <https://www.cpk.pl/pl> (dostęp: luty 2022).
- [3] S. Ouakka, O. Verlinden, G. Kouroussis, Railway ground vibration and mitigation measures: benchmarking of best practices, *Railway Engineering Science*, nr 30, 2022.
- [4] *ISO 2631-1:1997/Amd 1:2010 - Mechanical vibration and shock — Evaluation of human exposure to whole-body vibration — Part 1: General requirements — Amendment 1*. 2010.
- [5] *ISO 2631-2:2003 - Mechanical vibration and shock — Evaluation of human exposure to whole-body vibration — Part 2: Vibration in buildings (1 Hz to 80 Hz)*. 2003.
- [6] *ISO/TS 14837-32:2015 - Mechanical vibration — Ground-borne noise and vibration arising from rail systems — Part 32: Measurement of dynamic properties of the ground*. ISO, 2015.
- [7] *PN-EN 12299:2009 - Kolejnictwo - Komfort jazdy pasażerów - Pomiary i ocena*. Polski Komitet Normalizacyjny, 2009, pp. 1–62.
- [8] *ISO 4866:2010 - Mechanical vibration and shock — Vibration of fixed structures — Guidelines for the measurement of vibrations and evaluation of their effects on structures*. ISO, 2010.
- [9] *ISO 10137:2007 - Bases for design of structures - Serviceability of buildings and walkways against vibrations*. ISO, 2007.
- [10] *ISO 16587:2004 - Mechanical vibration and shock — Performance parameters for condition monitoring of structures*. ISO, 2004.
- [11] *British Standard guide to measurement and evaluation of human exposure to whole-body mechanical vibration and repeated shock*. British Standards

- Institution, 1987.
- [12] *BS 6472-1:2008 - Guide to evaluation of human exposure to vibration in buildings*, nr 1. Vibration British Standards Institution, 2008.
- [13] *DIN 4150-1 - Prediction of vibration parameters*. Niemiecki Insytut Normalizacyjny, 2001.
- [14] *DIN 4150-2 - Structural vibration - Human exposure to vibration in buildings*. Niemiecki nsytut Normalizacyjny, 1999.
- [15] *DIN 4150-3 : Vibrations in buildings - Part 3: Effects on structures*. Niemiecki Insytut Normalizacyjny, 2016.
- [16] *SN 640312 : 2013 Les ébranlements—effet des ébranlements sur les constructions*. Swiss Standards, 2013.
- [17] *NS 8176:2017 Vibration and shock — Measurement of vibration in buildings from land-based transport, vibration classification and guidance to evaluation of effects on human beings*. Standards Norway, 2017.
- [18] C. Hanson, J. C. Ross, D. Towers, *High-Speed Ground Transportation Noise and Vibration Impact Assessment*, *Semantic Scholar*. Federal Rail Road Administration, 2012.
- [19] C. Hanson, D. Towers, L. D. Meister, *Transit Noise and Vibration Impact Assessment*, *Semantic Scholar*. Federal Rail Road Administration, 2006.
- [20] Komisja Unii Europejskiej, *DYREKTYWA PARLAMENTU EUROPEJSKIEGO I RADY (UE) 2016/797 z dnia 11 maja 2016 r. w sprawie interoperacyjności systemu kolei we Wspólnocie*. Unia Europejska, 2015.
- [21] *Ustawa z dnia 27 kwietnia 2001 r. Prawo ochrony środowiska*, 2001.
- [22] *PN-B-02170:2016-12 - Ocena szkodliwości drgań przekazywanych przez podłoże na budynki*, Polski Komitet Normalizacyjny, 2016.
- [23] *PN-B-02171:2017-06 -Ocena wpływu drgań na ludzi w budynkach*, Polski Komitet Normalizacyjny, 2017.
- [24] Centralny Port Komunikacyjny, *Standardy Techniczne - Szczegółowe Warunki*

- Techniczne Dla Budowy Infrastruktury Kolejowej Centralnego Portu Komunikacyjnego - Wytoczne Projektowania*. Polska, 2021.
- [25] *Railway Induced Vibration - State of the art report*, UIC, 2017.
- [26] D. P. Connolly, G. Kouroussis, O. Laghrouche, C. L. Ho, M. C. Forde, Benchmarking railway vibrations - Track, vehicle, ground and building effects, *Construction and Building Materials*, nr 92, str. 64–81, 2015.
- [27] P. Van den Broeck, *A prediction model for ground-born vibrations due to railway traffic*. Katholieke Universiteit Leuven, 2001.
- [28] A. Castanheira-Pinto, J. Fernández-Ruiz, P. A. Costa, Predicting the non-linear critical speed for high-speed railways in singular geotechnical scenarios, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, nr 165, str. 107722, 2023.
- [29] A. Castanheira-Pinto, J. Fernández-Ruiz, A. Colaço, P. Alves Costa, and D. P. Connolly, A simplified approach for predicting the non-linear critical speed of railway tracks, *Transportation. Geotechnics*, nr 37, str. 100865, 2022.
- [30] P. A. Costa, P. Soares, A. Colaço, P. Lopes, and D. Connolly, Railway critical speed assessment: A simple experimental-analytical approach, *Soil Dynamics and Earthquake Engineerin*, nr 134, 2020.
- [31] C. Charoenwong, D. P. Connolly, K. Dong, P. Alves Costa, P. J. Soares, P. K. Woodward, A Multi-model Approach to Analyse Railway Track-Ground Dynamics and Soil Nonlinearity, *Lecture Notes in Civil Engineering*, nr. 165, str. 37–48, 2022.
- [32] D. P. Connolly, K. Dong, P. Alves Costa, P. Soares, P. K. Woodward, High speed railway ground dynamics: a multi-model analysis, *International Journal of Rail Transportation.*, nr. 8, str. 324–346, 2020.
- [33] D. López-Mendoza, D. P. Connolly, A. Romero, G. Kouroussis, P. Galvín, A transfer function method to predict building vibration and its application to railway defects, *Construction and Building Materials*, nr 232, 2020.
- [34] E. Çelebi, A. C. Zülfiyar, F. Göktepe, O. Kırtel, A. A. Faizan, B. İstegün, In-situ measurements and data analysis of environmental vibrations induced by high-

- speed trains: A case study in North-Western Turkey, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, nr 156, poz. 107211, 2022.
- [35] M. A. Boogaard, Z. Li, and R. P. B. J. Dollevoet, In situ measurements of the crossing vibrations of a railway turnout, *Measurement*, nr125, str. 313–324, 2018.
- [36] J. Yang, P. Li, and Z. Lu, Numerical Simulation and In-Situ Measurement of Ground-Borne Vibration Due to Subway System, *Sustain. 2018*, nr 10, str. 2439, 2018.
- [37] R. Mezeh, H. Mroueh, M. Hosseingholian, M. Sadek, New approach for the assessment of train/track/foundation dynamics using in-situ measurements of high-speed train induced vibrations, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, nr 116, str. 50–59, 2019.
- [38] S. J. Feng, X. L. Zhang, L. Wang, Q. T. Zheng, F. L. Du, Z. L. Wang, In situ experimental study on high speed train induced ground vibrations with the ballastless track, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, nr 102, str. 195–214, 2017.
- [39] L. Wang, P. Wang, K. Wei, R. Dollevoet, and Z. Li, Ground vibration induced by high speed trains on an embankment with pile-board foundation: Modelling and validation with in situ tests, *Transportation Geotechnics*, nr 34, poz. 100734, 2022.
- [40] Y. Tang, Q. Yang, X. Ren, S. Xiao, Dynamic response of soft soils in high-speed rail foundation: in situ measurements and time domain finite element method model, nr 56, str. 1832–1848, 2019.
- [41] D. J. Thompson, C. J. Jones, P.E. Gautier, Railway noise and vibration : mechanisms, modelling and means of control, Elsevier, 2009.
- [42] R. Ciesielski, E. Maciąg, *Drgania drogowe i ich wpływ na budynki*. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, 1990.
- [43] J. C. Pombo, J. A. C. Ambrósio, Application of a wheel-rail contact model to railway dynamics in small radius curved tracks, *Multibody System Dynamics* nr 19, str. 91–114, 2008.
- [44] M. J. Rudd, Wheel/rail noise—Part II: Wheel squeal, *Journal of Sound and Vibration*, nr 46, str.. 381–394, 1976.

- [45] X. Sheng, C. J. C. Jones, D. J. Thompson, Prediction of ground vibration from trains using the wavenumber finite and boundary element methods, *Journal of Sound and Vibration*, nr 293, str. 575–586, 2006.
- [46] L. Auersch, The effect of critically moving loads on the vibrations of soft soils and isolated railway tracks, *Journal of Sound and Vibration*, nr 310, str. 587–607, 2008.
- [47] R. Bogacz, W. Czyczuła, Response of beam on visco-elastic foundation to moving distributed load, *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, nr 46, str. 763–775, 2008.
- [48] P. Koziół, C. Mares, and I. Esat, Wavelet approach to vibratory analysis of surface due to a load moving in the layer, *International Journal of Solids and Structures*, nr 45, str. 2140–2159, 2008.
- [49] W. Czyczuła, T. Tatar, Badania obejmujące pomiary hałasu, przemieszczeń i przyspieszeń drgań elementów nawierzchni oraz podtorza, naprężeń w szynach na odcinkach testowych na linii CMK podczas przejazdów testowych pociągu pendolino wraz z analizą danych, Politechnika Krakowska, 2014.
- [50] W. Czyczuła, P. Koziół, D. Kudła, S. Lisowski, Analytical evaluation of track response in the vertical direction due to a moving load, *Journal of Vibration and Control*, nr 23, str. 2989–3006, 2016.
- [51] W. Szcześniak, M. Ataman, Survey of publications by Polish authors in the field of moving loads on engineering structures, *AUTOBUSY – Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe*, nr 19, str. 667–674, 2018.
- [52] A. Duley, B. N. Madhusudhan, L. Le Pen, D. Thompson, W. Powrie, Assessing the Risk of Critical Velocity Effects at Railway Sites Using Site Investigation and Advanced Laboratory Testing, *Lecture Notes in Civil Engineering*, nr 166, str. 857–869, 2022.
- [53] R. Ciesielski, A. Kwiecień, K. Stypuła, *Propagacja drgań w warstwach przypowierzchniowych podłoża gruntowego: badania doświadczalne IN SITU*, Inżynieria Komunikacyjna, 1999.
- [54] R. Ciesielski, J. Kawecki, E. Maciąg, *Ocena wpływu wibracji na budowle i ludzi*

- w budynkach - *Diagnostyka Dynamiczna*. Instytut Techniki Budowlanej, 1993.
- [55] J. Korzeb, Analiza drgań komunikacyjnych z zastosowaniem teorii falek,” *Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej*., nr 77, str. 45–56, 2011.
- [56] D. P. Connolly, M. C. Forde, “Use of Conventional Site Investigation Parameters to Calculate Critical Velocity of Trains from Rayleigh Waves, *Transportation Research Record*, nr 2476, str. 32–36, 2015.
- [57] D. P. Connolly, G. Kouroussis, O. Laghrouche, C. L. Ho, M. C. Forde, Benchmarking railway vibrations - Track, vehicle, ground and building effects, *Construction and Building Materials*, nr 92, str. 64–81, 2015.
- [58] K. Kuźniar, T. Tatara, Przekazywanie drgań od wstrząsów górniczych z gruntu na fundamenty budynków różnego typu, *Przegląd Górniczy*, 2014.
- [59] K. Kuźniar, Ł. Chudyba, Interakcja dynamiczna podłoże - budynek w przypadku przekazywania prędkości oraz przyspieszenia drgań od wstrząsów pochodzenia górniczego, *Civil environmental Engineering*, str. 37–45, 2013.
- [60] M. Miari, R. Jankowski, Analysis of pounding between adjacent buildings founded on different soil types, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, nr 154, 2022.
- [61] K. Stypuła, T. Tatara, Vibrations of free-field and building caused by passages of the Pendolino train, *Czasopismo Techniczne*, nr 1, 2017.
- [62] J. Bohatkiewicz, M. Hałucha, S. Biernacki, P. Łukasz, K. Kowalczyk, Pomiar hałasu podczas przejazdów pociągu testowego EMU250 na Centralnej Magistrali Kolejowej (CMK), Ekkom, 2014.
- [63] P. Przydatek, Znaczenie prawidłowego rozpoznania parametrów gruntu dla oceny oddziaływania Pendolino na otoczenie, Politechnika Krakowska, 2014.
- [64] B. Koźuch, Propagacja hałasu w otoczeniu linii kolejowych dużych prędkości, *Politechnika Krakowska*. 2014.
- [65] W. Czyczuła, B. Koźuch, Hałas w otoczeniu linii kolejowych – porównanie hałasu emitowanego przez EMU 250 (Pendolino) i inne pociągi kursujące po centralnej magistrali kolejowej, *TTS Technika Transportu Szynowego, koleje, tramwaje, metro*, 2015.

- [66] Wikipedia, POL rail 4 map - Linia kolejowa nr 4 – Wikipedia, wolna encyklopedia. online:
https://pl.wikipedia.org/wiki/Linia_kolejowa_nr_4#/media/Plik:POL_rail_4_map.svg (dostęp: marzec, 2022).
- [67] *Inforail*, online: <http://inforail.pl/text.php?id=61246> (dostęp: marzec, 2022).
- [68] P. Stecz, Wpływ działania na budynki długotrwałych obciążeń dynamicznych generowanych przejazdami pociągów metra, Politechnika Krakowska, 2014.
- [69] PCB Piezotronics, Sensors to measure vibration, acoustics, force, pressure, load, strain, shock & torque, online: <https://www.pcb.com/> (dostęp: luty 2022).
- [70] B. Kozuch, J. Chełmecki, T. Tatara, Influence of Installation Errors on the Output Data of the Piezoelectric Vibrations Transducers, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, nr 245, 2017.
- [71] K. Stypuła, B. Kozuch, Kalibracja przetworników drgań na podstawie normy ISO 16063-21: Methods for the calibration of vibration and shock transducers – Part:21 Vibration calibration by comparison to a reference transducer,” *TTS Technika Transportu Szynowego: koleje, tramwaje, metro*, 2015.
- [72] E. Van Nieuwenhove, Siemens-PLM-LMS-SCADAS. Siemens, 2017.
- [73] E. Pilecka, J. Pietras, J. Zięba, J. Morman, P. Przydatek, Wstępne rozpoznanie warunków gruntowych w punktach pomiarowych dynamicznego oddziaływania składu Pendolino na otoczenie (ekspertyza), 2014.
- [74] Geopartner, Dokumentacja geotechniczna do celów projektowych dla przygotowania modernizacji linii kolejowej E65 (tor 1 i 2) na odcinku linii Nr 4 (CMK) ze stacjami (ekspertyza), 2008.
- [75] E. C. Chu, A. George, Inside the FFT black box: serial and parallel fast Fourier transform algorithms, poz. 312, 2000.
- [76] T. P. Zieliński, Cyfrowe przetwarzanie sygnałów: od teorii do zastosowań, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, 2007.
- [77] R. G. Lyons, Wprowadzenie do cyfrowego przetwarzania sygnałów, Wydawnictwa Komunikacji i Łączność, 2010.

- [78] M. Ma, L. Xu, L. Du, Z. Wu, X. Tan, Prediction of building vibration induced by metro trains running in a curved tunnel, *Journal of Vibration and Control*, 2020.
- [79] X. Zhang, L. Ruan, Y. Zhao, X. Zhou, X. Li, A frequency domain model for analysing vibrations in large-scale integrated building–bridge structures induced by running trains, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part F J. Rail Rapid Transit*, nr 234, str. 226–241, 2020.
- [80] K. Vogiatzis, H. Mouzakis, Ground-borne noise and vibration transmitted from subway networks to multi-storey reinforced concrete buildings, *Transport*, nr 33, str. 446–453, 2018.
- [81] W. Y. Zhang, T. Hao, Y. Chang, Y. H. Zhao, Time-frequency analysis of enhanced GPR detection of RF tagged buried plastic pipes, *NDT and E International*, nr 92, str. 88–96, 2017.
- [82] C. Mateo, J. A. Talavera, Short-time Fourier transform with the window size fixed in the frequency domain, *Digital Signal Processing: A Review Journal*, nr 77, str. 13–21, 2018.
- [83] A. Zacniewski, Analiza porównawcza wybranych transformat w kontekście zobrazowania zaszumionego sygnału harmonicznego, *Wojskowa Akademia Techniczna*, nr 64, str. 35–47, 2015.
- [84] W. Fan and P. Qiao, A 2-D continuous wavelet transform of mode shape data for damage detection of plate structures, *International Journal of Solids and Structures*, nr 46, str. 4379–4395, 2009.
- [85] A. Caprioli, A. Cigada, D. Raveglia, Rail inspection in track maintenance: A benchmark between the wavelet approach and the more conventional Fourier analysis, *Mechanical Systems and Signal Processing*, nr 21, str. 631–652, 2007.
- [86] J. Białasiewicz, Falki i aproksymacje, WNT, 2004.
- [87] P. Krzyworzeka and J. Mężyk, Dobór właściwej falki dla opisu cech dystynktywnych drgań parasejsmicznych, *Diagnostyka*, nr 4, str. 209–214, 2006.
- [88] J. Korzeb, Zastosowanie analizy falkowej w ocenie propagacji drgań w strefach oddziaływania infrastruktury transportowej, *Transp. XXI wieku*, 2010.

- [89] D. Mokrzan, G. Szymański, Time-frequency methods of non-stationary vibroacoustic diagnostic signals processing, *Rail Vehicle*, nr 3, str. 44–57, 2021.
- [90] X. Laval, C. Mailhes, N. Martin, P. Bellemain, C. Pachaud, Amplitude and phase interaction in Hilbert demodulation of vibration signals: Natural gear wear modeling and time tracking for condition monitoring, *Mechanical Systems and Signal Processing*, nr 150, poz. 107321, 2021,
- [91] M. Sandsten, *Time-Frequency Analysis of Time-Varying Signals and Non-Stationary Processes An Introduction*. Lund Univerity, 2020.
- [92] B. Kożuch, Analiza wpływu drgań komunikacyjnych na budynek przy uwzględnieniu zapewnienia komfortu wibracyjnego dla ludzi w budynkach, *Nowoczesne projektowanie i realizacja konstrukcji budowlanych*, SKNKŻ Konkret Politechnika Krakowska, 2015.
- [93] K. Stypuła, B. Kożuch, Interpretacja wyników pomiarów w budynkach drgań wywołanych przejazdami pociągów metra na odcinku ‘bielańskim’, *Zeszyty Naukowo Techniczne Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Komunikacji RP*, 2015.

STRESZCZENIE W JĘZYKU ANGIELSKIM

VIBRATIONS INDUCED BY THE PASSAGE OF HIGH-SPEED TRAINS IN POLAND – PROPAGATION IN THE GROUND

The purpose of the dissertation was to propose a measurement and interpretation methodology for polygon studies of vibrations induced by the passage of high-speed trains in the territory of Poland. The dissertation reviewed the current state of knowledge and ongoing scientific and research work in the field of propagation of vibrations induced by train traffic.

The basis of the work is large-scale measurements carried out during the running of new trains at speeds up to 293 km/h. The study was carried out in three cross-section of railway line No. 4. Re-measurements were made after five years of train operation.

Based on the analysis, the theses were formulated:

- The proposed measurement-interpretation methodology for in situ testing of vibrations caused by high-speed train crossings and parametric analysis can be used to verify and determine characteristic vibration parameters (frequency bands strongly dependent on speed change and weakly sensitive to train speed increase).
- A complete picture of non-stationary, time-varying vibration signals excited by passing trains is provided by supplementing standard and prescriptive analyses with analyses that give results in the frequency-time domain (e.g., STFT or CWT). This result is helpful in the diagnosis of rolling stock in service.
- There is such a speed v_0 of the train, which, if exceeded, will cause a significant amplification of ground vibrations in the surroundings of the railroad line.

In addition, the research carried out within the framework of the work allows the following conclusions:

- The study of dynamic influences should not be limited to a distance of 25 m from the track axis, especially in the case of the influence of vibrations generated by the passage of high-speed trains.
- The original threads of the dissertation are:
- Analysis of large-scale in situ studies of vibrations generated by train crossings at speeds exceeding 200 km/h in Poland.

- Analysis of the impact of the passage of trains with the highest rolling stock speeds achieved to date in Poland and conclusions from the interpretation of the propagation of vibrations in the ground and their impact on the building.
- Re-testing after five years of Pendolino use at the same measuring point with the same measuring track under operating conditions.
- Determination of the speed of the train based on the approximation of vibration measurements, at which the 1st zone of harmful vibrations for the indicated building is exceeded.
- Proposal of the application of wavelet analyses (CWT) for large-scale train passage studies and comparison with normative analyses.
- The essential added value of the dissertation is the determination of vibration frequency bands strongly dependent on the change in speed of the rolling stock generating these vibrations.
- Demonstration of the harmfulness of train vibrations at distances greater than 25 m from the track.
- Estimating the critical speed of the railroad line and confirming the results with field measurements.