

Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki
Wydział Inżynierii Lądowej
Instytut Mechaniki Budowli
Laboratorium Badania Odkształceń i Drgań Budowli



mgr inż. Piotr Stecz

**WPŁYW DZIAŁANIA NA BUDYNKI DŁUGOTRWAŁYCH
OBCIĄŻEŃ DYNAMICZNYCH GENEROWANYCH
PRZEJAZDAMI POCIĄGÓW METRA**

ROZPRAWA DOKTORSKA

Promotor

dr hab. inż. Krzysztof Stypuła, prof. PK

KRAKÓW, 2014r.



*Składam serdeczne podziękowanie
Panu dr hab. inż. Krzysztofowi Stypule prof. PK
za pomoc, poświęcony czas, cierpliwość i wiele
konstruktywnych uwag, które przyczyniły się
do powstania niniejszej pracy*

Piotr Stecz



SPIS TREŚCI:

1. WSTĘP	1
1.1 Geneza pracy.....	1
1.2 Aktualny stan wiedzy.....	3
1.2.1. Publikacje polskie.....	3
1.2.2. Publikacje zagraniczne.....	4
1.3 Cel i zakres pracy.....	6
2. KRYTERIA OCENY WPŁYWU DRGAŃ NA ŚRODOWISKO	8
2.1 Ujęcie normowe wpływu drgań na konstrukcję budynków.....	8
2.2 Ujęcie normowe wpływu drgań na ludzi w budynkach.....	13
3. METODYKA POMIARÓW I ANALIZ	19
3.1 Opis elementów układu źródło-ośrodek-odbiornik drgań.....	19
3.1.1. Charakterystyka źródła drgań.....	20
3.1.2. Charakterystyka ośrodka propagacji drgań między źródłem i ich odbiornikiem.....	22
3.1.3. Charakterystyka odbiornika drgań.....	24
3.1.3.1. Budynek przy Al. Niepodległości 118 (N118).....	25
3.1.3.2. Budynek przy Al. Niepodległości 186 (N186).....	26
3.1.3.3. Budynek przy ul. Mickiewicza 22A (M22A).....	27
3.1.3.4. Budynek przy ul. Słowackiego 32/36 (S32/36).....	28
3.2 Charakterystyka wykonanych badań (ogólne warunki stosowania metodyki).....	30
3.2.1. Stanowisko pomiarowe w budynku.....	31
3.2.2. Stanowisko pomiarowe w tunelu metra.....	31
3.3 Sprzęt pomiarowy używany do badań doraźnych.....	33
3.3.1. Czujniki.....	33
3.3.2. Zasilacz.....	34
3.3.3. Rejestrator.....	35
3.3.4. Analizator.....	36
3.4 Metodyka analizy.....	37
3.5 Przenoszenie drgań przez strop kalibracja czujnika.....	44
4. WYNIKI POMIARÓW I ANALIZ DRGAŃ GENEROWANYCH PRZEJAZDAMI POCIĄGÓW METRA	52
4.1. Wpływ drgań na konstrukcję budynków.....	53
4.1.1. Dobowy (krótkookresowy) rozkład drgań.....	53
4.1.2. Przenoszenie drgań w układzie tunel-budynek.....	63
4.1.2.1. Analiza w dziedzinie czasu.....	67
4.1.2.2. Analiza w dziedzinie częstotliwości.....	72
4.1.3. Spektrum odpowiedzi.....	85
4.1.3.1. Analiza wyników.....	86
4.1.3.2. Wpływ tłumienia na zmiany rzędnych spektrum odpowiedzi.....	86
4.1.3.3. Zmiany spektrum odpowiedzi w przypadku przejazdów wybranego pociągu metra.....	87
4.1.3.4. Zmiany spektrum odpowiedzi w przypadku przejazdów różnych składów pociągów tego samego typu.....	88
4.2. Wpływ drgań na ludzi w budynkach.....	94
4.2.1. Dobowy (krótkookresowy) rozkład drgań.....	96
4.2.2. Długookresowy (wielotygodniowy) rozkład drgań.....	112
4.2.2.1. Analiza trendu wielotygodniowego.....	130
4.2.2.2. Obwiednia wartości maksymalnej WODL.....	133
5. WNIOSKI	138
6. LITERATURA	141

WAŻNIEJSZE OZNACZENIA

a_{\max}	– maksymalna wartość przyspieszenia drgań
a_{RMS}	– średniokwadratowa wartość przyspieszenia drgań
t_p	– czas trwania drgań
X	– składowa drgań w kierunku poziomym radialnym, tj. od źródła drgań do punktu odbioru drgań (w przypadku metra jest to kierunek prostopadły do osi podłużnej tunelu)
Y	– składowa drgań w kierunku poziomym transwersalnym, tj. poprzecznie do składowej X (w przypadku metra jest to kierunek równoległy do osi podłużnej tunelu)
Z	– składowa drgań w kierunku pionowym
FFT	– szybka transformata Fouriera
RMS	– wartość średniokwadratowa (skuteczna) od ang. Root Mean Square
$H(\omega)$	– transmitancja układu
ω	– częstotliwość kołowa drgań własnych
$H(f)$	– współczynnik wzmocnienia układu
$\varphi(f)$	– współczynnik fazowy
$S_y(\omega)$	– spektrum gęstości mocy
W_p	– globalny współczynnik przeniesienia
RMS_{\max}	– maksymalna wartość średniokwadratowa
S_a	– bezwzględne przyspieszeniowe spektrum drgań
SWD	– Skale Wpływów Dynamicznych
WODB	– wskaźnik odczuwalności drgań przez konstrukcję budynków
WODL	– wskaźnik odczuwalności drgań przez ludzi w budynkach

1. WSTĘP

1.1 Geneza pracy

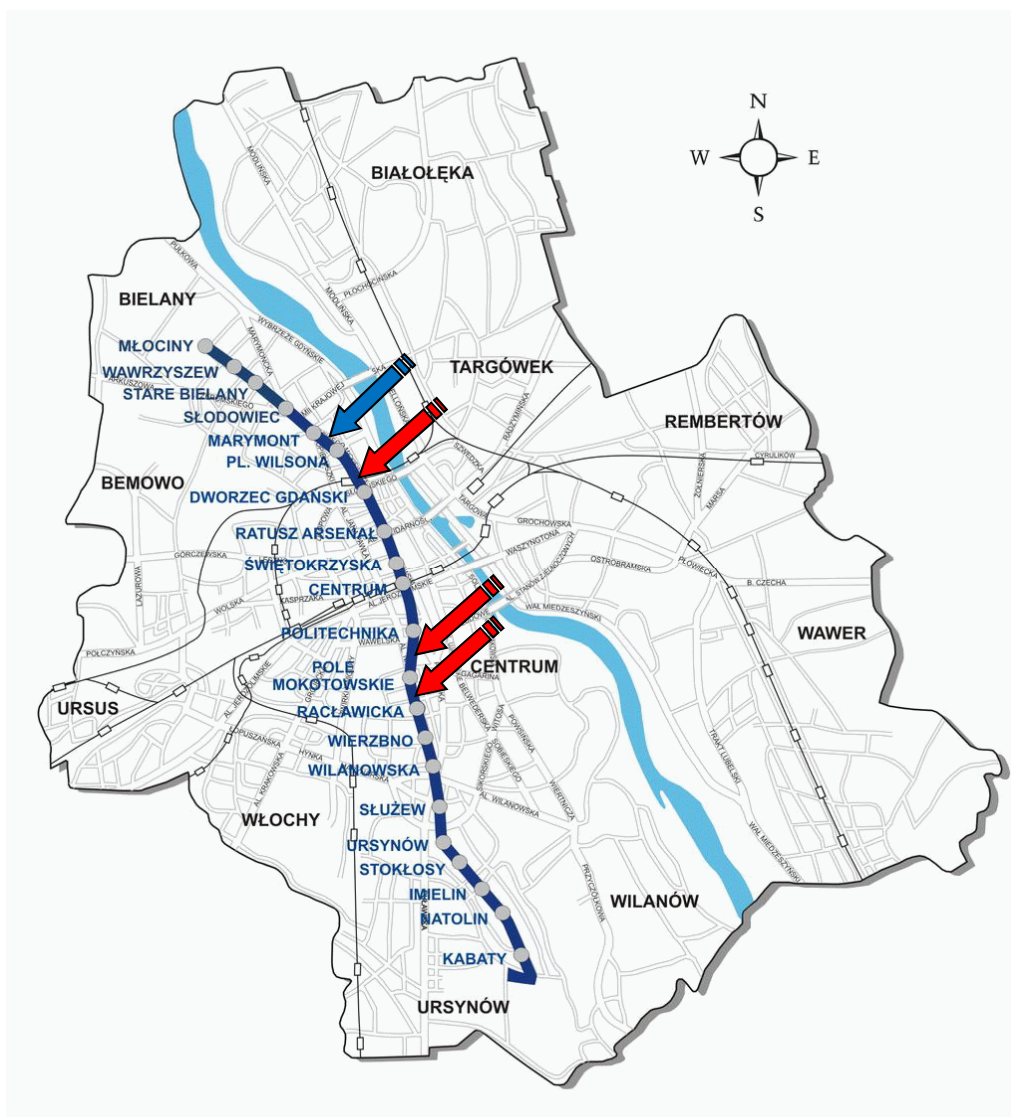
Uruchomienie I linii metra w Warszawie, po długim okresie planowania (prace projektowe prowadzone już od lat międzywojennych [por. Rossman J. i in., (1962)]) było wydarzeniem, które w znaczący sposób wpłynęło na złagodzenie problemów komunikacyjnych Stolicy. Rozpoczynając budowę I linii metra zdawano sobie sprawę z faktu, iż znaczące oddziaływanie metra na środowisko stanowią drgania generowane przez przejeżdżające pociągi w tunelu w sąsiedztwie budynków mieszkalnych.

Dlatego od początku projektowania I linii metra w Warszawie prowadzone były przez Instytut Mechaniki Budowli Politechniki Krakowskiej prace doświadczalne w Pradze Czeskiej (z uwagi na podobieństwo funkcjonującej tam linii metra) [por. Ciesielski R., Blarowski A., (1986)], dotyczące rozpoznania wpływu drgań metra na budynki i na ludzi w budynkach celem prognozowania tych wpływów w odniesieniu do linii metra w Warszawie [por. Ciesielski R., Kawecki J., Stypuła K., (1994)]. Zastosowano podkładki wibroizolacyjne w węźle mocującym szynę i po uruchomieniu pierwszego odcinka I linii metra w Warszawie wykonano pomiary kontrolne drgań, które nie wykazały nadmiernego wpływu drgań na budynki i na ludzi w nich przebywających. Przez kilka pierwszych lat, kiedy eksploatowano jedynie wagony produkcji rosyjskiej, pojawiały się sporadycznie skargi mieszkańców z najbliższej położonych budynków. Problem drgań więc praktycznie nie istniał. Pojawił się natomiast po wprowadzeniu do eksploatacji nowych wagonów typu Metropolis.

W miarę upływu czasu podczas eksploatacji linii Metra, pojawił się problem wzrostu poziomu drgań w okolicznych budynkach, usytuowanych w sąsiedztwie linii metra. Zostało to spowodowane zmianą geometrii kół w wagonach typu Metropolis. Zjawisko przybrało na sile na przełomie lat 2001/2002, po ok. 2 latach po zakupie przez Metro Sp. z o.o. nowego typu wagonów.

Wtedy też wykonano pomiary drgań w wybranych lokalizacjach (w sąsiedztwie linii metra). Celem podjętych badań było określenie oddziaływań od przejazdów pociągów metra na budynki położone w Warszawie przy ul. Niepodległości wraz z oceną tych oddziaływań na budynki i na ludzi w budynkach. Jednocześnie narodził się pomysł stworzenia systemu ciągłego monitorowania drgań i w ten sposób zapobieżenia z pewnym wyprzedzeniem wystąpienia sytuacji przekroczenia progów normowych, a co za tym idzie niedopuszczenia do nadmiernego oddziaływania drgań na ludzi.

Wykorzystując dotychczasowe doświadczenia w zakresie badań drgań budynków wywołanych przejazdami pociągów w tunelach metra [por. Ciesielski, Blarowski (1986), Ciesielski, Kawecki, Stypuła (1994), Ciesielski, Stypuła (1994), Ciesielski, Stypuła (1995), Ciesielski, Stypuła (1998), Ciesielski, Stypuła (1994(2))] zespół pod kierownictwem prof. dr hab. inż. Romana Ciesielskiego i dr hab. inż. Krzysztofa Stypuły w Instytucie Mechaniki Budowli Politechniki Krakowskiej opracował założenia do systemu monitoringu tych drgań. W ramach tego systemu prowadzony jest m.in. ciągły pomiar drgań w trzech budynkach sąsiadujących z tunelem metra w Warszawie.



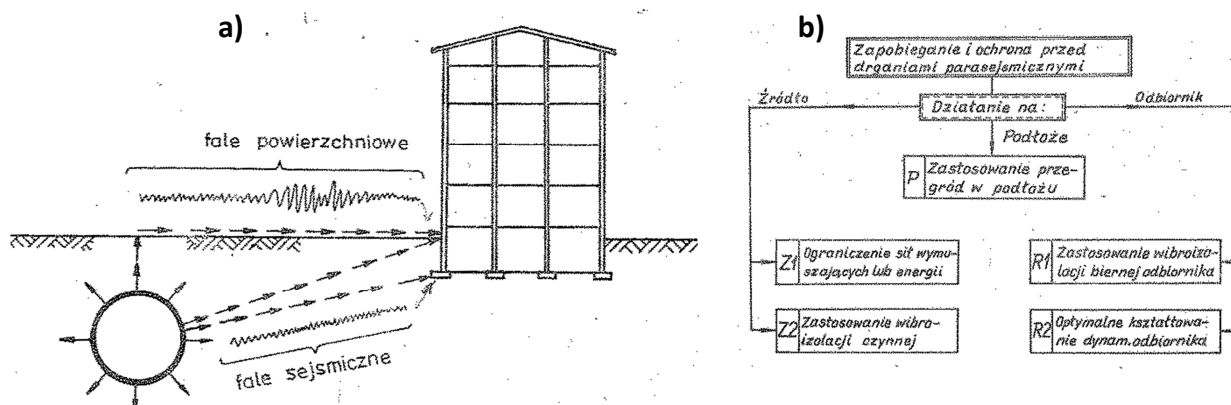
Rys. 1.1. Schemat rozmieszczenia trzech obecnie istniejących stanowisk systemu ciągłego monitoringu drgań na trasie I linii metra w Warszawie. Niebieską strzałką zaznaczono miejsce usytuowania tymczasowego tzw. „czwartego przekroju pomiarowego” o którym jest mowa w niniejszej pracy. Źródło: www.metro.waw.pl

1.2 Aktualny stan wiedzy

W obecnych czasach coraz częściej jest analizowane zagadnienie wpływu drgań na budynki i ludzi w budynkach. Jest to spowodowane większym zainteresowaniem tematyką drgań wśród społeczeństwa, które „wymusza” na projektantach nowych budynków planowanych w sąsiedztwie źródeł drgań, spełnienie warunków komfortu wibracyjnego dla ludzi i zaprojektowania konstrukcji tak, aby nie wystąpiły uszkodzenia albo przyspieszone ich zużycie z powodu drgań. O aktualności podjętej tematyki świadczyć mogą ukazujące się w literaturze polskiej i światowej opracowania z tego zakresu. Spośród licznych prac na temat wpływu drgań od przejazdu pojazdów szynowych na budynki, a w szczególności drgań generowanych przejazdami pociągów metra (komunikacja podziemna), poniżej przedstawiono niektóre prace z tego zakresu.

Publikacje polskie

Zagadnienie wpływu drgań od metra czerpie swoje początki z badań wykonywanych przez Politechnikę Krakowską, od roku 1985 wraz z pierwszymi badaniami podjętymi przez R. Ciesielskiego i A. Blarowskiego [porównaj (Ciesielski R., Blarowski A. (1986))]. W publikacjach tych zwrócono uwagę na konieczność wykonania pomiarów in situ, jak również przedstawiono wyniki doświadczalne badania drgań budynków wykonanych w Czechosłowacji i ZSRR. Autorzy dokonali identyfikacji źródeł parasejsmicznych na drodze propagacji fali w układzie tunel - budynek [por. rys. 1.2 część a]. Zwrócono przy tym uwagę na brak wielu informacji dotyczących usytuowania czujników, prędkości przejazdu pociągu czy też rodzaju gruntu wokół tuneli. W drugiej części omawianej publikacji zwrócono szczególną uwagę na istniejący stan prawny w dziedzinie ochrony przed drganiami konstrukcji budynków, jak też ludzi w nich przebywających. Podano również, za autorami z Czechosłowacji i ZSRR, metody ograniczenia drgań generowanych przejazdami pociągów metra w tunelu [por. rys. 1.2 część b]



Rys. 1.2. Schemat generowania fal parasejsmicznych przez tunel metra (a). Schemat zapobiegania i ochrony przed drganiami parasejsmicznymi (b). Źródło: Ciesielski R., Blarowski A. (1986)

Następnie powstał cykl publikacji prof. Ciesielskiego wraz z prof. Stypułą, przy współpracy z prof. Kaweckim [porównaj (Ciesielski R., Kaweckie J., Stypuła K. (1994))] – autorzy zaprezentowali w nim sposób podejścia do zagadnienia prognozy wpływów dynamicznych od przejazdu metra na sąsiednią zabudowę. Obliczenia przeprowadzono na podstawie zebranych danych doświadczalnych z pomiarów w Pradze Czeskiej. W pozycjach (Ciesielski R., Stypuła K. (1994)), (Ciesielski R., Stypuła K. (1995)) autorzy przedstawili kompleksowo zagadnienie oceny wpływu drgań na konstrukcję budynku i ludzi w nim przebywających. Pomiary dotyczyły 7 budynków przy ul. Marszałkowskiej oraz 9 budynków zlokalizowanych w ciągu Alei Niepodległości w Warszawie. Dalsze prace poświęcono zagadnieniom oceny wpływu drgań na konstrukcje i ludzi w nich przebywających na podstawie

przeprowadzonych pomiarów in situ (Ciesielski R., Stypuła K. (1994)), jak też zagadnieniom ochrony przed drganiami generowanymi przejazdami pociągów metra w sąsiedztwie (Ciesielski R., Stypuła K. (1998)). Reasumując cykl prac obejmował zarówno teorię jak też badania in situ wykonane początkowo w metrze w Mińsku i Pradze. Następnie doświadczenia te przeniesiono na rodzimy grunt i kontynuowano w Warszawie na pierwszym odcinku próbnym metra, który powstał z początkiem lat dziewięćdziesiątych, a następnie na kolejnych nowo otwieranych odcinkach pierwszej linii metra w Warszawie (prace Ciesielskiego, Kaweckiego i Stypuły [por. Ciesielski R., Kaweckie J., Stypuła K. (1994)]).

Prace te trwają nieprzerwanie do dnia dzisiejszego czego przykładem mogą być liczne publikacje dotyczące współczesnych problemów na jakie natrafia wciąż rozbudowywana infrastruktura metra w Warszawie (aktualnie budowana II linia metra i plany jej rozbudowy). Należy tu wymienić przede wszystkim pracę habilitacyjną prof. Stypuły z roku 2001, która jest swoistym kompendium i próbą usystematyzowania dotychczas zebranej wiedzy w tym zakresie [Stypuła K. (2001)]. Kontynuacja prac z tego zakresu to choćby publikacje prof. Kaweckiego i prof. Stypuły [por. Kaweckie J., Stypuła K. (2007), (2008)]; oraz prof. Stypuły wraz z autorem [por. Stecz (2005), Stecz, Stypuła (2003), (2004(1);(2)), (2005), (2009(1);(2)), (2010), (2011(1);(2)), (2012)]. Badania nad wpływem drgań od komunikacji szynowej na budynki i ludzi w nich przebywających w tym również od przejazdów pociągów metra są w dalszym ciągu kontynuowane, a ich rezultaty pojawiają się na corocznym Seminarium organizowanym na Politechnice Krakowskiej pod nazwą „Wpływ hałasu i drgań wywołanych eksploatacją transportu szynowego na budynki i ludzi w budynkach - diagnostyka i zapobieganie – WIBROSZYN”.

Publikacje zagraniczne

Wśród opracowań dotyczących bezpośrednio drgań wywołanych przejazdami pociągów w tunelach metra należy wymienić prace doświadczalne i teoretyczne prof. Makovička [siedem prac Makovička (1984), Makovička (1987), Makovička, Kral (1990), Makovička (1986), Makovička (1986), Makovička (1989), Makovička (1991)]. W dwóch jego pracach [Makovička (1984), Makovička (1989)] zostały zaprezentowane wyniki pomiarów drgań podtorza i ściany tunelu na dwóch stacjach praskiego metra o różnej konstrukcji. Pierwszą z opisywanych konstrukcji wykonano metodą górniczą, drugą z kolei metodą odkrywkową. Na pierwszej ze stacji wykonano pomiary na odcinkach z torem na podkładach drewnianych i na podkładach betonowych. Badane były trzy sytuacje pomiarowe: przejazd pociągu przez stację, ruszanie pociągu i zatrzymanie pociągu. Praca swoim zakresem nie obejmowała zagadnień oddziaływania drgań na budynki w sąsiedztwie stacji.

Analizę drgań obudowy tunelu metra wywołanych przejazdami pociągów opisują w pracach Estoff i Antes [por. Estof O., Antes H. (1990)] czy też Heckl [por. Heckl M. (1987)] – autorzy zajmują się szeroko pojętą problematyką tłumienia drgań na podtorzu i w gruncie, bez poruszenia problemu wpływu drgań na konstrukcję budynku i ludzi w nim przebywających.

W kolejnej swojej pracy Makovička [por. Makovička (1987)] zajmuje się analizą odpowiedzi dynamicznej budynku usytuowanego w sąsiedztwie tunelu metra. Określono funkcję przejścia fali od źródła drgań zarejestrowanego obciążenia dynamicznego od przejazdów pociągów metra do budynku. Następnie zaimplementowano filtr dynamiczny pod fundamentem budynku i określono jego skuteczność. Podobne zagadnienie z filtrem pod fundamentem, który obniża efekty dynamiczne omówiono w pracy [Makovička (1986)]. Kolejna praca tego autora [Makovička (1991)] porównuje wpływy dynamiczne pochodzące od komunikacji podziemnej z wpływami od komunikacji naziemnej. Artykuł Makovička i Krala [Makovička, Kral (1990)] prezentuje wyniki pomiarów drgań od przejazdów metra, które mają stanowić wymuszenie kinematyczne nowo powstających budynków (hoteli). Fundamenty projektowanych konstrukcji w obu przypadkach mają przylegać bezpośrednio do ściany tunelu metra. W pracy tej autorzy zajmowali się prognozowaniem wpływów od jeszcze nie istniejącej linii metra na budynki w sąsiedztwie. Jest to praca poświęcona zagadnieniom modelowania numerycznego przyszłych wpływów dynamicznych od powstającej linii metra na istniejącą zabudowę. Zagadnienie propagacji drgań i hałasu z tunelu metra do budynków ujęto w pracach Ungara i in.

[Ungar E. i in. (1979)], a także Melkego [Melke J. (1998)], który zajmuje się zagadnieniem prognozowania w tym zakresie. W pracy [Ungar E. i in. (1979)] wykonano pomiary drgań w tunelu metra i jednocześnie w budynku bezpośrednio nad tunelem (zrealizowano również pomiar hałasu). Z uwagi na specyfikę zastosowanego rozwiązania konstrukcyjnego w tunelu (pionowe ustawienie naw tunelu jednej nad drugą) trudno jest te wyniki odnosić bezpośrednio do konstrukcji tunelu metra w Warszawie.

Praca Rückera i Saida [Rucker W., Said S. (1994)] w części doświadczalnej obejmuje wyniki badania tylko pionowych drgań gruntu i fundamentu budynku. Badania te dotyczą tylko jednego budynku i obejmują zakres przenoszenia się drgań z tunelu na budynek. Z opisu części poświęconej przeprowadzonym pomiarom, wynika, że wykonano je na gruncie przed budynkiem oraz na konstrukcji budynku i na stropach poszczególnych kondygnacji. W dalszej części autorzy omawiają szerzej zagadnienie obliczeń teoretycznych postaci drgań własnych układu tunel-budynek. We wspólnej pracy autorów chińskich Zhang, Xia, Yang [por. Zhang N. i in. (2011)], podjęta jest tematyka przenoszenia się drgań z tunelu metra na grunt przeznaczony do zabudowy na muzeum. Wymuszenie jest realizowane za pomocą młotka modalnego, którym wymuszano drgania ściany tunelu metra (brak odniesienia do rzeczywistych przejazdów pociągów metra w tunelu). Odbiór drgań na gruncie pozwala na wyznaczenie funkcji przejścia i określenie spodziewanych poziomów drgań dla projektowanego budynku i jego poszczególnych części. Określono również stopień redukcji wartości przyspieszenia drgań w układzie grunt – strop tunelu (jest 143 razy mniejsza).

W opracowaniu Muller, Fruhe, Hackenberg [por. Muller G. i in. (2011)] opisano procedurę modelowania metodą elementów skończonych układu przenoszenia drgań z tunelu metra poprzez grunt na budynek. Wyników nie zweryfikowano jednak pomiarami in situ.

Tematyką ochrony przed drganiami pochodzącymi od metra na wrażliwe urządzenia (czułe mikroskopy w laboratorium Uniwersytetu w Pekinie) zajmowali się między innymi Ma i in. [Ma M. i in. (2001)], gdzie testowany był specjalny system przekładek wibroizolacyjnych SSFST w tunelu i walidowana jego skuteczność.

Próby doświadczalnego określenia funkcji przejścia były podejmowane [por. Degrande G. i in. (2002)] w ramach międzynarodowego projektu CONVURT ale dotyczą one pomiaru drgań od wzbudzenia torowiska przy przejeździe pociągu ze znaną prędkością jak też wzbudzenia torowiska za pomocą młotka modalnego. Odpowiedź dynamiczna drgań jest rejestrowana na gruncie w różnej odległości od tunelu. W ramach projektu badania wykonywano w Paryżu i Londynie. Sam przekrój tunelu to otwarta część wychodząca ze skarpy z łatwym dostępem do jego wnętrza. Z przedstawionego opisu wynika, że badania miały charakter badań symulacyjnych, wymuszenie nie pochodziło od rzeczywistych przejazdów pociągów metra w tunelu.

W omówionych powyżej pracach z literatury polskiej i zagranicznej z reguły brak jest opisu badań i wyników, które obejmowałyby cały profil w układzie tunel-budynek ze szczególnym uwzględnieniem wpływu drgań na ludzi przebywających w budynku. Dostępne autorowi opisy przeprowadzonych badań odnoszą się do pomiarów doraźnych, prowadzonych na potrzeby realizacji konkretnych publikacji.

Mało jest publikacji i opracowań z zakresu wpływu drgań na konstrukcję i ludzi w budynkach, które byłyby wynikiem opracowania danych doświadczalnych, a w szczególności z badań dotyczących dłuższego okresu czasu.

1.3 Cel i zakres pracy

Podjęcie tego tematu stanowi rozwinięcie badań, które nie były możliwe do czasu instalacji systemu ciągłego monitorowania drgań w Metrze Warszawskim warto tu zacytować fragment rozdziału pt. „7.2. Uwagi końcowe – kierunki dalszych badań” z pracy [por. Stypuła K. (2001)]: *„Fakt stosunkowo małej liczby wyników badań cytowanych w literaturze przedmiotu można tłumaczyć tym, że prowadzenie badań doświadczalnych in situ wymaga z reguły pokonania wielu trudności, poczynając od aparaturowych (skompletowanie aparatury, kalibracja, naprawy etc.), poprzez logistyczne (transport aparatury, sprzętu i ludzi, noclegi, łączność itp.), administracyjne (np. zezwolenia na wejście do obiektów, dostęp do dokumentacji) aż po finansowe. Dodatkowymi utrudnieniami w badaniach wpływów dynamicznych metra są: brak bezpośredniej łączności [...] pomiędzy tunelem metra a obiektami na powierzchni (obudowa metra stanowi ekran dla fal radiowych), praca w reżimie rozkładu jazdy pociągów metra, możliwość instalowania aparatury w tunelu jedynie podczas krótkiej dwugodzinnej przerwy w środku nocy (w godz. od 1:00 do 3:00).”*

W innej części cytowanej pozycji [por. Stypuła K. (2001)] w rozdziale „3.4. Wpływ stanu torowiska i taboru na poziom drgań budynku” został sformułowany postulat: *„Zgodnie z tym co napisano w punktach [...] niniejszego rozdziału, zarówno rodzaj jak i stan torowiska, a w szczególności stan szyn, jak i stan taboru (przede wszystkim niewyważenie kół) mają wpływ na poziom wzbudzanych drgań. Co do tego panuje w literaturze przedmiotu zgodność, znaleźć też można wyniki analiz teoretycznych w tym zakresie [...]. Brakuje natomiast prób doświadczalnego oszacowania wielkości tego wpływu”*.

Na podstawie dostępnych danych z pomiarów doraźnych i danych uzyskanych z systemu ciągłego monitorowania drgań w niniejszej pracy przedstawiono wpływ przejazdów pociągów metra na poziom drgań na konstrukcję budynków i na ludzi w nich przebywających. Dane dotyczące stanu kół poszczególnych składów pociągów, które udało się pozyskać, nie były skorelowane z danymi ze stacji monitoringu Metra Warszawskiego (w czasie eksploatacji występowały przerwy w rejestracji sygnałów przyspieszenia drgań).

Nie można się zatem było odnieść do zmian stanu kół (owalizacja) w sposób bezpośredni ale na podstawie zmian obserwowanych w monitorowanych obiektach (tunel i szczególnie budynek) w czasie.

W pracy przyjęto następującą tezę:

Zmienne w czasie warunki eksploatacyjne metra mają istotny wpływ na poziom drgań emitowanych do środowiska.

Przede wszystkim należało uwzględnić zmianę stanu kół poszczególnych składów pociągów w czasie, gdyż na skutek eksploatacji ulegają one stopniowemu zużyciu, powodując wzrost poziomu rejestrowanych drgań na budynki w sąsiedztwie i ludzi w nich przebywających.

Takie sformułowanie tezy pracy wymagało:

- Przeanalizowania dużej ilości danych zarejestrowanych przez system ciągłego monitorowania drgań Metra Warszawskiego
- Wykonania dodatkowych pomiarów dynamicznych w budynku w sąsiedztwie linii metra w Warszawie i wykonania analiz
- Ujęcia w sposób ilościowy analizowanych danych pomiarowych: pokazania zmian wartości przyspieszenia drgań krótkookresowych jak też w dłuższym okresie czasu.

Zakres pracy

Rozprawa zawiera sześć rozdziałów. W rozdziale 1 omówiono genezę, aktualny stan wiedzy, a także cel i zakres pracy.

W rozdziale 2 omówiono kryteria oceny wpływu drgań na środowisko w kontekście ich wpływu na konstrukcję budynków oraz na ludzi w nich przebywających w świetle aktualnych norm prawnych.

Rozdział 3 stanowi opis zastosowanej metodyki pomiarów i analiz, w którym bardziej szczegółowo przedstawiono opis badanych obiektów, a także przedstawiono charakterystykę i metodykę przeprowadzonych pomiarów drgań. Opisano również sprzęt wykorzystywany do przeprowadzenia pomiarów jak też w podrozdziale 3.5 opisano sposób kalibracji czujnika usytuowanego na stropie piwnicy, dla uzyskania wyników odpowiadających drganiom podłogi parteru.

Rozdział 4 zawiera opis wyników pomiarów i przeprowadzonych analiz. W podrozdziale 4.1 zaprezentowano wyniki w kontekście wpływu drgań na konstrukcję budynku ze szczególnym uwzględnieniem krótkookresowego (dobowego) rozkładu drgań. W dalszej części rozdziału 4 przedstawiono wyniki pomiarów i analiz z pomiarów doraźnych dotyczące zagadnienia przenoszenia drgań w układzie tunel-budynek. Ostatnia część niniejszego rozdziału zawiera wyniki analiz spektrum odpowiedzi dla kilku wybranych składów pociągów przy zmiennym parametrze tłumienia.

Podrozdział 4.2 przedstawia wyniki pomiarów i analiz w aspekcie wpływu drgań na ludzi w budynkach. Składa się on z dwóch części. W pierwszej z nich przeanalizowano krótkookresowy (dobowy) rozkład drgań. W drugiej omówiono szczegółowo długookresowy (wielotygodniowy) rozkład drgań wraz ze wskazaniem maksymalnych najbardziej niekorzystnych wartości jakie wystąpiły w czasie udokumentowanej eksploatacji systemu ciągłego monitorowania drgań w Metrze Warszawskim.

Zakończenie pracy stanowi rozdział 5, w którym przedstawiono wnioski sformułowane po przeprowadzeniu analiz, potwierdzono prawdziwość tezy oraz podano dalsze kierunki badań.

2.0. Kryteria oceny wpływu drgań na środowisko

W niniejszym rozdziale przedstawiono normowe kryteria oceny wpływu drgań na konstrukcję budynku i ludzi w nim przebywających zgodnie z Polskimi Normami (por. PN-85/B-02170 i PN-88/B-02171). Ocena wpływu drgań na budynek ma na celu określenie poziomu szkodliwości drgań dla konstrukcji. Nie mniej istotna jest ocena wpływu drgań na ludzi w budynku. Nie dotyczy ona szkodliwości ale uciążliwości (naruszenia komfortu) drgań odbieranych przez ludzi w sposób bierny. Próg odczuwalności drgań przez ludzi w budynkach jest niższy od progu odczuwalności drgań przez konstrukcję, toteż konieczność wykonania takiej oceny jest zasadna również w przypadku budynków w których drgania są określone jako nieodczuwalne dla ich konstrukcji.

2.1. Ujęcie normowe wpływu drgań na konstrukcję budynków

W niniejszej pracy wykorzystano przybliżony sposób sprawdzenia wpływów dynamicznych na konstrukcję budynków podany w normie PN-85/B-02170, a polegający na zastosowaniu tzw. Skal Wpływów Dynamicznych (w skrócie SWD). Jest to najprostszy sposób oceny stopnia szkodliwości wpływu drgań na budynki spełniające określone warunki. Sposób ten polega na porównaniu poziomu zmierzonych drgań budynku (ściślej wartości szczytowych przemieszczenia lub przyspieszenia określonych w pasmach 1/3 oktawowych, zwanych też tercjowymi) z granicami stref szkodliwości zaznaczonymi na skalach SWD.

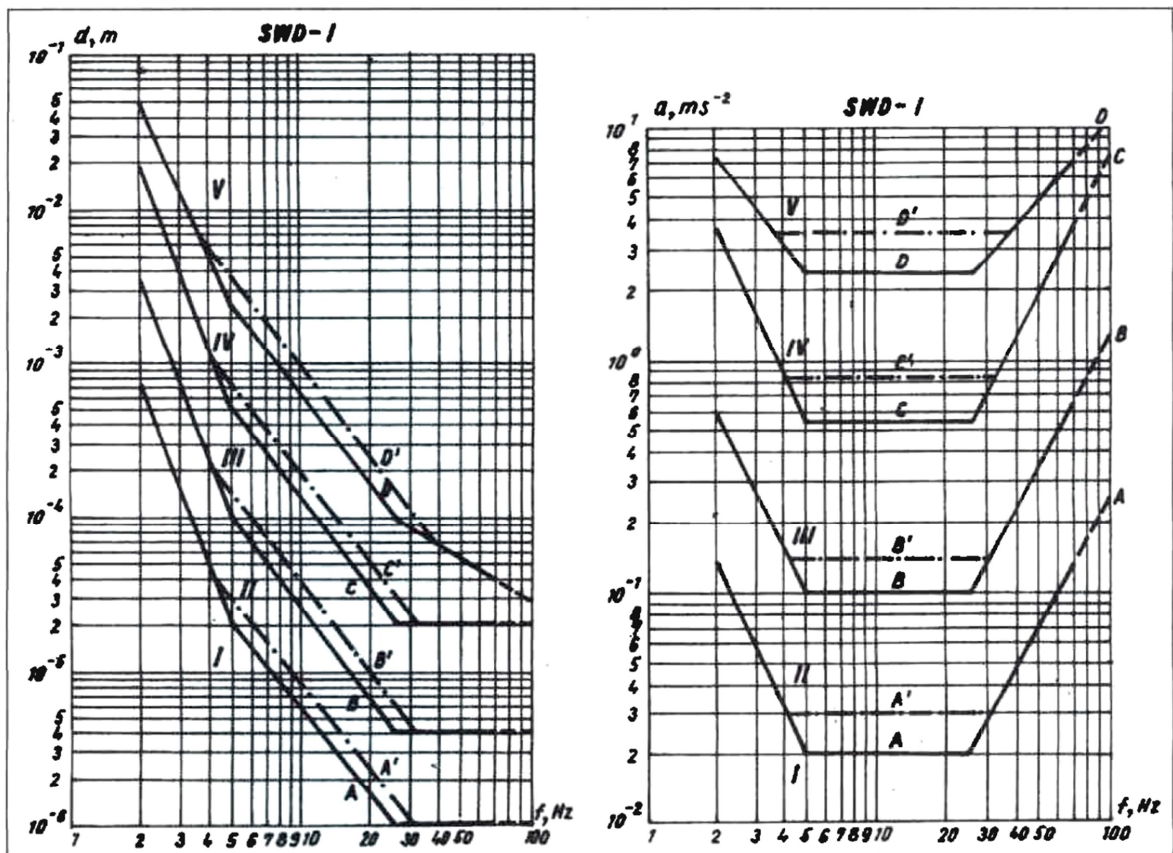
Pierwsze metody oceny wpływów dynamicznych za pomocą skal powstały w XIX wieku [por. Ciesielski R. i in. (1988)]. Pomimo wprowadzania przez lata wielu ulepszeń i stałej weryfikacji praktycznej, nie można ich jednak uznać za przydatne do oceny skutków wpływów dynamicznych innych niż wpływy sejsmiczne. Trzy z nich są stosunkowo najpowszechniejsze: skala Mercalli-Cancani-Sieberg (skala MCS), popularna w Europie i Azji, skala Gutenberga-Richtera, wykorzystywana w Ameryce i Australii oraz skala Geofian stosowana na terenach byłego Związku Radzieckiego. Z czasem, kiedy zaczęto zwracać uwagę na inne niż trzęsienia ziemi wpływy dynamiczne, opracowano kolejne skale. Jedną z nich jest 12-stopniowa skala Zellera, przeznaczona do oceny skutków wstrząsu lub też 6-stopniowa tzw. „skala wibrarów”. Obie skale przytaczają tylko ogólną interpretację skutków drgań budynków [por. Ciesielski R. (1973)] i są przykładami wybranymi spośród wielu skal, które dziś mają znaczenie raczej historyczne, dając zgrubne oszacowanie efektów oddziaływań dynamicznych na budynki. Podstawową słabością tych skal było pominięcie w rozważaniu wpływów drgań i wstrząsów na budynki: charakterystyki samego budynku, typu konstrukcji, materiału czy stanu zachowania oraz rodzaju podłoża czyli cech, które decydują o wytrzymałości konstrukcji. Skutkiem takiego podejścia były olbrzymie różnice w ocenie skutków drgań. W roku 1961 po raz pierwszy podano propozycje do nowych polskich skal wpływów dynamicznych zwanych w skrócie SWD. W roku 1985 wdrożono do stosowania Polską Normę PN-85/B-02170, która była efektem wieloletniej weryfikacji doświadczalnej założeń przedstawionych w pracy [Ciesielski (1961)].

Podstawowym sposobem oceny opisanym w tej normie jest tzw. ocena pełna, polegająca na wykonaniu obliczeń dynamicznych (analizy dynamicznej) konstrukcji budynku celem określenia sił bezwładności a następnie na obciążeniu konstrukcji tymi siłami w odpowiednich kombinacjach i sprawdzeniu stanów granicznych nośności i użytkowania zgodnie z wymaganiami odpowiednich norm z zakresu projektowania konstrukcji. W normie **PN-85/B-02170**, dopuszczono w odniesieniu do pewnej grupy obiektów (konstrukcje murowe i wieloblokowe o wysokości do 5 kondygnacji) możliwość stosowania uproszczonej procedury oceny wpływów dynamicznych za pomocą

wspomnianych wyżej Skal Wpływów Dynamicznych (w skrócie SWD). Jest to tzw. przybliżona metoda oceny wpływów dynamicznych na budynki. Szczegółowe warunki jej stosowania zostały szczegółowo opisane w normie.

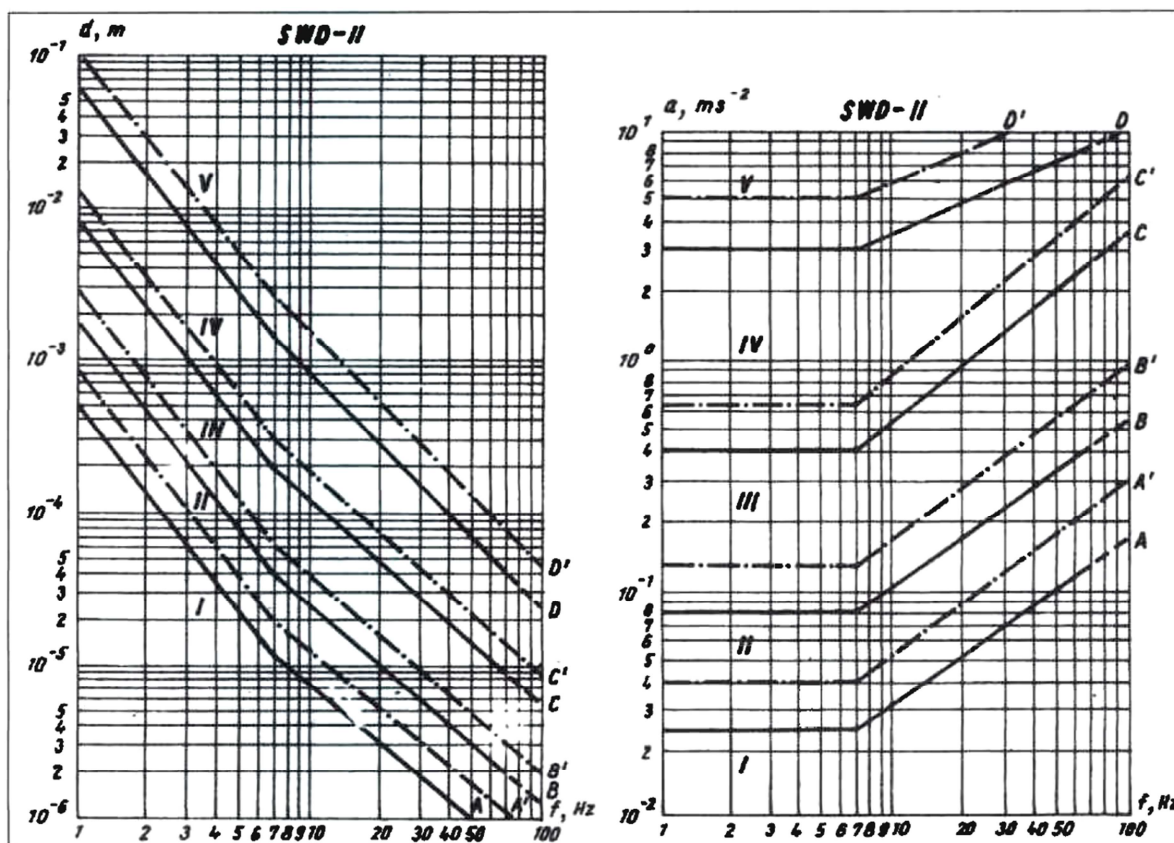
Skale te dotyczą oceny dwóch najczęściej spotykanych klas budynków, tj. budynków niskich i średnio wysokich do pięciu kondygnacji naziemnych, o konstrukcji murowej (elementy do ręcznego układania jak cegła, pustaki itp.) oraz wielkoblokowych:

- Skala SWD-I odnosi się do budynków o kształcie zwartym o małych wymiarach zewnętrznych rzutu poziomego (do 15m), jedno lub dwukondygnacyjnych i spełniających warunek, że wysokość budynku nie może przekraczać żadnego z wymiarów rzutu budynku.



Rys. 2.1. Skala SWD-I [por. PN-85/B-02170 (1985)]

- Skala SWD-II odnosi się do budynków o wysokości do pięciu kondygnacji naziemnych i o wysokości, która spełnia warunek, że nie może być większa niż podwójna największa szerokość budynku w rzucie. Dodatkowo może być stosowana do budynków niskich (do maksymalnie dwóch kondygnacji), które nie spełniają warunków do stosowania skali SWD-I.



Rys. 2.2. Skala SWD-II [por. PN-85/B-02170 (1985)]

W normie [PN-85/B-02170 (1985)] przyjęto następujący podział na strefy szkodliwości oznaczone (rys. 2.1 i 2.2) cyframi rzymskimi od I do V:

- **Strefa I** – drgania nieodczuwalne przez budynek.
Granica A – dolna strefa odczuwalności drgań przez budynek i dolna granica uwzględniania wpływów dynamicznych; przy drganiach poniżej tej granicy można nie uwzględniać wpływów dynamicznych.
- **Strefa II** – drgania odczuwalne przez budynek ale nieszkodliwe dla konstrukcji; następuje tylko przyspieszone zużycie budynku i pierwsze rysy w wyprawach, tynkach itp.
Granica B – granica sztywności budynku, dolna granica powstawania zarysowań i spękań w elementach konstrukcyjnych.
- **Strefa III** – drgania szkodliwe dla budynku, powodują lokalne spękania i zarysowania, przez co osłabiają konstrukcję budynku i zmniejszają jego nośność oraz odporność na dalsze wpływy dynamiczne; może nastąpić odpadanie wypraw i tynków.
Granica C – granica wytrzymałości pojedynczych elementów budynku, dolna granica ciężkich szkód budowlanych.
- **Strefa IV** – drgania o dużej szkodliwości dla budynku i stanowiące zagrożenie bezpieczeństwa ludzi; powstają liczne spękania, lokalne zniszczenia murów i innych pojedynczych elementów budynku; istnieje możliwość spadania przedmiotów zawieszonych, odpadanie płyt wypraw sufitów, wysunięcie się belek stropowych z łożysk itp.; wymagane możliwie szybkie

usunięcie źródła drgań lub zmniejszenie jego wpływów.

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

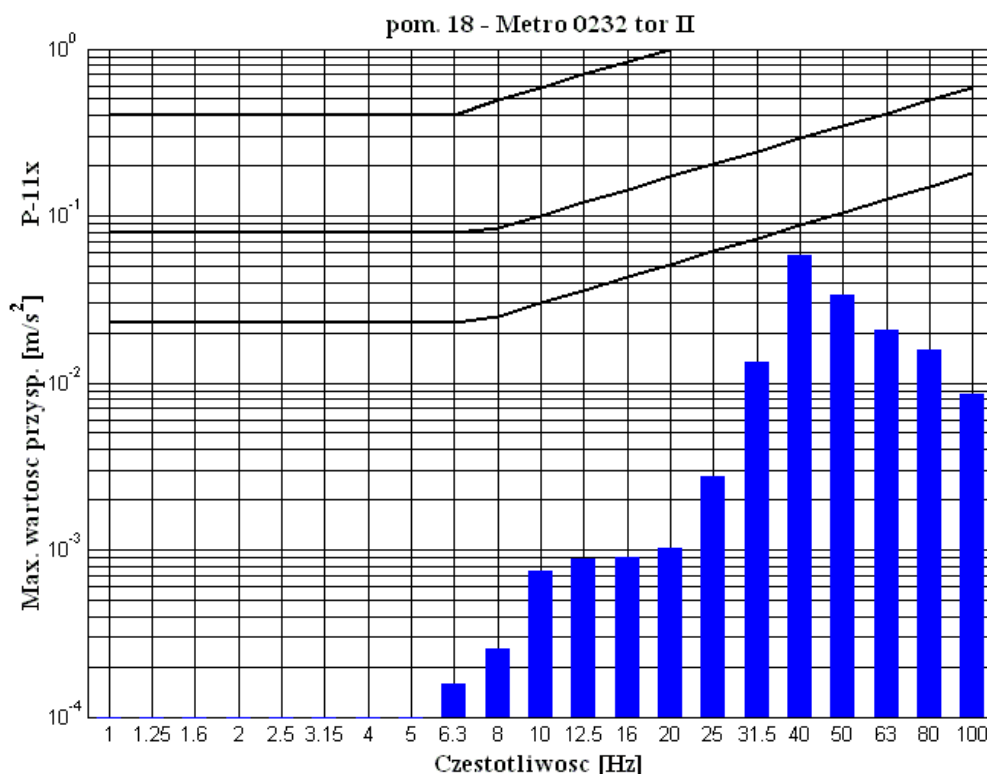
- **Strefa V** – drgania powodują awarię budynku przez walenie się murów, spadanie stropów itp.; pełne zagrożenie bezpieczeństwa życia ludzkiego; w przypadku groźby powstania drgań tego typu budynek nie może być użytkowany.

Podane na rysunkach 2.1 i 2.2 granice stref obejmują dwa warianty (oznaczone liniami ciągłymi i przerywanymi) według oceny stanu budynku, typu podłoża i rodzaju drgań. Zaliczenie do danego wariantu następuje według przeważającej liczby odpowiednich cech, które przedstawiono poniżej w tabeli:

Tab. 2.1. Cechy umożliwiające zastosowanie granicy w postaci linii ciągłej lub przerywanej - podniesionej (w przypadku spełnienia wszystkich cech z kolumny 3) w skalach SWD

Ocena według	Cechy umożliwiające zastosowanie granicy	
	niższej (linia ciągła na rys. 2 + 5)	wyższej (linia przerywana na rys. 2 ą 5)
1	2	3
Stan budynku	budynki stare, z uszkodzeniami, budynki przerabiane lub wzmacniane	budynki nieuszkodzone, bez przeróbek konstrukcyjnych
Materiałów i konstrukcji budynku	budynki z elementów murowych żużłobetonowych lub z kamienia o niestarannym wykonaniu, brak fundamentów, brak wieńców, sklepione stropy, duże otwory w ścianach lub otwory nieregularne	ściany z cegły pełnej starannie wykonane, fundamenty żelbetowe lub betonowe, stropy masywne wiążące ściany z wieńcem stropowym
Typu podłoża i sposobu posadowienia	podłoże o małej sztywności (np. piaski pylaste, luźne) posadowienie nieciągłe (różne wysokości) albo pośrednie	podłoże sztywne (np. iły i gliny twardoplastyczne), posadowienie płaskie
Rodzaju drgań	drgania długotrwałe albo występujące stale	drgania krótkotrwałe

Zarejestrowane w trakcie pomiarów przebiegi czasowe drgań poziomych (przemieszczeń lub przyspieszeń drgań) w punktach pomiarowych umieszczonych od strony źródła drgań w sztywnym węzle konstrukcji na fundamencie budynku lub na ścianie nośnej w poziomie otaczającego terenu, poddawane są analizie tercjowej, a następnie wynik obliczeń jest prezentowany w postaci maksymalnych wartości przyspieszenia (lub przemieszczenia) drgań w poszczególnych pasmach częstotliwości – tercjowych w zakresie od 0,5 Hz do 100Hz. Następnie porównuje się wyniki w odniesieniu do linii rozgraniczających strefy w skali SWD (SWD-I lub SWD-II w zależności od spełnienia wymagań) co w efekcie umożliwia bezpośrednią ocenę wpływu drgań na budynek i podanie spodziewanych skutków działań dynamicznych na ten budynek.



Rys. 2.3. Przykładowa analiza wpływu na konstrukcję budynku drgań wywołanych przejazdem pociągu metra przy zastosowaniu skali SWD-II do oceny tego wpływu

W przypadku, kiedy mamy do czynienia z budynkami, których nie obejmuje zakres stosowania skal SWD (które nie występują w zbiorze obiektów odpowiadających zastosowaniu skal SWD) jak np. budynki powyżej 5 kondygnacji lub budynki o innej konstrukcji nośnej niż murowa lub wielkoblokowa - należy wykonać obliczeniowy model budynku i na podstawie pomiarów wymuszenia kinematycznego tj. drgań poziomych i pionowych budynku zarejestrowanych w poziomie fundamentu lub w sztywnym węźle konstrukcji na ścianie nośnej w poziomie otaczającego terenu, należy obliczyć maksymalne naprężenia zastępcze według hipotezy wyężeniowej Hubera-Misesa-Hencky'ego [por. Piechnik (1978)] w przekrojach elementów konstrukcji na każdej kondygnacji i w następnej kolejności porównać je do wytrzymałości obliczeniowej analizowanego elementu.

Wskaźnik WODB – stanowi miarę odczuwalności drgań przez konstrukcję budynków; jest to stosunek maksymalnej wartości przyspieszenia drgań uzyskanego z analizy tercjowej do wartości granicy A (dla kierunku poziomego x i y) w tym samym paśmie częstotliwości.

Ze wskaźnika WODB skorzystano w rozdziale 4.1.

2.2. Ujęcie normowe wpływu drgań na ludzi w budynkach

Zgodnie z [por. Kawecki, Stypuła (2013)] można wyróżnić trzy podstawowe parametry stosowane w ocenie wpływu drgań na ludzi w budynkach. Są to:

1. Widmo (struktura częstotliwościowa) wartości skutecznej przyspieszenia drgań lub prędkości drgań w pasmach 1/3 oktawowych.
2. Wartość skuteczna przyspieszenia lub prędkości drgań skorygowana w całym paśmie częstotliwości od 1 do 80 Hz.
3. Dawka wibracji.

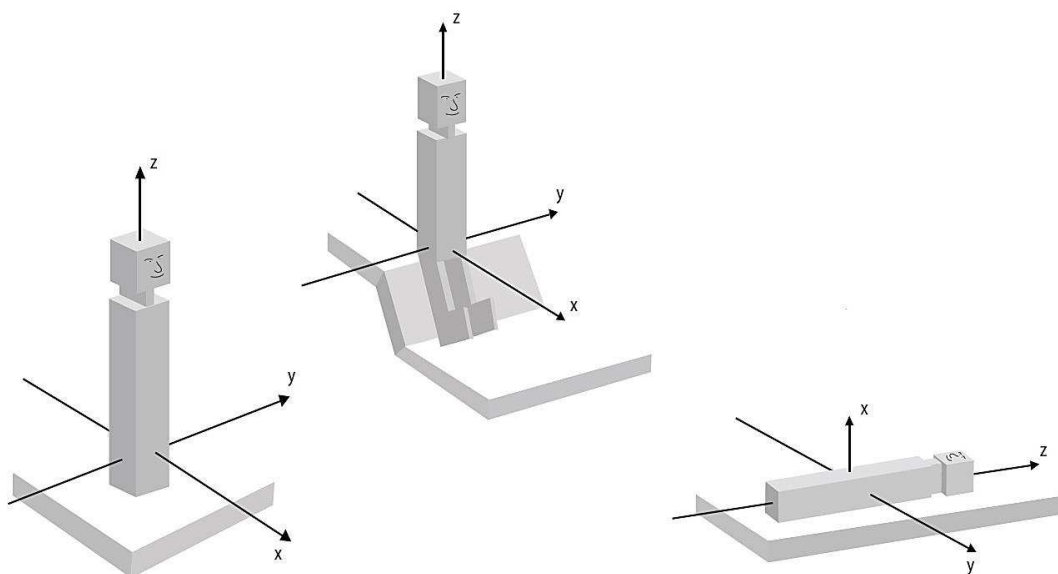
Dwa pierwsze z nich uwzględniono w normie PN-88/B-02171.

W niniejszej pracy jako kryterium oceny wpływu drgań na ludzi przebywających w budynku, wykorzystano pierwszy parametr, czyli widmo wartości skutecznej przyspieszenia drgań w pasmach 1/3 oktawowych.

Każdy z zarejestrowanych przebiegów drgań pionowych stropu jest automatycznie poddawany analizie wpływu tych drgań na ludzi wg zasad określonych w normie **PN-88/B-02171** oraz opisanych w (por. Ciesielski (1988) i Ciesielski, Stypuła (2003)). Ponadto w każdym przebiegu czasowym drgań wyznaczana jest maksymalna wartość szczytowa przyspieszeń (MAX).

Istotny jest kierunek odbioru drgań przez człowieka w zależności od zajmowanej pozycji ciała [por. Kawecki, Stypuła (2013)]. Rozpatrywane są dwa stany odbioru drgań przez człowieka:

- w pozycji siedzącej i stojącej – odbiór drgań następuje przez powierzchnię stóp lub powierzchnię siedzenia w taki sposób, że oś Z (por. rys. 2.4) przebiegająca wzdłuż kręgosłupa (oś linii: stopy-głowa jest osią pionową), a osie XY przyjmują kierunki poziome.
- w pozycji leżącej - człowiek odbiera drgania całą powierzchnią ciała w taki sposób, że oś Z przyjmuje kierunek poziomy, a jedna z osi X i Y, wyznaczonych kierunkami: plecy-klatka piersiowa (kierunek X) oraz bok-bok (kierunek Y) jest równoległa do pionowej osi konstrukcji budynku.



Rys. 2.4. Kierunki odbioru drgań przez człowieka w ortogonalnym układzie odniesienia. Źródło: BS 6472-1992 oraz Assessing Vibration (2006)

W opisywanych badaniach wyznacza się wartości skuteczne (RMS) przyspieszenia drgań w pasmach 1/3 oktaowych (tercjowych). Wartość skuteczna przyspieszenia drgań RMS (ang. Root Mean Square) jest obliczana ze wzoru:

$$a_{RMS} = \left[\frac{1}{T_a} \int_{T_a} [a(t)]^2 dt \right]^{0,5} \quad (2.1)$$

Gdzie:

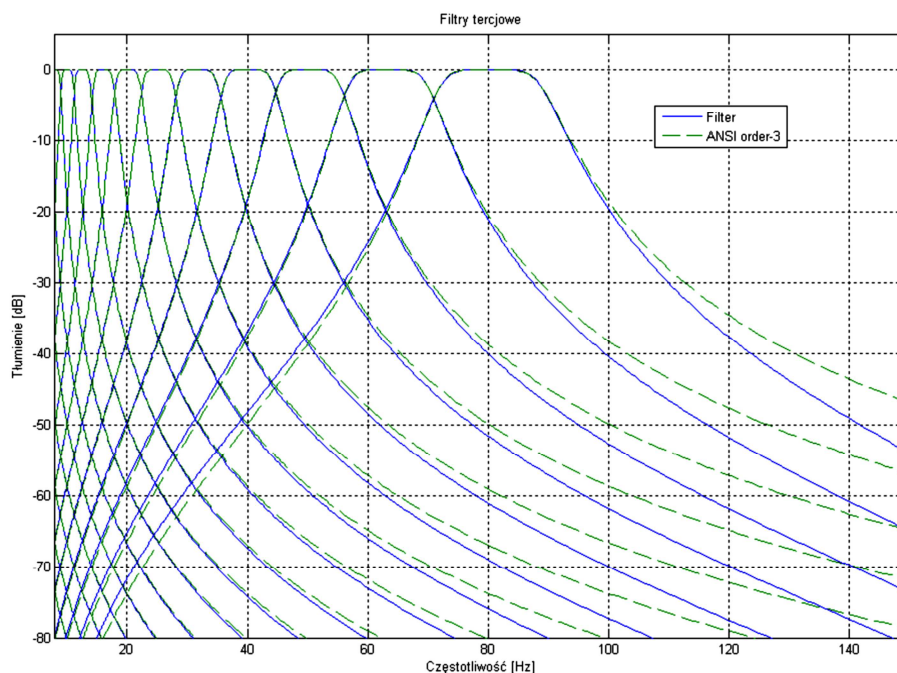
$a(t)$ – przyspieszenie drgań w funkcji czasu,

T_a – czas uśredniania.

Zgodnie z normą PN-88/B-02171 za czas uśredniania przyjmuje się czas trwania drgań, definiowany (w normach PN-85/B-02170 i PN-88/B-02171) jako czas, w którym wartości ocenianego parametru ruchu są większe niż 0,2 wartości maksymalnej.

Po wyznaczeniu czasu trwania drgań w wibrogramie zarejestrowanym podczas pomiarów i otrzymaniu za pomocą filtrów tercjowych (rys. 2.5) wibrogramów odpowiadających poszczególnym pasmom częstotliwości w pasmach 1/3 – oktaowych (analiza tercjowa) w zakresie częstotliwości od 1 Hz do 80 Hz, określana jest w każdym paśmie 1/3 oktaowym wartość RMS parametru charakteryzującego drgania (przyspieszenia lub prędkości drgań) przypisana częstotliwości środkowej danego pasma 1/3 oktaowego.

Zasadą, w tej metodzie jest iż, uzyskane z analizy w pasmach tercjowych wartości RMS są porównywane z progami zapewnienia komfortu, które są proporcjonalne do progu odczuwalności drgań przez ludzi.



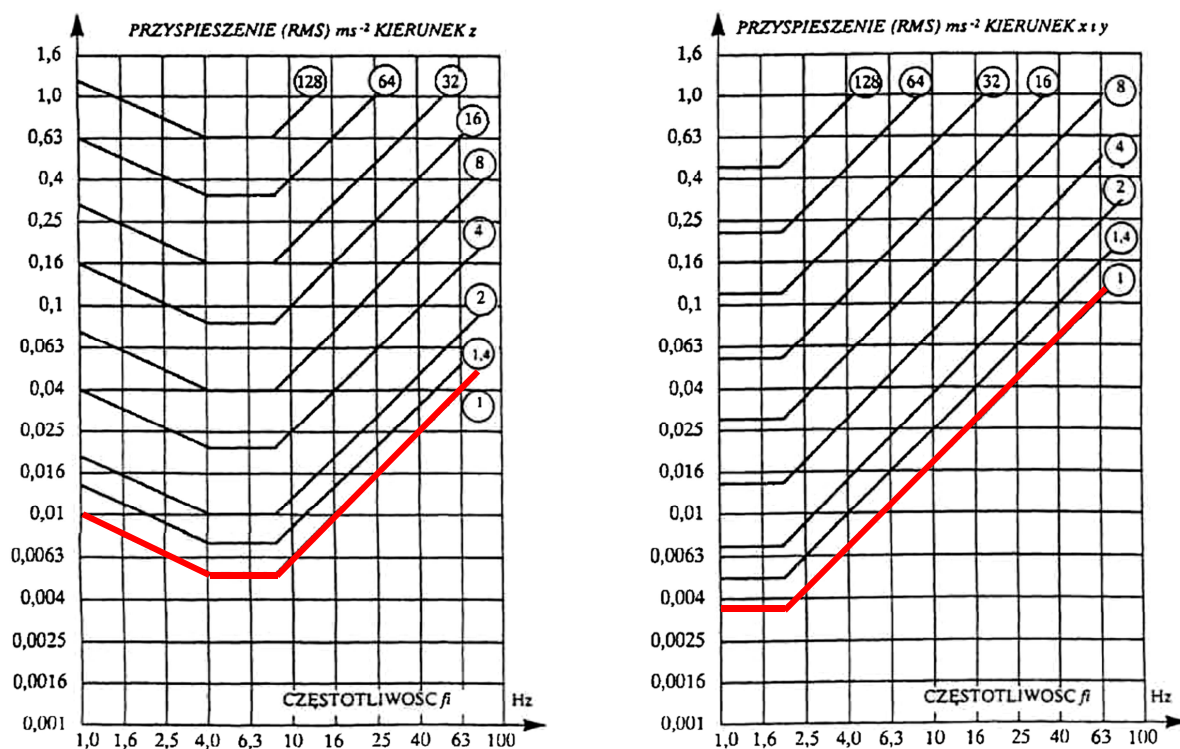
Rys. 2.5. Charakterystyki filtrów dla zdefiniowanych w normie częstotliwości środkowych pasma w analizie 1/3 oktaowej

Tab. 2.2. Wartości RMS przyspieszenia drgań odpowiadające progowi odczuwalności drgań przez człowieka przy odbiorze drgań pionowych i poziomych (por. [PN-88/B-02171 (1988)])

Częstotliwość środkowa pasma [Hz]	Wartość RMS przyspieszenia [m/s ²] odpowiadająca pasmu częstotliwości przy odbiorze drgań	
	w kierunku Z	w kierunkach XY
1,0	0,01000	0,00357
1,25	0,00890	0,00357
1,6	0,00791	0,00357
2,0	0,00707	0,00357
2,5	0,00632	0,00446
3,16	0,00570	0,00570
4,0	0,00500	0,00714
5,0	0,00500	0,00893
6,3	0,00500	0,01140
8,0	0,00500	0,01430
10,0	0,00625	0,01790
12,5	0,00781	0,02250
16,0	0,01000	0,02860
20,0	0,01250	0,03570
25,0	0,01560	0,04460
31,6	0,01973	0,05639
40,0	0,02500	0,07140
50,0	0,03130	0,08930
63,0	0,03940	0,11300
80,0	0,05000	0,14300

Próg odczuwalności drgań przez ludzi jest podstawowym poziomem odniesienia w ocenie wpływu drgań na ludzi w budynkach [por. Kawecki, Stypuła (2013)]. Jeśli drgania w miejscu ich odbioru przez człowieka są scharakteryzowane wartościami mniejszymi od odpowiadających progowi odczuwalności drgań, to można je uznać za nieodczuwalne przez człowieka.

Przy wykorzystaniu metody, w której jako parametr oceny, jest stosowane widmo wartości skutecznej, próg odczuwalności drgań przedstawia się za pomocą linii podanych w układzie: częstotliwość środkowa pasma tercjowego – wartość skuteczna przyspieszenia (norma dopuszcza też stosowanie parametru wartości skutecznej prędkości drgań).



Rys. 2.6. Progi odczuwalności drgań przez człowieka ① (na rysunku kolorem czerwonym) dla kierunku pionowego „Z” i kierunków poziomych „XY” oraz granice komfortu przy ocenie wpływu drgań na ludzi za pomocą wartości skutecznej przyspieszenia drgań [por. PN-88/B-02171(1988)]

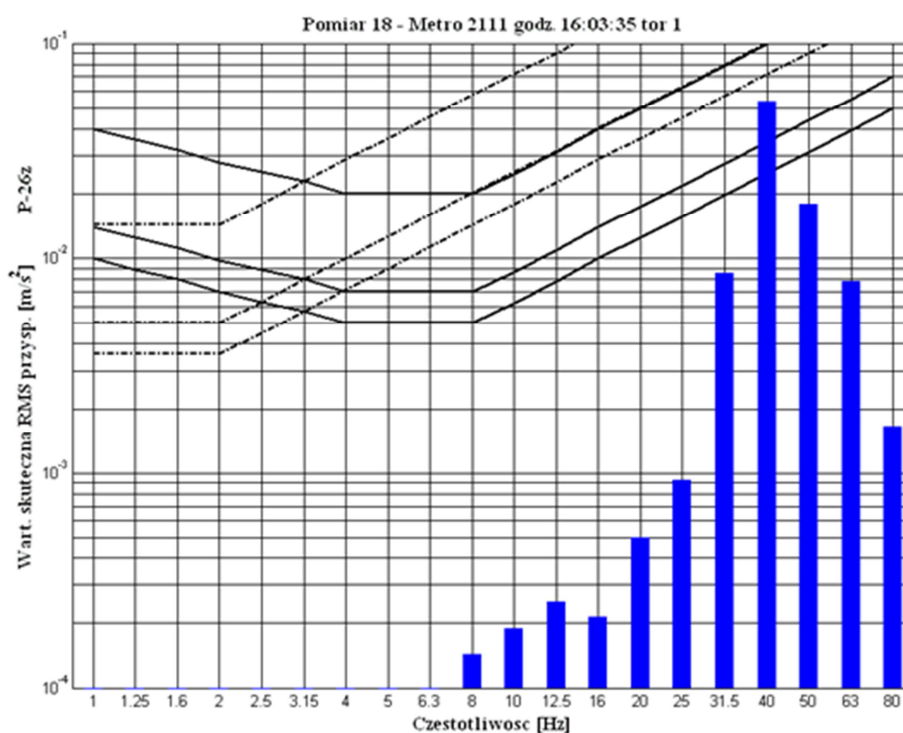
Linie oznaczone liczbami (współczynnik „n” według PN-88/B-02171(1988)) od 1.4 do 128 odpowiadają poziomom drgań tyle razy większym w stosunku do progu odczuwalności drgań przez ludzi ile wynosi liczba podana przy linii. Linie te odpowiadają granicom komfortu należnym ludziom przebywającym w danym pomieszczeniu. Granice te określa wartość współczynnika n, przyjmowana z tabeli 2.3 w zależności od:

- przeznaczenia pomieszczenia,
- pory występowania drgań,
- charakteru drgań,
- powtarzalności drgań.

Tab. 2.3. Wartość współczynnika „n” według PN-88/B-02171(1988)

Przeznaczenie pomieszczenia	Pora występowania drgań	Wartość współczynnika przy występowaniu drgań	
		ustalonych (ciągłych albo przerywanych) o krotności większej od 10 w ciągu doby	sporadycznych
Szpital (sale operacyjne), precyzyjne laboratoria	Dzień Noc	1	1
Szpitale (sale chorych)	Dzień	2	8
	Noc	1	4
Mieszkania	Dzień	4	32
	Noc	1,4	4
Biura, szkoły	Dzień Noc	4	64
	Dzień Noc	8	128

W końcowym etapie analizy drgań w pasmach tercjowych, wyniki analiz w postaci prążków o częstotliwości środkowej pasma (por. tab. 2.1.) porównywane są z normowym progrem odczuwalności przez ludzi drgań w mierzonym kierunku.



Rys. 2.7. Przykładowa analiza wpływu drgań na ludzi w budynku

Na rysunku 2.7 przedstawiono przykładowe wyniki analizy wpływu na ludzi drgań pionowych stropu budynku wywołanych przejazdem pociągu metra w sąsiednim tunelu. Widoczne jest przekroczenie progu odczuwalności przez ludzi drgań pionowych przy częstotliwości środkowej pasma 40 Hz.

W niektórych sytuacjach wykorzystywanie analiz tercjowych może być kłopotliwe, szczególnie w sytuacjach, kiedy konieczne staje się porównywanie wyników pomiarów dla wielu źródeł drgań albo np. wielu budynków usytuowanych wzdłuż tras komunikacyjnych (por. Kawecki, Stypuła (2013)). W takich sytuacjach pomocnym może się okazać wykorzystanie wskaźnika odczuwalności drgań przez ludzi **WODL** (por. Kawecki, Stypuła (2013)).

Wskaźnik WODL – jest miarą odczuwalności drgań przez ludzi, jest to stosunek maksymalnej wartości RMS uzyskanej z analizy (RMS max) do wartości progu odczuwalności drgań (niezależnie od kierunku działania) w tym samym paśmie częstotliwości. Wartość wskaźnika WODL podaje się wraz z informacją o częstotliwości środkowej pasma 1/3 oktawowego, w którym wyznacza się WODL [por. Kawecki, Stypuła (2013)].

Użyteczność takiego współczynnika polega na uniezależnieniu ostatecznego wyniku analizy od pasma częstotliwości, ponieważ WODL wskazuje bezpośrednio ile razy został przekroczony próg odczuwalności drgań przez ludzi [por. Kawecki, Stypuła (2013), por. Kawecki, Stecz, Stypuła (2011)].

Poniżej, w tabeli 2.4, podano numery poszczególnych pasm tercjowych, odpowiadające im częstotliwości środkowe pasma w Hz oraz zakresy częstotliwości poszczególnych tercji.

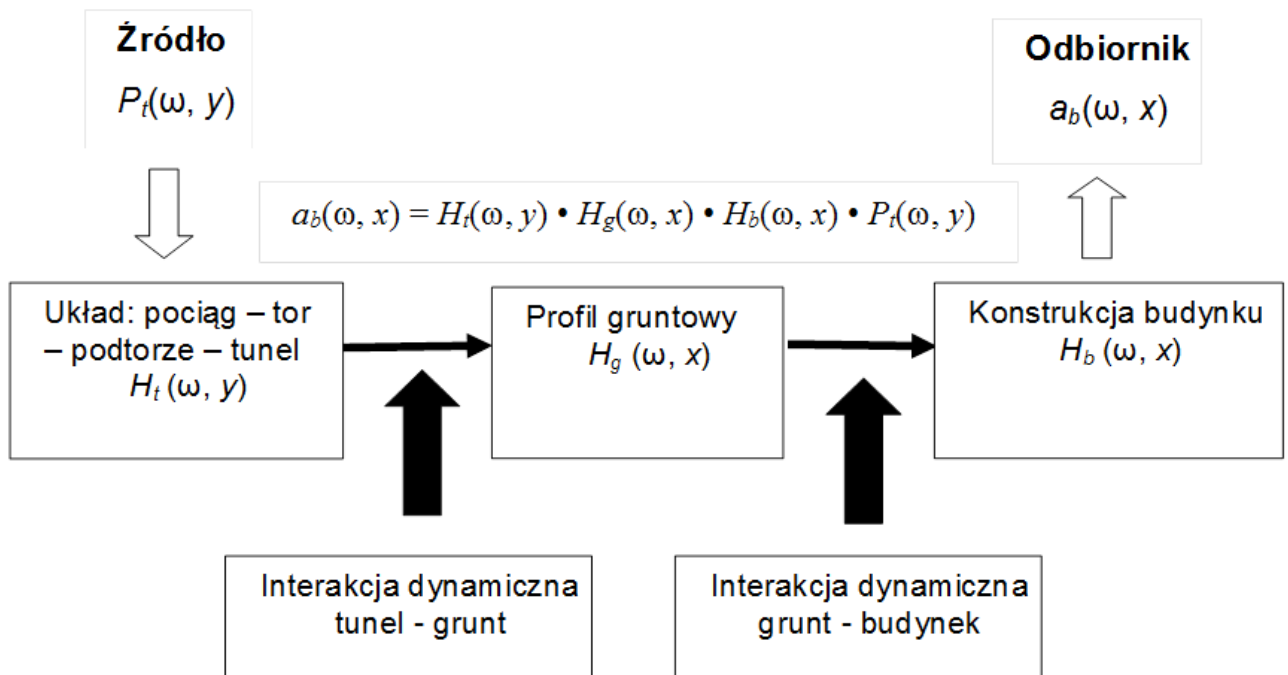
Tab. 2.4. Numery tercji, odpowiadająca im częstotliwość środkowa pasma oraz zakresy poszczególnych pasm tercjowych

Lp.	Częstotliwość środkowa pasma [Hz]	Zakres tercji [Hz]	Lp.	Częstotliwość środkowa pasma [Hz]	Zakres tercji [Hz]
1	1	0,89 – 1,12	11	10	8,91 – 11,2
2	1,25	1,12 – 1,41	12	12,5	11,2 – 14,1
3	1,6	1,41 – 1,78	13	16	14,1 – 17,8
4	2	1,78 – 2,24	14	20	17,8 – 22,4
5	2,5	2,24 – 2,82	15	25	22,4 – 28,2
6	3,16	2,82 – 3,55	16	31,6	28,2 – 35,5
7	4	3,55 – 4,47	17	40	35,5 – 44,7
8	5	4,47 – 5,62	18	50	44,7 – 56,2
9	6,3	5,62 – 7,08	19	63	56,2 – 70,8
10	8	7,08 – 8,91	20	80	70,8 – 89,1

3. METODYKA POMIARÓW I ANALIZ

3.1. Opis elementów układu źródło drgań-ośrodek propagacji-odbiornik drgań

W ujęciu systemowym ujęcie propagacji drgań od ich źródła (wymuszenie kinematyczne) do odbiornika można przedstawić w sposób podany na rys. 3.1.



Rys. 3.1. Główne składniki procesu przenoszenia się drgań ze źródła do odbiornika. Źródło: Stypuła K. (2001) *Drgania mechaniczne wywołane eksploatacją metra płytkiego i ich wpływ na budynki, i* Zeszyty Naukowe Politechniki Krakowskiej, Inżynieria Lądowa nr 72, Kraków 2001

Miejszem generacji drgań jest styk kół pojazdu z nawierzchnią (np. styk kół wagonów z szyną). Generowane są drgania we wszystkich trzech kierunkach. Wymuszenie kinematyczne pochodzi od ruchu pociągu po torze w tunelu metra. Jeżeli skład pociągu przemieszcza się po torze prostym ze stałą prędkością, wtedy dominuje siła pionowa. Źródłem drgań jest praca elementów samego pojazdu – jego masa, masa pasażerów, niewyważenie elementów obrotowych, niedokładność styków i zmiana elementów masowych, zmiany bezwładności przy zmianie przyspieszenia pojazdu [por. Stypuła (2001)].

3.1.1. Charakterystyka źródła drgań

Źródłem drgań w omawianym przypadku są przejazdy pociągów metra w tunelu usytuowanym w sąsiedztwie badanych budynków. Są to pociągi dwóch typów bardziej szczegółowo opisane poniżej.

Pociągi typu I (rys. 3.2):

- Pociągi serii 81 (starsze dostawy):

Tabor typu 81-572P (wagon z kabiną maszynisty) i 81-573P (wagon bez kabiny maszynisty).

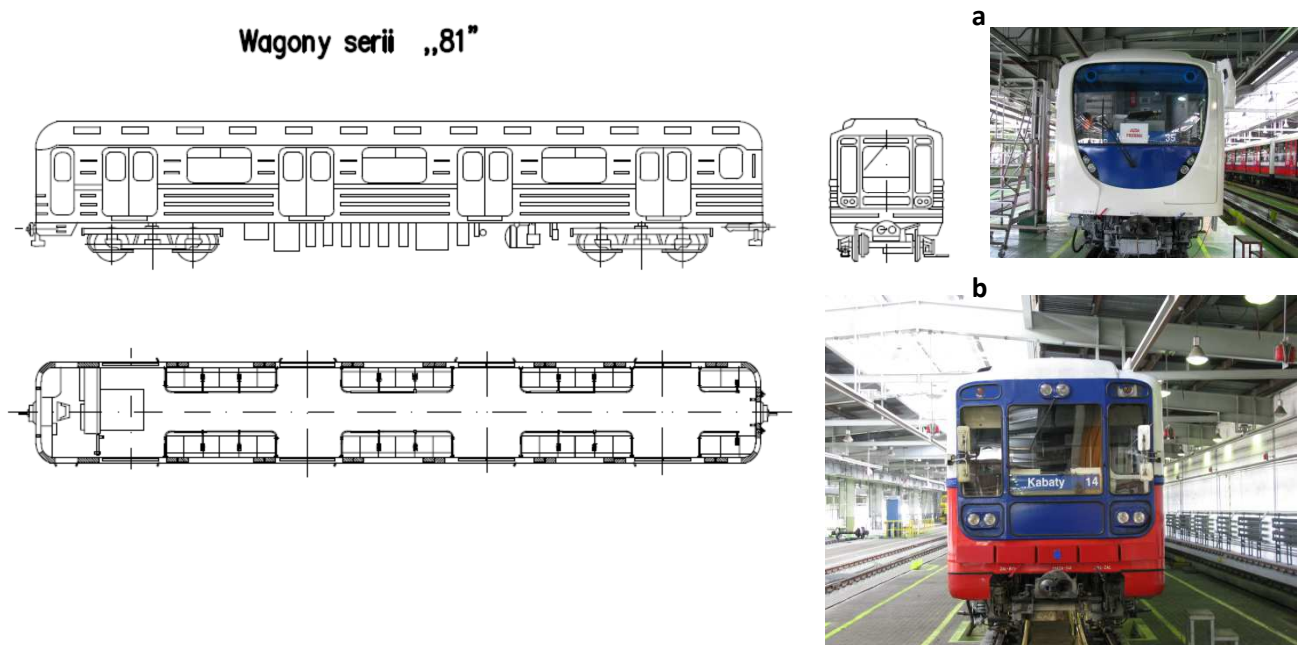
- liczba wagonów – 90 sztuk
- masa wagonu – 30 ton
- pojemność wagonu – 200 osób

- Pociągi serii 81 (nowsze dostawy od roku 2008):

Tabor typu 81-572P (wagon z kabiną maszynisty) i 81-573P (wagon bez kabiny maszynisty)

- liczba wagonów – 42 sztuki
- masa wagonu – 34 tony
- pojemność wagonu – 200 osób

Z uwagi na liczne podobieństwa i rozwiązania konstrukcyjne można uznać, że wagony serii 81 starsze i nowsze to ten sam typ z zastrzeżeniem, że nowsze są po modernizacji (zakupy realizowane od 2008) w stosunku do serii 81 starszej serii.

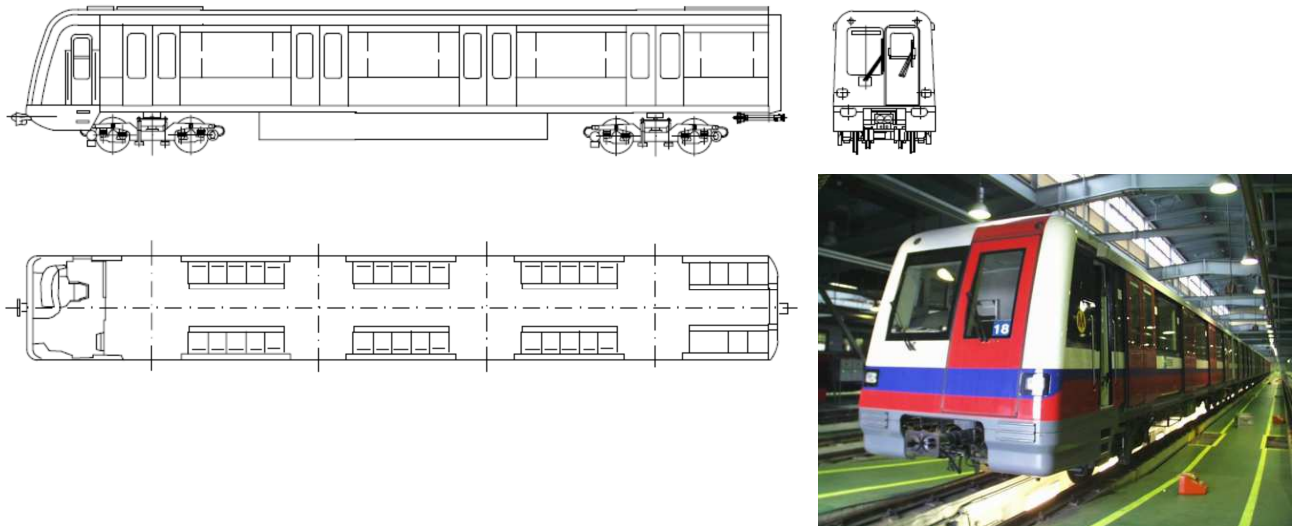


Rys. 3.2. Ogólny wygląd wagonów metra warszawskiego serii 81. Pociąg po modernizacji (a) i pociąg starszej serii (b)

Pociągi typu II (rys. 3.3):

- Pociągi typu MERTOPOLIS (produkcji Alstom)
 - liczba wagonów – 108 sztuk
 - masa wagonu – 36 ton
 - nominalna pojemność wagonu – 242 osoby

Wagony typu „METROPOLIS”



Rys. 3.3. Ogólny wygląd wagonów metra warszawskiego typu Metropolis

3.1.2. Charakterystyka ośrodka propagacji drgań między źródłem drgań i ich odbiornikiem

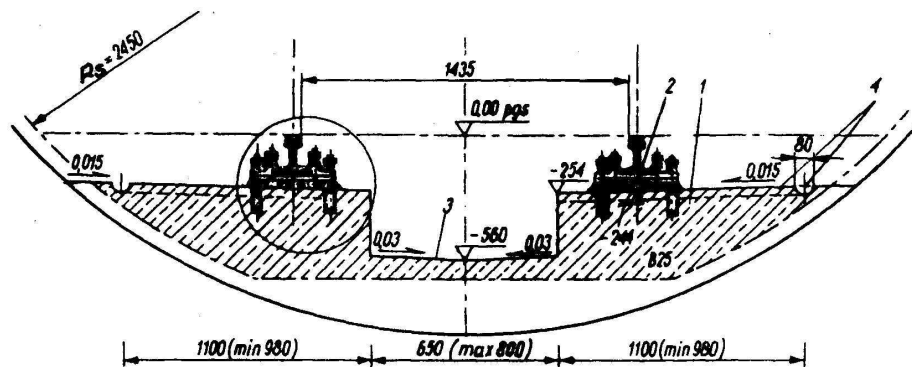
Ośrodkiem propagacji drgań od źródła do odbiornika jest obudowa tunelu oraz stykający się z nią grunt, za pośrednictwem którego drgania przenoszą się na konstrukcję budynku.

W Warszawie istnieje metro płytke – gdzie zagłębienie główki szyny (PGS – poziom główki szyny) mieści się w zakresie od 9 do 10,5 m licząc od poziomu ulicy. Średnica tunelu wykonanego metodą tarczową wynosi 5,50m.

We wszystkich trzech rozważanych tu lokalizacjach tunel wykonano metodą drążenia, stosując jako obudowę żeliwne tubingi. I linia warszawskiego metra posiada nawierzchnię torową bezpodkładową, bezpodkładową. W konstrukcji nawierzchni wydzielić można dwie podstawowe części :

- podbudowa betonowa
- konstrukcja toru

Podbudowa betonowa wykonana jest z betonu klasy B25 [por. metro.waw.pl]. Na tej podbudowie wykonano z betonu epoksydowego (tzw. plastbetonu) podlew stanowiący podparcie szyny przytwierdzonej za pomocą węzłów mocujących (na odcinkach prostych rozstaw węzłów co 70 cm).



Rys. 3.4. Konstrukcja nawierzchni bezpodkładowej w tunelu metra:

- 1 – podbudowa z betonu B25, 2 – węzeł przytwierdzający szynę, 3 – kanał odwadniający, 4 – rowki odwadniające (podłużny i poprzeczny), pgs – poziom główki szyny w torze bez przechyłki

Podobna sytuacja występuje w dodatkowym tymczasowym profilu pomiarowym. Ośrodkiem, który przenosi drgania z obudowy tunelu (por. rys. 3.5.) do budynku jest grunt.

Podłoże w sąsiedztwie badanych budynków jest uwarstwione. Pod wierzchnią warstwą nasypów występują najczęściej warstwy glin piaszczystych oraz piasków gliniastych, piasków drobnych, średnich lub grubych; rzadziej pojawiają się przewarstwienia pyłów, glin pylastych oraz sporadycznie iłu i iłu pylastego [por. Stypuła (2001)].

W przypadku, kiedy rozważamy wpływ drgań na ludzi w budynku, jako ośrodek możemy potraktować również konstrukcję budynku – poprzez stropy drgania są odbierane w sposób bierny przez ludzi przebywających wewnątrz.



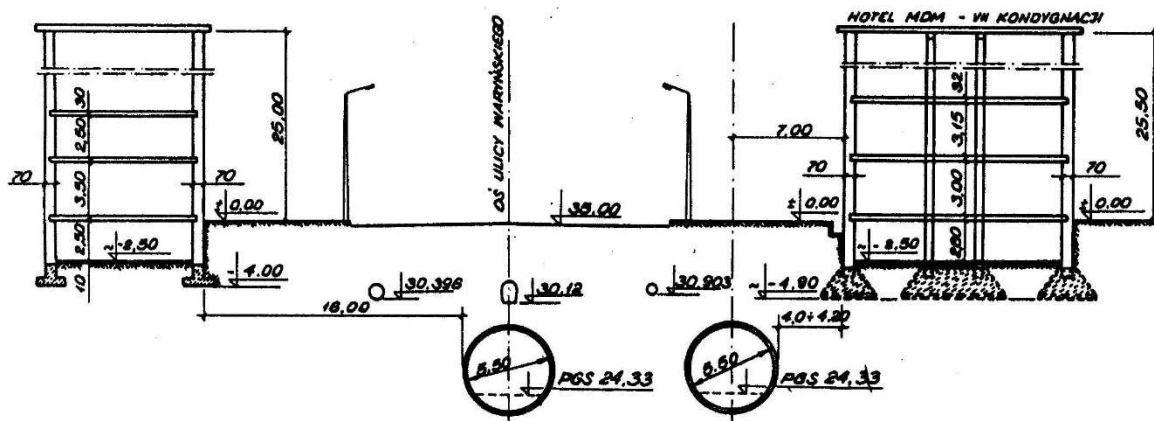
Rys. 3.5. Obudowa żeliwna tunelu oraz podtorze w tunelu metra w Warszawie

3.1.3. Charakterystyka odbiornika drgań

Odbiornikiem drgań generowanych przejazdami pociągów metra jest przede wszystkim budynek (ściślej jego konstrukcja). A w sytuacji, kiedy rozważany jest wpływ drgań na ludzi w budynku, odbiornikiem (odbiór w sposób bierny) stają się ludzie przebywający w budynku.

W niniejszej pracy wykorzystano wyniki monitorowania drgań budynków na I linii metra w Warszawie.

Poniżej opisano obiekty, w których umieszczono punkty pomiarowe występujące w przekrojach objętych monitorowaniem. Są to cztery budynki usytuowane w sąsiedztwie tunelu metra, w których wykonywano pomiary jednocześnie w tunelu metra i w budynku (por. rys 3.6. – typowy przekrój usytuowania budynku względem tunelu metra w Warszawie).



Rys. 3.6. Przykładowy przekrój poprzeczny odcinka szlakowego wykonanego metodą tarczową

Do realizacji systemu ciągłego monitorowania drgań początkowo wytypowano dwie lokalizacje – w ciągu Alei Niepodległości (por. rys. 3.7 i 3.8) w budynkach oznaczonych N118 i N186. Po kilku latach wytypowano kolejny przekrój pomiarowy w ciągu ul. Mickiewicza (por. rys. 3.9) w budynku oznaczonym M22A.

W pracy wykorzystano również wyniki uzyskane w przekroju pomiarowym oznaczonym jako S32/36 (por. rys. 3.10) – w którym wykonywano pomiary doraźne.

Bardziej szczegółowe informacje na temat budynków objętych monitorowaniem przedstawiono poniżej.

3.1.3.1. Budynek przy Al. Niepodległości 118 (N118)



Rys. 3.7. Ogólny widok budynku N118 od strony Alei Niepodległości. Kolorem czerwonym zaznaczono położenie budynku. Kolorem żółtym zaznaczono przebieg linii metra. Zamieszczona mapa pochodzi ze strony www.maps.google.pl

Jest to budynek mieszkalny, wybudowany w latach pięćdziesiątych XX wieku.

Budynek ma 7 kondygnacji nadziemnych oraz kondygnację piwniczną. Konstrukcję wykonano jako murową z cegły pełnej. Ściany nośne w układzie podłużnym. W rzucie poziomym budynek ma kształt litery L

- Wymiary budynku w rzucie: – 25,4 m x 72,8 m.
- Odległość od ściany tunelu metra: – 14,00 m.
- W odniesieniu do budynku nie powinno się stosować skali SWD w celu oceny wpływu drgań na konstrukcję budynku.

3.1.3.2. Budynek przy Al. Niepodległości 186 (N186)



Rys. 3.8. Ogólny widok budynku N186 od strony alei Niepodległości. Kolorem czerwonym zaznaczono położenie budynku. Kolorem żółtym zaznaczono przebieg linii metra. Zamieszczona mapa pochodzi ze www.maps.google.pl

Budynek biurowy, wybudowany w latach dwudziestych XX wieku. Budynek jest podpiwniczony, ma 4. kondygnacje nadziemne i strych (poddasze). Konstrukcja szkieletowa, słupy i belki żelbetowe, ściany murowane. Stropy żelbetowe, płytowe.

- Wymiary budynku w rzucie: – 11,18 x 44,10 m,
- Odległość od ściany tunelu metra: – ok. 4,00 m.
- W odniesieniu do budynku nie powinno się stosować skali SWD w celu oceny wpływu drgań na konstrukcję budynku.

3.1.3.3. Budynek przy ul. Mickiewicza 22A (M22A)



Rys. 3.9. Ogólny widok budynku M22A. Kolorem czerwonym zaznaczono położenie budynku. Kolorem żółtym zaznaczono przebieg linii metra. Zamieszczona mapa pochodzi ze strony www.maps.google.pl

Budynek powstał w 1936 r., przetrwał II wojnę światową, jest to budynek mieszkalny;

Budynek ma cztery kondygnacje nadziemne i jest podpiwniczony. Konstrukcja budynku: murowana, układ ścian nośnych podłużny, Stropy: nad piwnicami Ackermanna, nad wyższymi kondygnacjami stropy Kleina.

- Wymiary budynku w rzucie: – 18,90x12,60 m;
- Odległość od ściany tunelu metra: – ok. 19,50 m;
- W odniesieniu do budynku można zastosować skalę SWD-II w celu oceny wpływu drgań na konstrukcję budynku.

3.1.3.4. Budynek przy ul. Słowackiego 32/36 (S32/36)

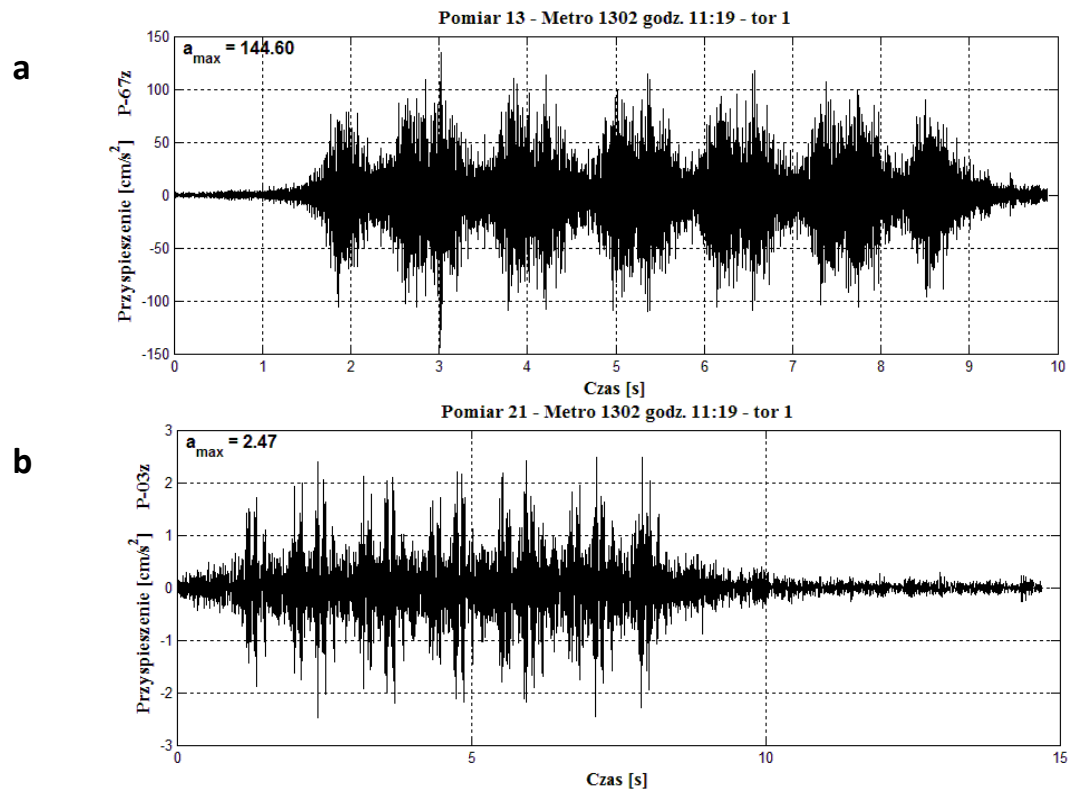


Rys. 3.10. Ogólny widok budynku S32/36. Kolorem czerwonym zaznaczono położenie budynku. Kolorem żółtym zaznaczono przebieg linii metra. Zamieszczona mapa pochodzi ze strony www.maps.google.pl

Budynek wybudowany w latach dwudziestych XX wieku. Budynek mieszkalny o pięciu kondygnacjach nadziemnych, podpiwniczony. Konstrukcja murowa wykonana z cegły ceramicznej, stropy gęstożebrowe, fundamenty wykonano jako ławy ceglane.

- Wymiary budynku w rzucie – ok. 72,50x16,80m
- Od ściany tunelu metra – ok. 10,00m
- W odniesieniu do budynku można zastosować skalę SWD-II w celu oceny wpływu drgań na konstrukcję budynku.

Analizowano drgania konstrukcji budynków zarejestrowane w miejscach umożliwiających ocenę wpływu drgań na konstrukcję budynków oraz na ludzi przebywających w budynkach. W torze pomiarowym występowały akcelerometry firmy PCB model 393B12. Stosowano ten sam typ czujników drgań we wszystkich pomiarach. Jedynie w punktach pomiarowych umieszczonych na ścianie tunelu metra w przekroju pomiarowym, w którym przeprowadzono badania doraźne – zastosowano czujniki mniej czułe firmy PCB model 356B18 – z uwagi na wysoki poziom sygnału.

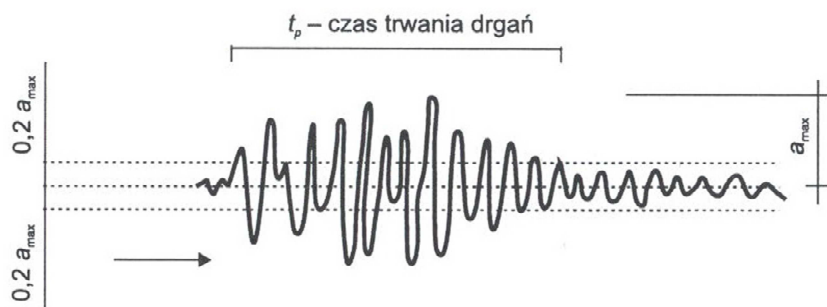


Rys. 3.11. Wibrogramy składowej pionowej drgań zarejestrowane w tymczasowym przekroju pomiarowym podczas przejazdu tego samego pociągu metra w punktach pomiarowych umieszczonych na podtorzu tunelu (a) i na konstrukcji budynku (b)

3.2. Charakterystyka wykonanych badań (ogólne warunki stosowania metodyki)

Poniżej w punktach przedstawiono metodykę wykonywania badań obejmująca obie sytuacje pomiarowe przedstawione w niniejszej pracy – pomiary doraźne oraz zautomatyzowane, powstające na podstawie danych pochodzących z systemu ciągłej rejestracji drgań.

- Stosownie do przyjętej części niniejszej procedury określa się lokalizację punktów pomiarowych na obiekcie i umieszcza się w nich od 1 do 3 akcelerometrów (w zależności od wymaganego zbioru wielkości wykorzystywanych w ocenie wpływów dynamicznych).
- Pomiar polega na rejestracji przebiegów czasowych przyspieszenia drgań badanych obiektów w wytypowanych uprzednio punktach pomiarowych.
- W kolejnym etapie wyznacza się początek i koniec analizy poprzez określenie wartości maksymalnej z przebiegu czasowego i ustalenie pierwszej i ostatniej wartości szczytowej osiągającej 20% wyznaczonej wartości maksymalnej – rys 3.12.



Rys. 3.12. Interpretacja czasu uśredniania (czasu trwania drgań) według PN-88/B-02171. Źródło: [Kawecki, Stypuła (2013)]

- W celu przygotowania do przeprowadzenia analizy sygnał poddaje się filtracji dolnoprzepustowej za pomocą filtra o częstotliwości odcięcia 100 Hz (w praktyce jest stosowany filtr 120 Hz aby uniknąć obniżenia wartości dla częstotliwości środkowej 100 Hz, wynikającej z charakterystyki odcięcia samego filtra).
 - W przypadku oceny wpływu drgań na budynki zgodnie z normą [PN-85/B-02170] wyznaczana jest maksymalna wartość szczytowa przyspieszenia drgań w pasmach tercjowych.
 - W przypadku oceny wpływu drgań na ludzi zgodnie z normą [PN-88/B-02171] wyznaczana jest wartość skuteczna (RMS) przyspieszenia drgań w pasmach tercjowych.
 - Do analizy sygnału wykorzystywane są specjalistyczne procedury numeryczne [por. Bechaump (1978)] opracowane w Laboratorium Badania Odkształceń i Drgań Budowli i działające w środowisku Matlab firmy The MathWorks, których autorem jest mgr inż. Jarosław Chełmecki [por. www.mathworks.com]
 - W wyniku analiz uzyskiwane są pliki wynikowe (tekstowe i graficzne), obrazujące poziom wpływów dynamicznych na konstrukcję budynków i ludzi przebywających w budynkach.
- W zależności od typu analizy, na wyniki w postaci analiz tercjowych (1/3 oktaowych) nanoszone są odpowiednie skale:
- W przypadku analizy wpływu drgań na konstrukcję – dla budynków podlegających ocenie według skal SWD – w zależności od konstrukcji budynku linie graniczne stref wpływu drgań nanosi się na plik wynikowy w postaci analiz tercjowych w zakresie częstotliwości od 1- 100 Hz (zgodnie z procedurą opisaną w rozdziale 2 niniejszej pracy),
 - W przypadku wpływu drgań na ludzi przebywających w budynkach – progi odczuwalności

drgań i zapewnienia komfortu wibracyjnego ludziom w zależności od kierunku odbioru drgań i pasma częstotliwości nanosi się na plik wynikowy w zakresie częstotliwości od 1- 80 Hz.

System ciągłego monitoringu drgań

System monitoringu drgań składa się z trzech niezależnych układów pomiarowych. Każdy z nich składa się z dwóch stanowisk pomiarowych. Jedno stanowisko znajduje się w budynku mieszkalnym, drugie w tunelu metra w sąsiedztwie budynku.

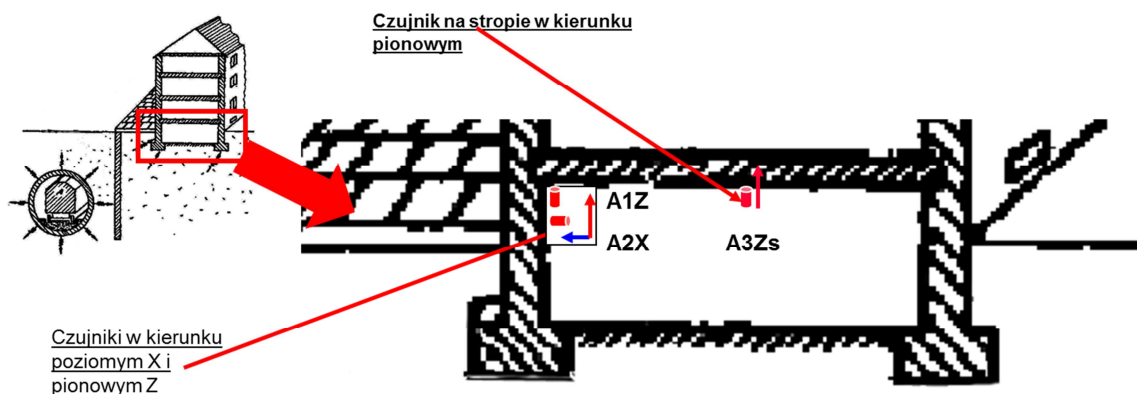
3.2.1. Stanowisko pomiarowe w budynku

W skład stanowiska pomiarowego wchodzi:

- jednostka centralna PC1,
- interfejs internetowy,
- moduły pomiarowe z buforami danych,
- czujniki (3 akcelerometry).

Zasada działania. Akcelerometry (czujniki ICP[®]) oznaczone A1Z i A2X zamocowane są na konstrukcji nośnej budynku (w poziomie terenu) i służą do pomiaru przyspieszeń drgań pionowych budynku (oś Z) oraz drgań poziomych budynku (oś X) prostopadłych do wymuszenia (tunelu metra).

Akcelerometr oznaczony A3Zs zamocowany jest na stropie pomieszczenia w budynku (w poziomie terenu otaczającego budynek) i służy do pomiaru przyspieszeń drgań pionowych w środku rozpiętości stropu, między ścianami nośnymi (patrz rys. 3.13). Rejestracja drgań wyzwalana jest na podstawie sygnału z fotokomórki przesyłanego z punktu pomiarowego umieszczonego w tunelu.



Rys. 3.13. Schemat usytuowania czujników w budynku

3.2.2. Stanowisko pomiarowe w tunelu metra

W skład stanowiska pomiarowego wchodzi:

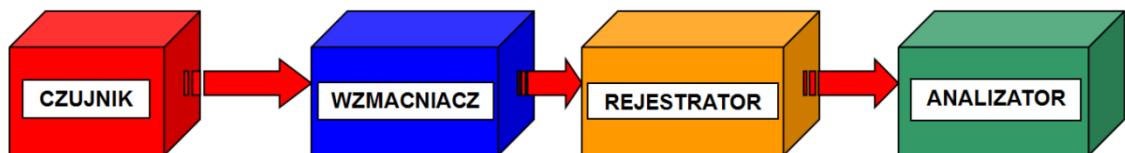
- jednostka centralna PC2,
- moduły pomiarowe z buforami danych,
- bramka podczerwieni,
- czujniki (opisane w 3.3.1.)

Zasada działania. Akcelerometry (czujniki ICP®) oznaczone A4Z i A5X zamocowane na podtorzu służą do pomiaru przyspieszeń drgań odpowiednio w kierunkach osi pionowej Z i poziomej X (prostopadłej do osi tunelu). Uruchomienie rejestracji drgań następuje w tunelu przed przekrojem pomiarowym w wyniku sygnału wywołanego przejazdem pociągu. Ten sam sygnał uruchamia rejestrację drgań w budynku. Mierzona jest także prędkość przejazdu pociągu.

Elementy pomiarowe (czujniki, układy kondycjonowania) wykorzystane w budowie systemu ciągłego monitorowania drgań Metra Warszawskiego są identyczne jak te stosowane w pomiarach doraźnych. Podstawowa różnica polega na innym urządzeniu do rejestracji (w systemie ciągłego monitorowania wykorzystano komputery przemysłowe).

3.3. Sprzęt pomiarowy używany do badań doraźnych

Schemat toru pomiarowego (rys. 3.14) jest taki sam w przypadku wykonywania pomiarów doraźnych jak też pomiarów uzyskanych automatycznie przez system ciągłego monitoringu drgań. Jedyną modyfikacją polega na zamianie wzmacniacza na układ kondycjonowania sygnału. Wynika to z faktu, że czujniki piezoelektryczne z racji wykorzystywanego do swego działania zjawiska (piezoelektrycznego) są zaliczane do grupy czujników typu generatorowego (nie wymagają podania zasilania z zewnątrz w celu wygenerowania sygnału w postaci ładunkowej proporcjonalnego do przyspieszenia drgań badanego obiektu). Układ kondycjonowania sygnału zamienia tylko jeden rodzaj sygnału w drugi.



Rys.3.14. Schemat toru pomiarowego z uwzględnieniem analizatora

3.3.1. Czujniki

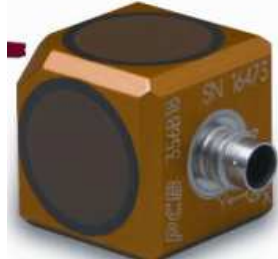
Do bezpośredniej detekcji drgań wykorzystano czujniki piezoelektryczne model **393B12** - amerykańskiej firmy **PCB PIEZOTRONICS**[®] pracujące w układzie typu **ICP**[®]. Należą one do czujników o największej czułości (10V/g) z dostępnych na rynku czujników sejsmicznych o zakresie pomiarowym $\pm 0,5g$.

Czujnik sejsmiczny typu **ICP**[®] jest czujnikiem o wysokiej czułości (10 V/g), którego elementem pomiarowym jest kryształ ceramiczny. Są to czujniki o zakresie częstotliwości od 0,15Hz do 1kHz.



Rys. 3.15. Jednoosiowy akcelerometr PCB Piezotronics typu 393B12. Źródło: www.pcb.com.

W tunelu na dodatkowym przekroju pomiarowym przy ul. Słowackiego (por. rys. 3.10.) wykorzystano czujniki trójosiowe model 356B18 o czułości 1V/g i zakresie pomiarowym $\pm 5,0g$

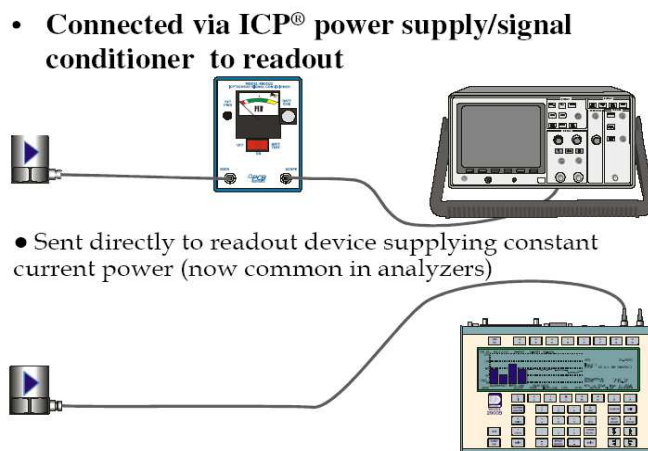


Rys. 3.16. Trójosiowy akcelerometr PCB Piezotronics typu 356B18. Źródło: www.pcb.com

3.3.2. Zasilacz (układ kondycjonowania sygnału).

Pomimo to, że czujniki piezoelektryczne nie wymagają zasilania z zewnątrz (są to czujniki typu generatorowego) – to jednak wymagane jest specjalne urządzenie do zasilania elektroniki wewnątrz czujnika. Dlatego też, w torze pomiarowym występuje tzw. układ kondycjonowania sygnału typu ICP[®] spełniający rolę zamiany jednego rodzaju sygnału w drugi – w tym przypadku mamy do czynienia z zamianą sygnału prądowego na sygnał napięciowy. Jest on pewnym standardem nie tylko w dziedzinie drgań. Sygnał na wyjściu z czujnika jest sygnałem prądowym. Sygnał taki jest dużo bardziej odporny na zakłócenia zewnętrzne od typowego sygnału ładunkowego, charakteryzującego czujniki piezoelektryczne. Dodatkową zaletą nie do przecenienia w stosunku do sygnału ładunkowego jest możliwość stosowania w pomiarach przewodów o niemal nieograniczonej długości, szczególnie jeśli rejestrowane są sygnały niskoczęstotliwościowe (efekt tłumienia występuje przy częstotliwościach powyżej 8 kHz).

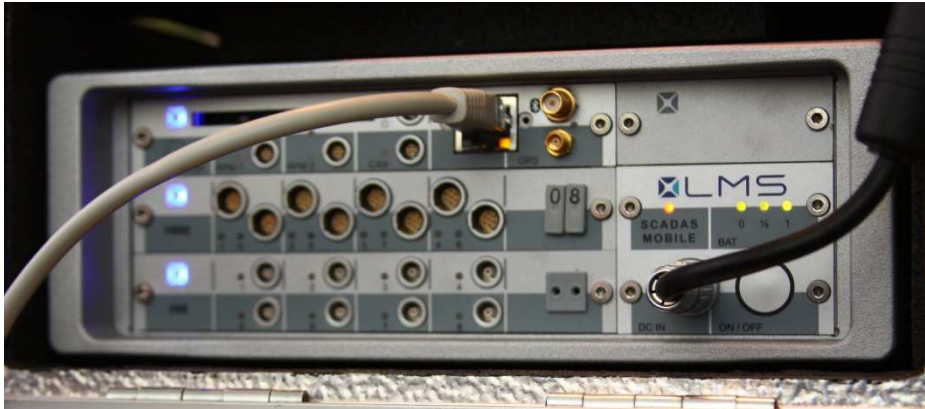
Ten sposób kondycjonowania zapewnia właśnie układ kondycjonowania typu ICP[®] (ang. Internal Circuit Power)



Rys. 3.17. Schemat standardu zasilania typu ICP[®], który został opatentowany przez firmę PCB Piezotronics i obecnie jest standardem na całym świecie. Źródło: www.pcb.com

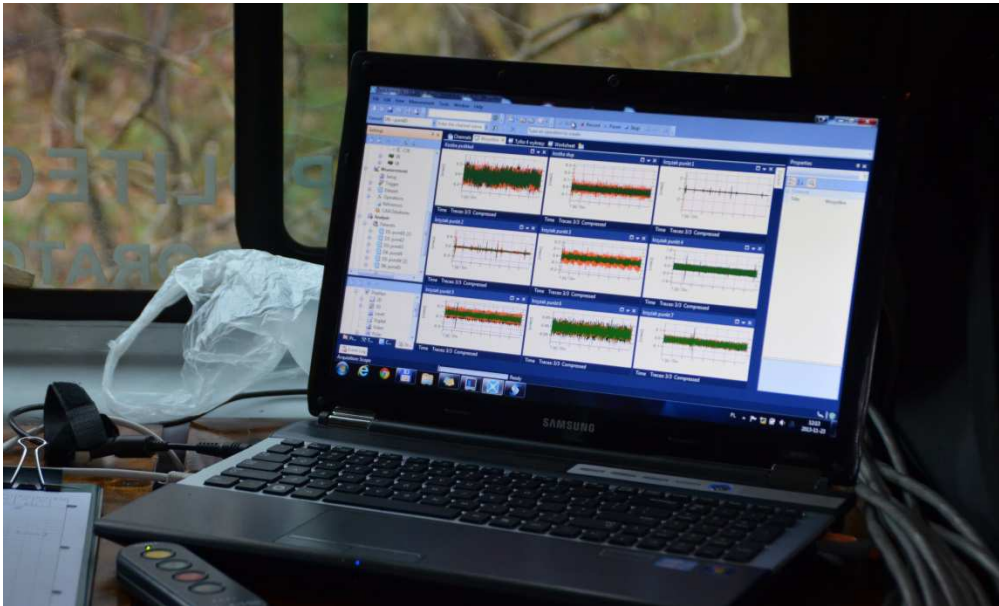
3.3.3. Rejestrator (urządzenie do zapisu danych pomiarowych)

Rejestrator jest urządzeniem służącym do zapisu danych pomiarowych w postaci przebiegów czasowych przyspieszenia drgań. Zapis jest prowadzony bezpośrednio do pamięci komputera. Do pomiarów doraźnych wykorzystywane były analizatory LMS Scadas Mobile belgijskiej firmy LMS INTERNATIONAL będące na wyposażeniu Laboratorium Badania Odkształceń i Drgań Budowli Politechniki Krakowskiej.



Rys. 3.18. Panel przedni rejestratora/analizatora LMS Scadas Mobile w wersji 16-kanalowej

3.3.4. Analizator (urządzenie lub oprogramowanie do specjalistycznych analiz danych pomiarowych).



Rys. 3.19. Widok panelu sterowania analizatora Scadas Mobile podczas rejestracji przejazdów

W Laboratorium Badania Odkształceń i Drgań Budowli od wielu lat stosowane są własne procedury do wykonywania analiz danych pomiarowych oparte o metodykę opisaną w [Beauchamp (1978)]. Obecnie osadzone są one w środowisku Matlab. Procedury te jak też cała metodologia wykonywania pomiarów pozytywnie zweryfikowano w ramach akredytacji Laboratorium Badania Odkształceń i Drgań Budowli w roku 2007 przez Polskie Centrum Akredytacji (nr certyfikatu AB 846).

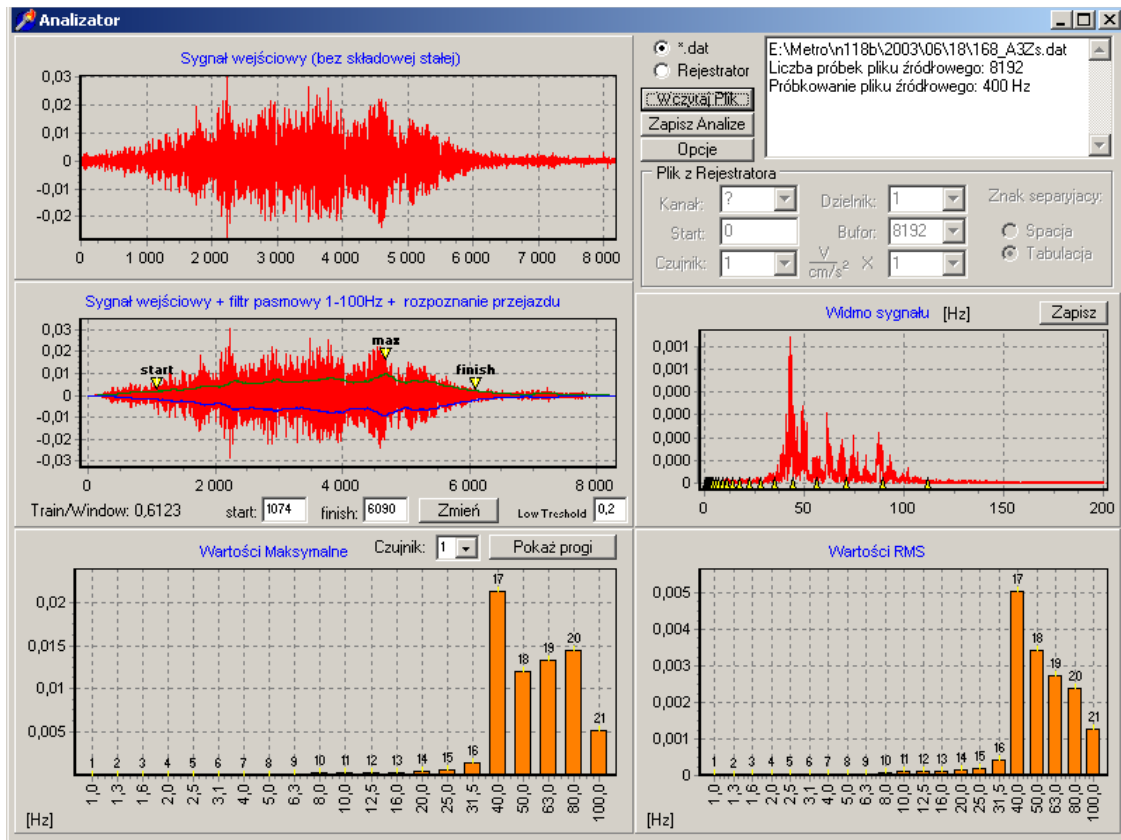
Podstawowe różnice pomiędzy pomiarami doraźnymi, a pomiarami pochodzącymi z systemu ciągłego monitorowania drgań w metrze warszawskim można opisać następująco:

1. Czujniki systemu ciągłego monitorowania zamontowane są na stałe (tunel i budynek).
2. Wzbudzenie rejestracji w systemie następuje poprzez wyzwolenie działania fotokomórki w tunelu metra. W przypadku pomiarów doraźnych rejestracja następuje przez wzbudzenie poziomem drgań przejeżdżającego pociągu. Dla realizacji pomiarów doraźnych, inicjacja rejestracji następuje po uwidocznieniu przejazdu na ekranie rejestratora (stosowana jest funkcja „pretrigger” z opóźnieniem zapisu 16 s.).
3. W systemie następuje automatyczna identyfikacja poszczególnych składów pociągów metra. W przypadku pomiarów doraźnych jest to skomplikowany i czasochłonny proces.
4. W przypadku zapisu automatycznego nie ma możliwości pominięcia żadnego przejazdu pociągu metra. Dla pomiarów doraźnych, jeśli sygnał przyspieszenia drgań mierzony na budynku jest mały – istnieje ryzyko niezauważenia przejazdu pociągu.
5. Zapis automatyczny daje dodatkową informację na temat prędkości przejazdu – dla pomiarów doraźnych nie ma takiej możliwości.
6. W odniesieniu do aparatury: inny jest moduł odpowiedzialny za zapis danych pomiarowych. Dla pomiarów doraźnych jest to rejestrator/analizator, dla systemu monitorowania komputer przemysłowy podłączony do sieci w celu przesyłania danych do jednostki centralnej.
7. System monitorowania działa stale, natomiast badania doraźne są tylko pewną próbka – czas rejestracji jest ograniczony.

3.4. Metodyka analizy

System ciągłego monitorowania drgań

System monitoringu to w pełni zautomatyzowany układ do realizacji pomiarów i analiz wpływu drgań (por rys. 3.20). Zarejestrowany przebieg czasowy, jest analizowany pod kątem wyboru wartości maksymalnej aby określić początek i koniec analizy (zgodnie z PN-85/B-02170 (1985)). Kolejny wykonuje się analizę FFT oraz analizy tercjowe dla wartości maksymalnej i RMS w pasmach 1/3 oktaowych.



Rys. 3.20. Panel kontrolny programu do analiz wpływu drgań na konstrukcję budynku i ludzi w nim przebywających systemu ciągłego monitoringu drgań

BUDYNEK

Zarejestrowane dane przekazywane są do jednostki centralnej PC1. Następnie wykonywane są następujące analizy:

- obliczenie wartości RMS w pasmach tercjowych i porównanie ich z założonymi progami,
- wyznaczenie maksymalnych wartości szczytowych w pasmach tercjowych i porównanie ich z założonymi progami,
- wyznaczenie wartości maksymalnej z całego przebiegu czasowego,
- wygenerowanie raportu.

Zgromadzone dane wysyłane są do komputera centralnego.

TUNEL

Rejestrowane dane przypisywane są do konkretnego pociągu na podstawie informacji

odczytywanych z systemu identyfikacji pociągów.

Dane z przejazdu pociągu przekazywane są do jednostki centralnej PC2, gdzie poddane są analizie. Wykonywane są następujące obliczenia:

- obliczenie wartości RMS w pasmach tercjowych i porównanie ich z założonymi progami,
- wyznaczenie maksymalnych wartości szczytowych w pasmach tercjowych i porównanie ich z założonymi progami,
- wyznaczenie wartości maksymalnej z całego przebiegu czasowego,
- wygenerowanie raportu.

Zgromadzone dane wysyłane są do komputera centralnego.

Dla każdego przebiegu czasowego wykonywane są analizy wpływu drgań na konstrukcję i na ludzi przebywających w budynku. Dopiero na etapie przyporządkowywania analiz do konkretnego punktu pomiarowego w zależności od umiejscowienia (zdefiniowany czujnik) wynik analizy jest prezentowany w pliku „raport”.

Zawartość pliku raport.txt (raport dzienny)

Na podstawie przeprowadzonych analiz sporządzane są raporty dzienne.

Generowane są cztery raporty o nazwie **raport.txt** (po jednym z każdego punktu pomiarowego).

Podczas tworzenia raportu uwzględniane są pociągi dla których poziom zmierzonych drgań przekroczył jeden z zadanych progów. Pociąg umieszczany jest w raporcie za każdym razem, gdy wywołane przez niego drgania przekroczą zadany poziom.

W raporcie znajdują się następujące informacje:

- numer pociągu
- numer kolejny pociągu (określa który z kolei pociąg przejechał przez punkt pomiarowy)
- prędkość pociągu
- data i czas pomiaru

```

          RAPORT DZIENNY      Data: 2003-03-27

    Stanowisko Pomiarowe: A1. Niepodległości 118
                        Tunel Metra

*****
Train: 012  Pos: 020  Speed: 62,3 km/h  Time: 04:54:23 2003-03-27

A4 Z .max. - 1 2 - - - - - - - - - - - - - - - - - - 2 3 - - (1234.an1)
A4 Z .rms. - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - (1234.an1)

A5 X .max. - - - - - - - - - - - - - - - - - - 2 2 1 - - - - (1234.an1)
A5 X .rms. - - - - - - - - - - - - - - - - - - 2 1 - - - - (1234.an1)

```

3.21. Rysunek przedstawia przykładowy plik dziennego raportu

Raport zawiera kolejno:

nagłówek – czyli informację o dacie sporządzenia raportu oraz nazwie stanowiska pomiarowego

Dane dotyczące pociągu – numer pociągu, pozycja (kolejność) w ciągu dnia , prędkość, czas rejestracji

Informacje o przekroczonych progach – nazwa czujnika, rodzaj analizy, tercje z zaznaczonymi progami, nazwa pliku z zapisaną analizą przebiegu.

Sposób odczytu przykładowej linii raportu:

A5 X .max. - - - - - 2 2 1 - - - - (1234.anl)

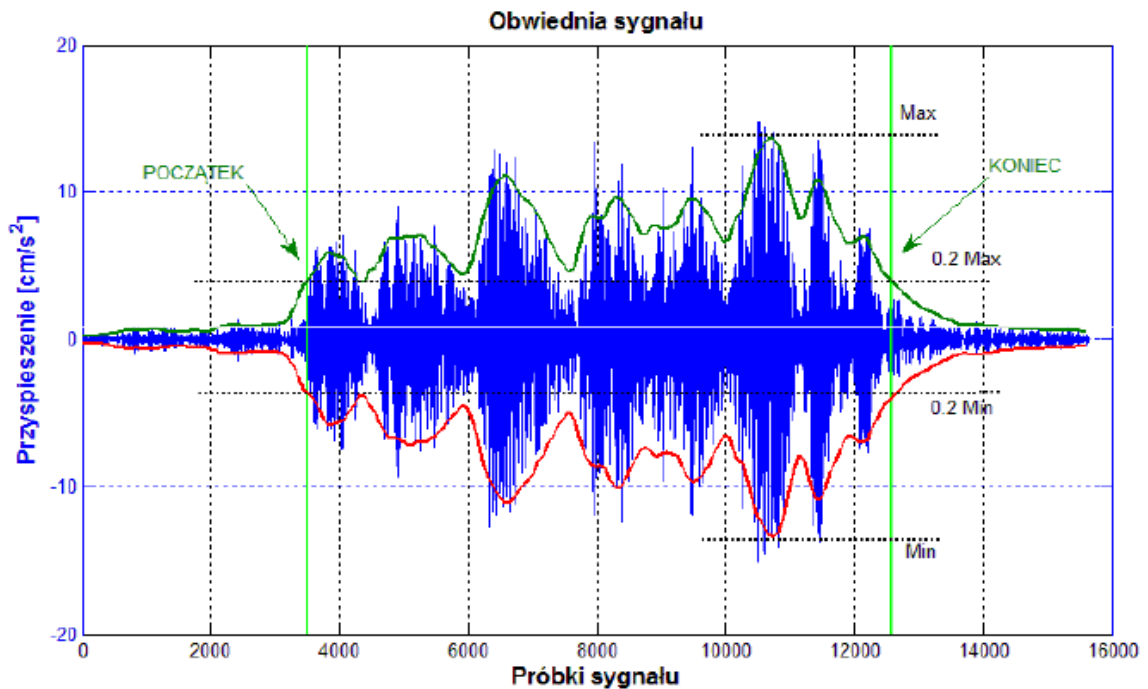
- A5 X – nazwa czujnika
- max – analiza maksymalnych wartości szczytowych w tercjach
- kolejne myślniki oznaczają kolejne tercje licząc od lewej.
- cyfry na poszczególnych pozycjach informują o numerze przekroczonego progu czyli w przykładzie:
1 – przekroczony próg 1 w 17 tercji
- (1234.anl) – nazwa pliku zawierającego analizę z której został sporządzony raport

Badania doraźne

W początkowym etapie podejmowania tematu badawczego założono, że wyniki monitoringu zostaną uzupełnione pomiarami doraźnymi, które w sposób niezależny od działającego systemu ciągłego monitorowania drgań zostaną wykonane na kolejnym przekroju pomiarowym.

Dla realizacji pomiarów doraźnych założono analogiczne jak w systemie monitoringu rozmieszczenie czujników w badanym obiekcie – sam pomiar polega na rejestracji przebiegów czasowych przyspieszenia drgań badanych obiektów w wyznaczonych wcześniej punktach pomiarowych. Po ustaleniu wartości maksymalnej w analizowanym przebiegu czasowym, dane poddawane są analizie wpływu drgań na budynek lub na ludzi w budynku (stosownie do usytuowania punktu pomiarowego).

Warunkiem wykonania poprawnej analizy (zgodnie z PN-88/B-02171 (1988)) jest dobranie odpowiednio zdefiniowanego odcinka czasowego - jak na rysunku poniżej (por rys. 3.22):



Rys. 3.22. Poprawny dobór odcinka czasowego do analizy

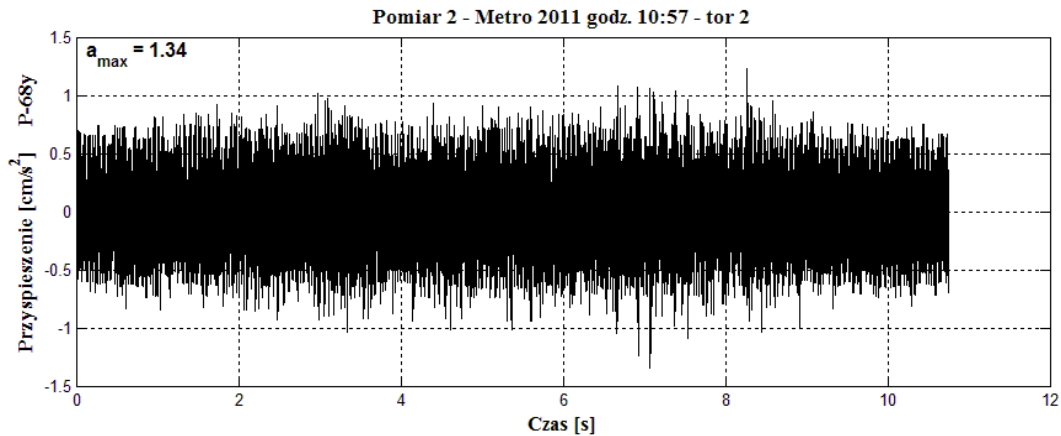
Powyższy rysunek przedstawia prawidłowo wybrany do analizy fragment przebiegu czasowego. Jest to bardzo istotne z punktu widzenia prawidłowej i powtarzalnej procedury doboru sygnałów z przebiegów czasowych do analiz. Należy najpierw wyznaczyć wartość maksymalną, a następnie 0,2 wartości maksymalnej jest wyznaczane jako początek i koniec analizy – co obrazuje powyższy rysunek. W innym przypadku dowolnie dobierając przebieg czasowy do analizy można osiągać różne wyniki analiz, co jest niezgodne z założeniami normy i daje możliwość wpływania na wynik analizy.

W przypadku badań doraźnych, każdy przebieg czasowy jest weryfikowany pod kątem wystąpienia ewentualnych zakłóceń powstałych podczas rejestracji. Podstawowe kryteria jakim podlega przebieg weryfikacji przebiegów czasowych (wibrogramów) przyspieszenia drgań przedstawiono poniżej.

Kryteria doboru przebiegów czasowych do dalszej analizy

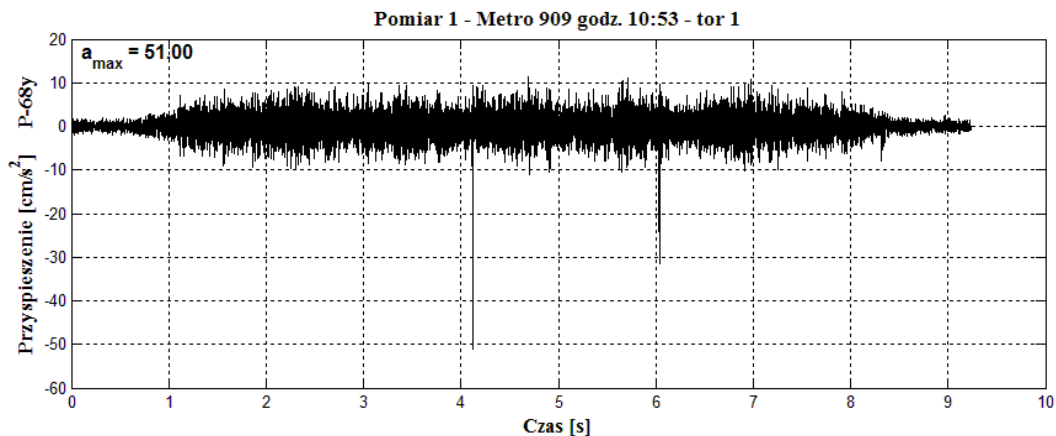
Kryteria doboru przebiegów czasowych sygnału do dalszej analizy (jeśli w przebiegu czasowym wystąpi którykolwiek z opisanych poniżej symptomów, należy taki przebieg czasowy wyłączyć z dalszej analizy):

- Mierzony sygnał jest porównywalny z poziomem szumów



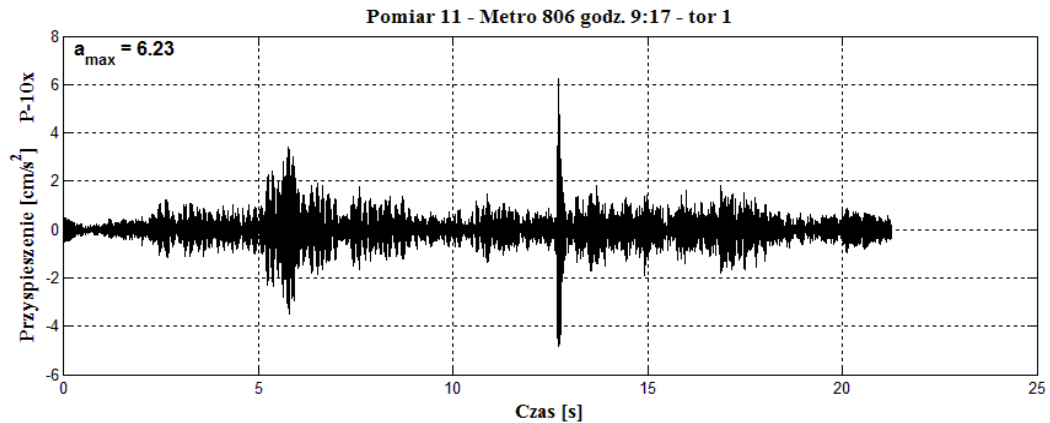
Rys.3.23. Rejestracja przejazdu pociągu metra nie jest widoczna z poziomu tła sygnału

- Wystąpienie efektu „szpilki” (wartość maksymalna ujawniona w postaci „szpilki” wielokrotnie przekracza wartość maksymalną w obwiedni sygnału)



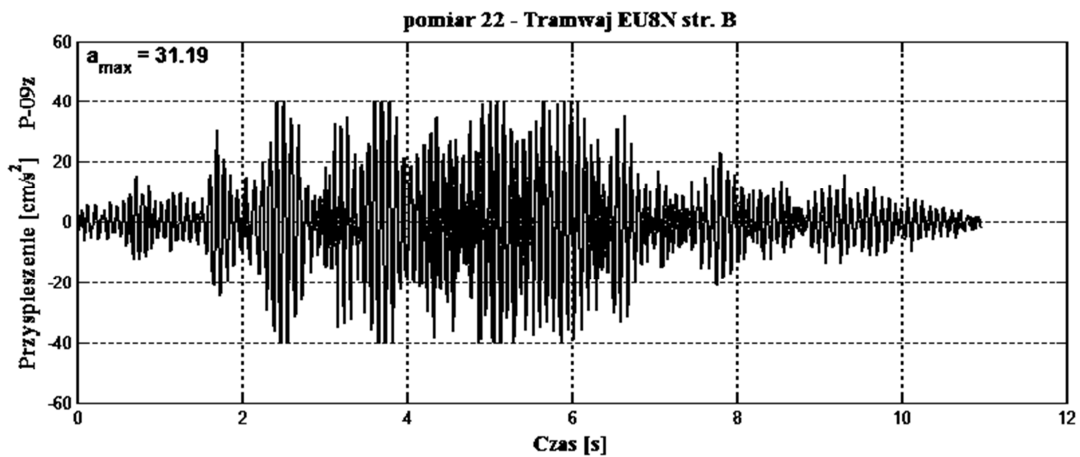
Rys. 3.24. Widoczne w przebiegu czasowym zakłócenie aparaturowe w postaci tzw. „szpilki”

- Zakłócenia w postaci uderów zwykle ujawnione na kilku czujnikach usytuowanych na obiekcie, między innymi zakłócenia pochodzące od innych źródeł nie będących celem pomiarów.



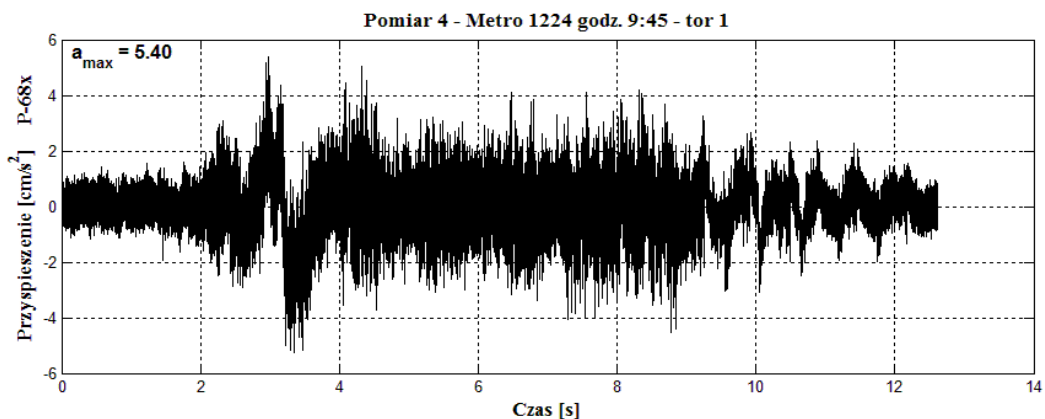
Rys. 3.25. Uwidocznione w przebiegu czasowym zakłócenie od uderów typu trzaśnięcie drzwiami itp.

- Sygnał przekracza zakresy pomiarowe aparatury.



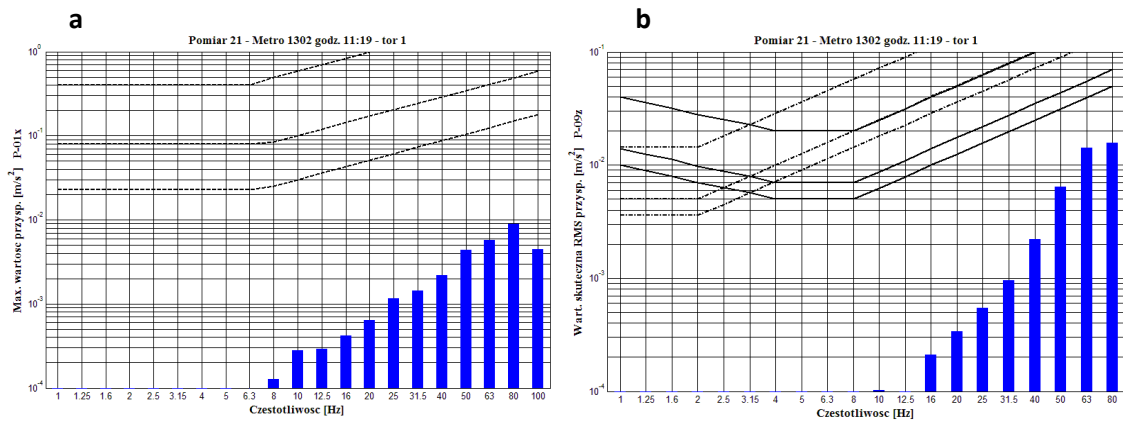
Rys. 3.26. Widoczne obcięcie maksymalnej wartości sygnału powyżej 40 cm/s^2

- Dryft sygnału, gdy nie daje efektu odfiltrowanie sygnału filtrem górnoprzepustowym.



Rys. 3.27. Uwidocznione w przebiegu czasowym zakłócenie w postaci tzw. „dryftu sygnału”

Wibrogramy, które pozytywnie zweryfikowano, poddano analizom normowym, które szczegółowo opisano w Rozdziale 2.



Rys. 3.28. Przykładowe wyniki analizy wpływu drgań wywołanych działaniem tego samego źródła drgań (przejazd pociągu metra po torze 1 w „czwartym” profilu pomiarowym) na konstrukcję budynku (rys. a – maksymalne tzw. szczytowe wartości przyspieszenia drgań) i wpływu drgań na ludzi w budynkach (rys. b – wartości skuteczne rms przyspieszenia drgań w pasmach 1/3 oktaowych)

Pomimo olbrzymiej liczby danych pomiarowych, pojawiły się spore kłopoty ze skorelowaniem baz danych z budynków i tuneli, a w szczególności w odniesieniu do danych z okresu przed 2008 r. do tych uzyskiwanych obecnie. Stało się tak na skutek gruntownej modernizacji oprogramowania obsługującego system ciągłego monitoringu.

Dzięki możliwości przeprowadzenia badań doraźnych na tzw. „czwartym” dodatkowym profilu pomiarowym, była możliwość skorelowania danych pomiarowych z tunelu i budynku i dlatego część analiz została opracowana w oparciu o dane uzyskane z tych właśnie pomiarów.

Z punktu widzenia omawiania wyników pomiarów istotne wydaje się zdefiniowanie terminu „bicia promieniowego” jako bezpośredniej przyczyny wzrostu poziomu drgań na skutek zużycia kół poszczególnych składów pociągów metra.

Bicie promieniowe to inaczej odchylenie od właściwego ruchu, lub promieniowe przemieszczenie głównego wrzeciona w ciągu jednego obrotu, mierzone w płaszczyźnie prostopadłej do osi wrzeciona w punkcie znajdującym się na zewnętrznej lub wewnętrznej badanej powierzchni obrotowej.

3.5. Przenoszenie drgań przez strop kalibracja czujnika

W przypadku monitorowania drgań zdarza się, że czujniki do monitorowania wpływu drgań na ludzi nie mogą być zamontowane w pomieszczeniu mieszkalnym w miejscu odbioru drgań przez ludzi na środku stropu a możliwe jest umieszczenie tych czujników pod tym punktem na dolnej powierzchni tego stropu. Z uwagi na konstrukcję stropu wyniki pomiarów mogą się znacząco różnić i konieczne jest wówczas znalezienie wartości współczynnika przeniesienia drgań przez strop. Gdy z przyczyn praktycznych nie jest możliwe zamontowanie na stałe czujnika drgań np. na podłodze mieszkania na parterze, to w takim przypadku czujnik montuje się na stropie piwnicy ale wartości wskazań tego czujnika są mnożone przez współczynnik przeniesienia drgań przez strop, tak aby otrzymać wartości jak najbardziej zbliżone do tych mierzonych w mieszkaniu powyżej.

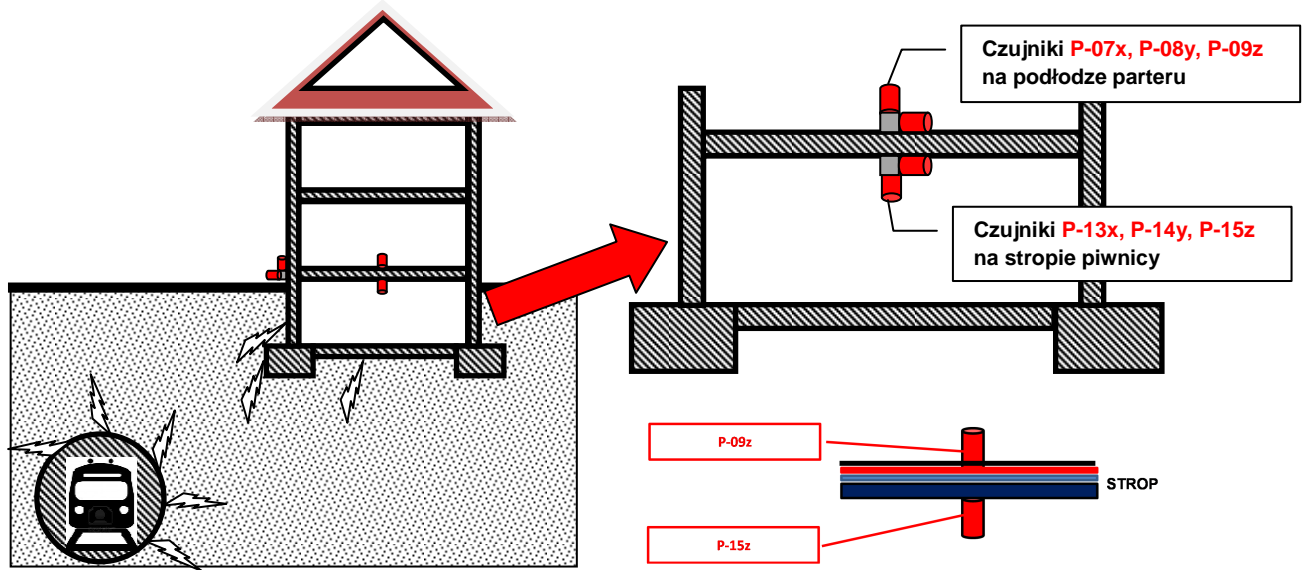
Sytuacja ta obrazuje także nie mniej istotny problem właściwego umiejscowienia czujnika do pomiarów wpływu drgań na ludzi przebywających w budynku. Od tego czy czujnik jest właściwie ustawiony zależą wyniki oceny określające czy spełnione są wymagania dotyczące komfortu w zakresie wpływu drgań na ludzi czyli tzw. komfortu wibracyjnego.

Ponieważ w trakcie prowadzonych badań na tzw. czwartym przekroju pomiarowym, pojawiła się okazja do zbadania przenoszenia się drgań przez strop, dzięki zamontowaniu jednego czujnika (akcelerometru) na podłodze parteru w środku stropu pomieszczenia a drugiego pod nim na stropie piwnicy.

W prezentowanych badaniach odpowiednio czujnik P-15z jest posadowiony na stropie piwnicy pod mieszkaniem, zaś P-09z na podłodze pomieszczenia mieszkalnego (nad czujnikiem P-15z) – rys. 3.29. i 3.30. Badany strop ma konstrukcję typu Kleina, a na podłodze parteru znajdują się panele podłogowe na warstwie gąbki zaś pod spodem warstwa izolująca w postaci płyt OSB.

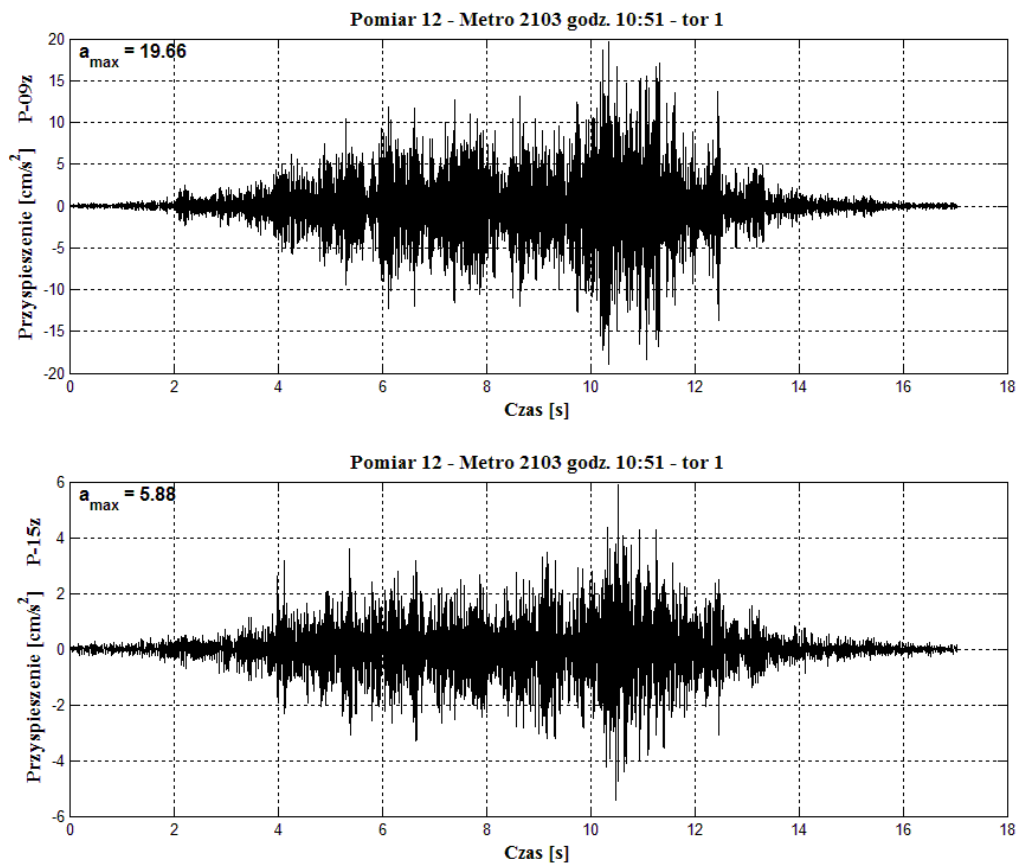


Rys. 3.29. Usytuowanie czujników na stropie piwnicy i na posadzce pomieszczenia mieszkalnego na parterze



Rys. 3.30. Schematyczne rozmieszczenie czujników na stropie parteru

Poniżej zaprezentowano przykładowe przebiegi czasowe zarejestrowane, dla najbardziej newralgicznego kierunku pionowego na posadzce parteru (P-09z) i na stropie piwnicy (P-15z).

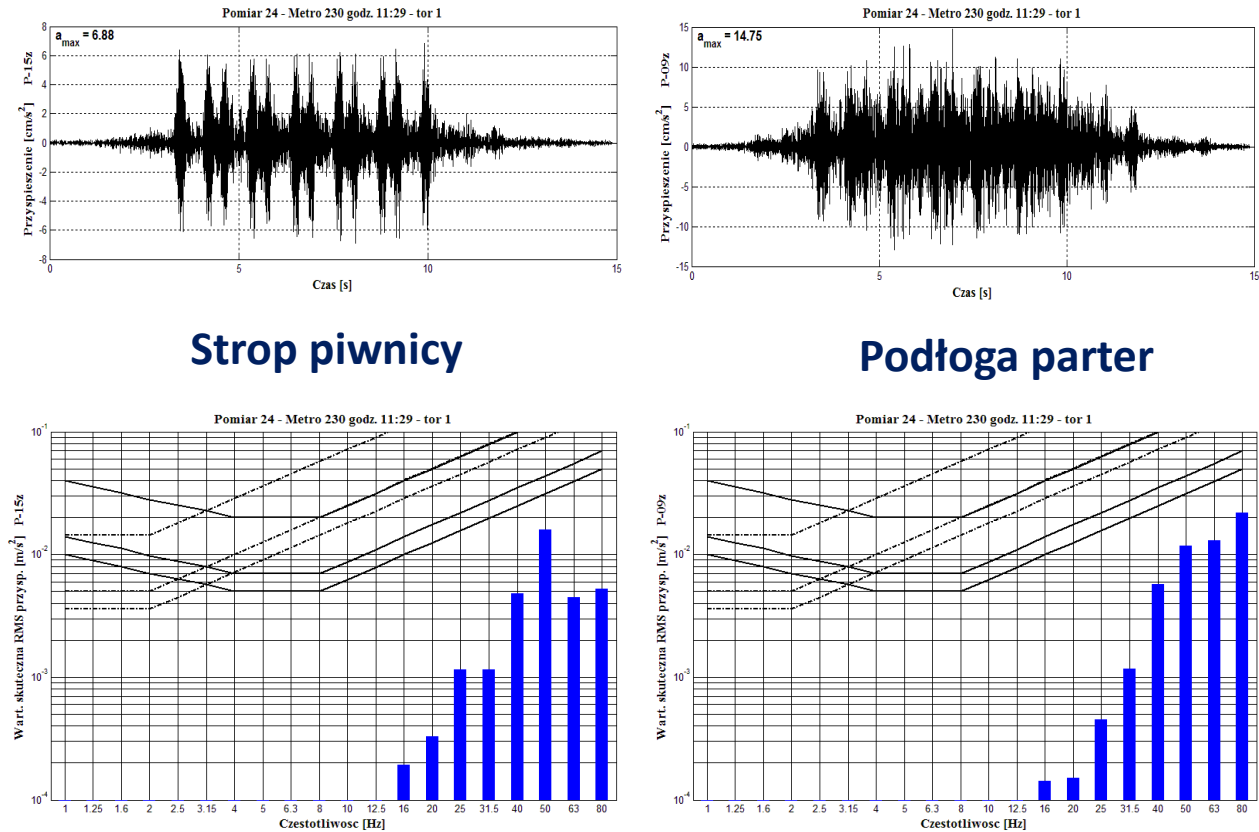


Rys. 3.31. Porównanie przebiegów czasowych drgań pionowych zarejestrowanych na posadzce stropu i na dolnej jego powierzchni

To co nasuwa się przede wszystkim podczas analizy wyników, to fakt, iż maksymalna wartość przyspieszenia mierzona na posadzce parteru jest ponad 3 razy większa od maksymalnej wartości

przyspieszenia drgań mierzonych na stropie piwnicy.

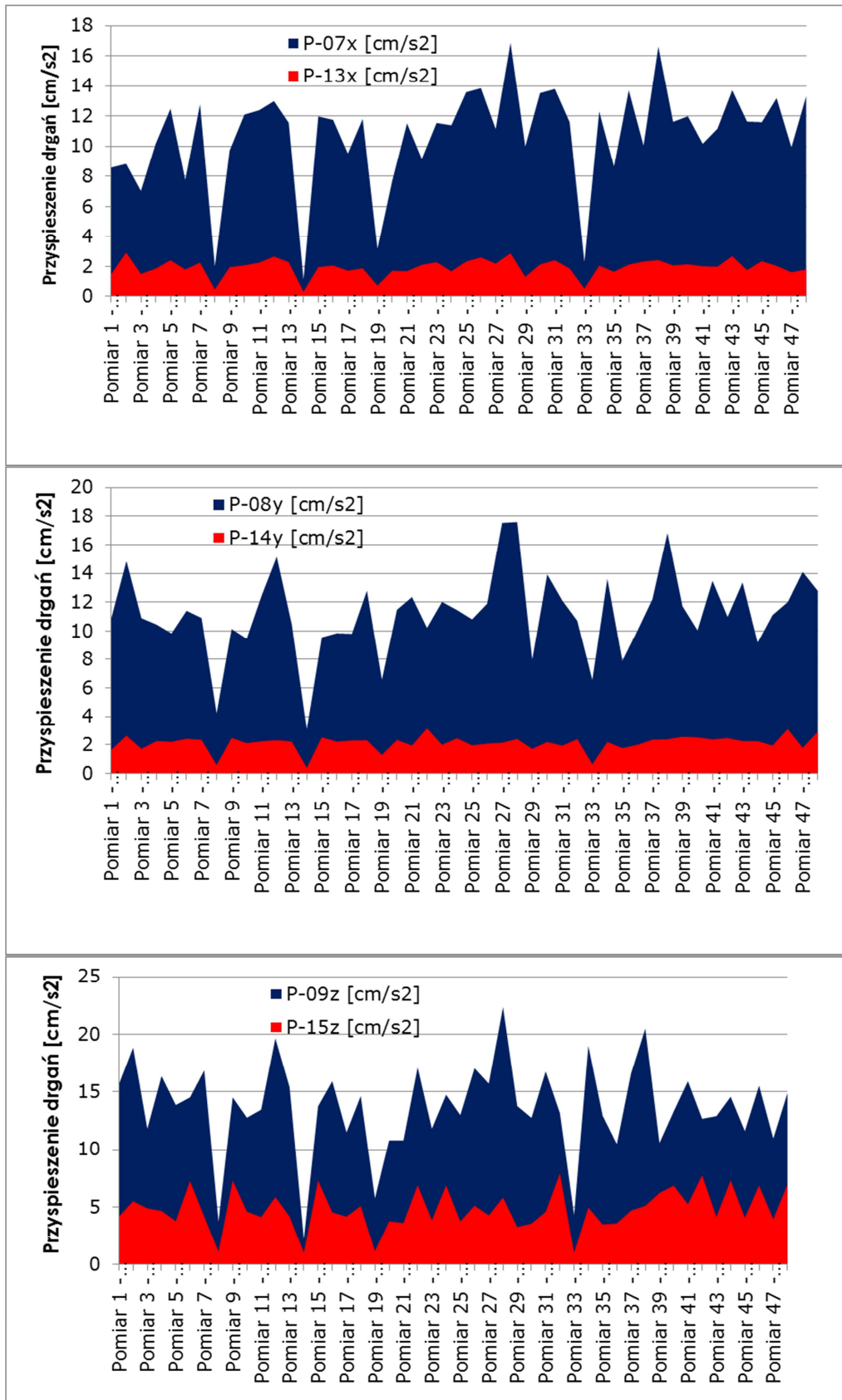
Poniżej przedstawiono przykładowe wyniki analizy wpływu drgań na ludzi w budynkach z zarejestrowanych przebiegów czasowych z obu lokalizacji pomiarowych w odniesieniu do składowej pionowej drgań (kierunek pionowy Z).



Rys. 3.32. Porównanie przebiegów czasowych drgań pionowych stropu zarejestrowanych na dolnej powierzchni stropu w piwnicy oraz na posadzce tego stropu na parterze budynku wraz z porównaniem wyników analiz wpływu tych drgań na ludzi (maksymalnych wartości RMS przyspieszeń drgań pionowych)

Pomimo tych różnic w wartości zarejestrowanego przebiegu czasowego, analiza wpływu drgań na ludzi w budynkach zgodnie z normą PN-88/B-02171 (Ocena wpływu drgań na ludzi w budynkach), nie wykazała przekroczenia progu odczuwalności drgań przez ludzi w budynku. Drgania o takiej wartości (istotna jest też częstotliwość) są kwalifikowane jako nieodczuwalne przez ludzi w budynku.

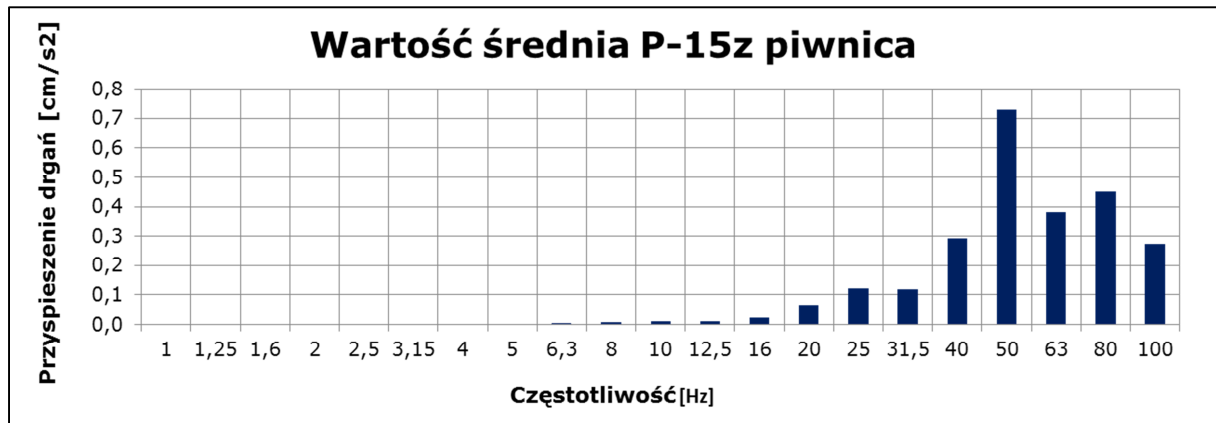
W dalszej części niniejszej pracy przedstawiono wyniki analiz przenoszenia się drgań przez badany strop. Analizę bazującą na przebiegu czasowym wykonano dla wszystkich trzech kierunków: x – poziomego, prostopadłego do kierunku wymuszenia, y- poziomego, równoległego do kierunku wymuszenia oraz z – pionowego. Analizę zastosowano do całego zbioru pomiarowego, do wszystkich zarejestrowanych podczas rejestracji zdarzeń.



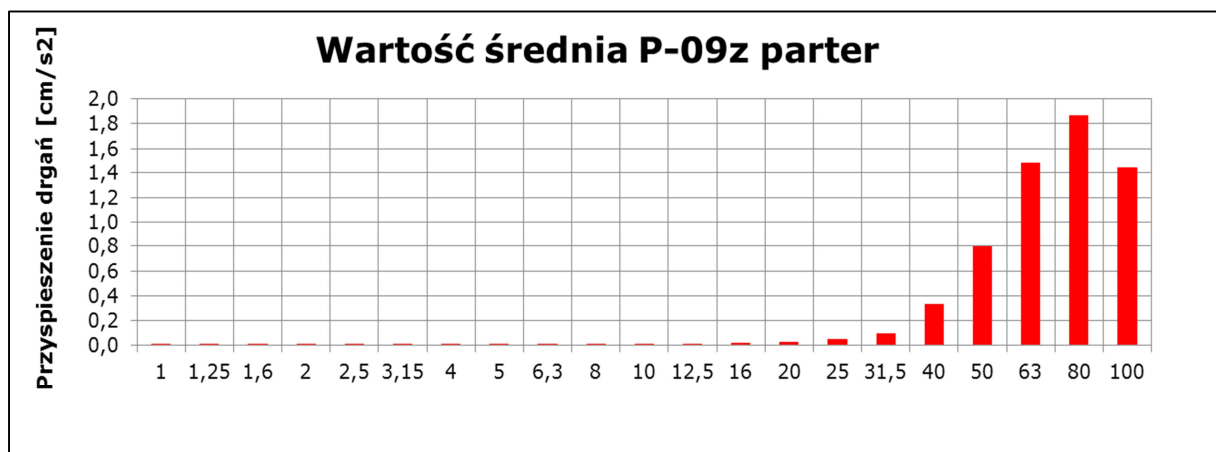
Rys. 3.33. Analiza wartości maksymalnych przyspieszeń drgań z przebiegów czasowych dla obu punktów pomiarowych umieszczonych na stopie dla wszystkich mierzonych kierunków X, Y i Z

Finalnie, wykonano analizę przenoszenia drgań przez strop dla pełnego zbioru rejestracji: odpowiednio dla wartości średniej i maksymalnej. Jako najbardziej reprezentatywny kierunek (osiąga największe wartości) wybrano kierunek pionowy Z. Dla niego wykonano analizę w dziedzinie częstotliwości – analiza tercjowa. Wykonano analizę dla średniej wartości ze wszystkich pomiarów jak też dla wartości maksymalnych.

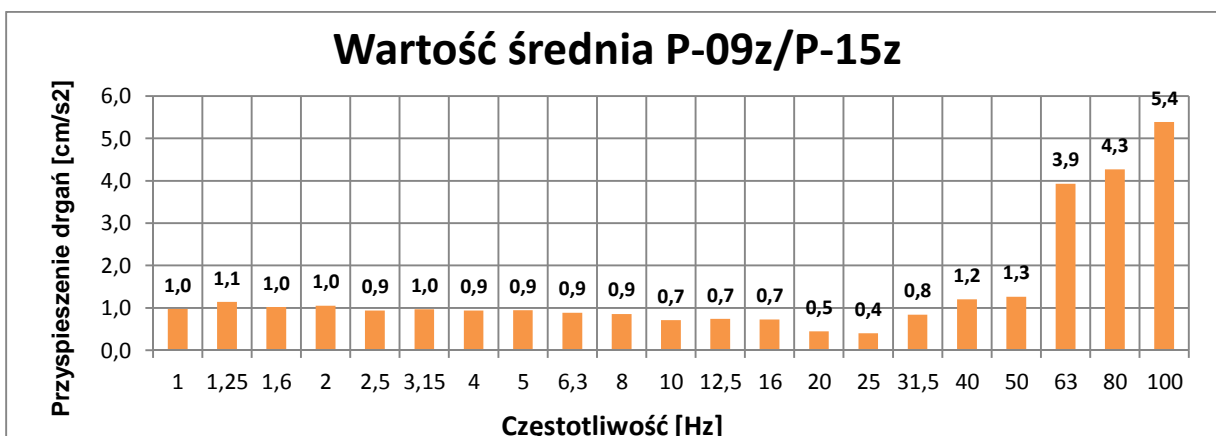
Wartość średnia



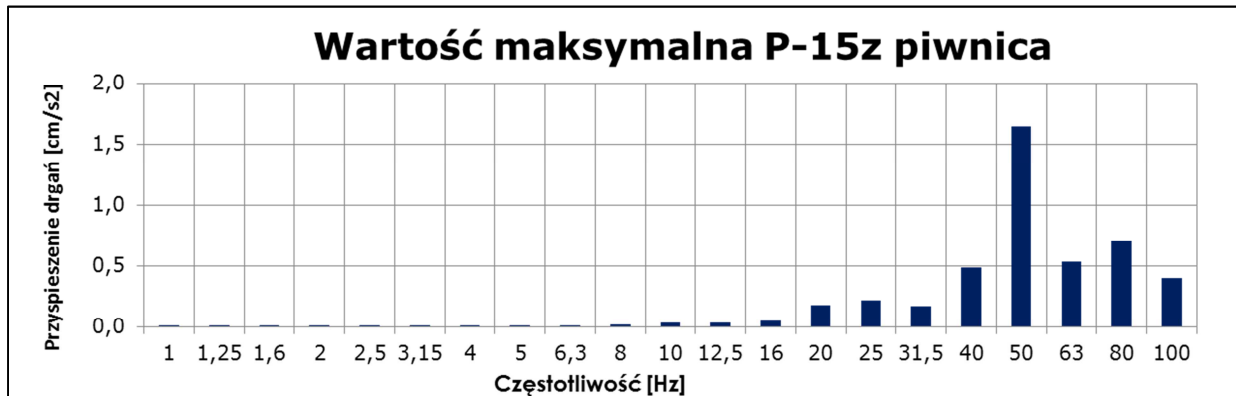
Rys. 3.34. Analiza tercjowa dla wartości średnich z pomiaru dla czujnika na stropie piwnicy



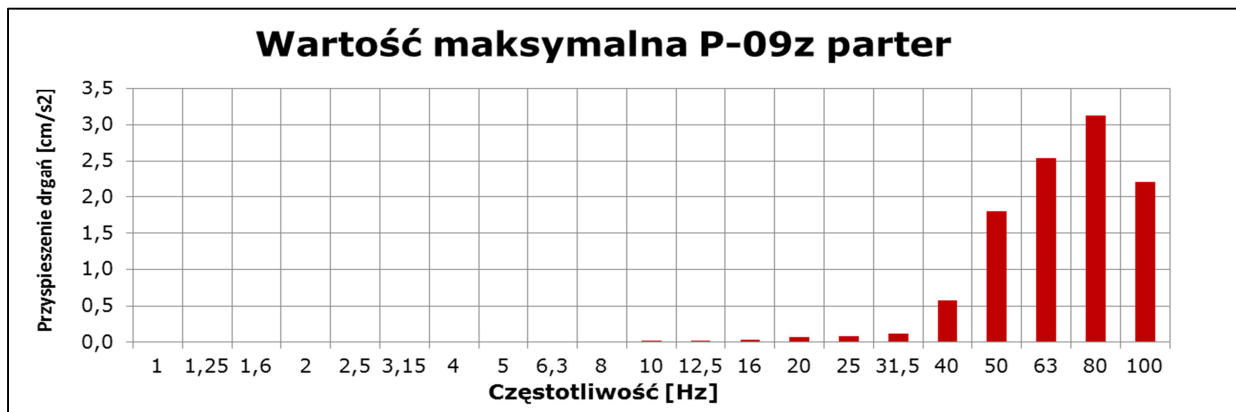
Rys. 3.35. Analiza tercjowa dla wartości średnich z pomiaru dla czujnika na podłodze parteru



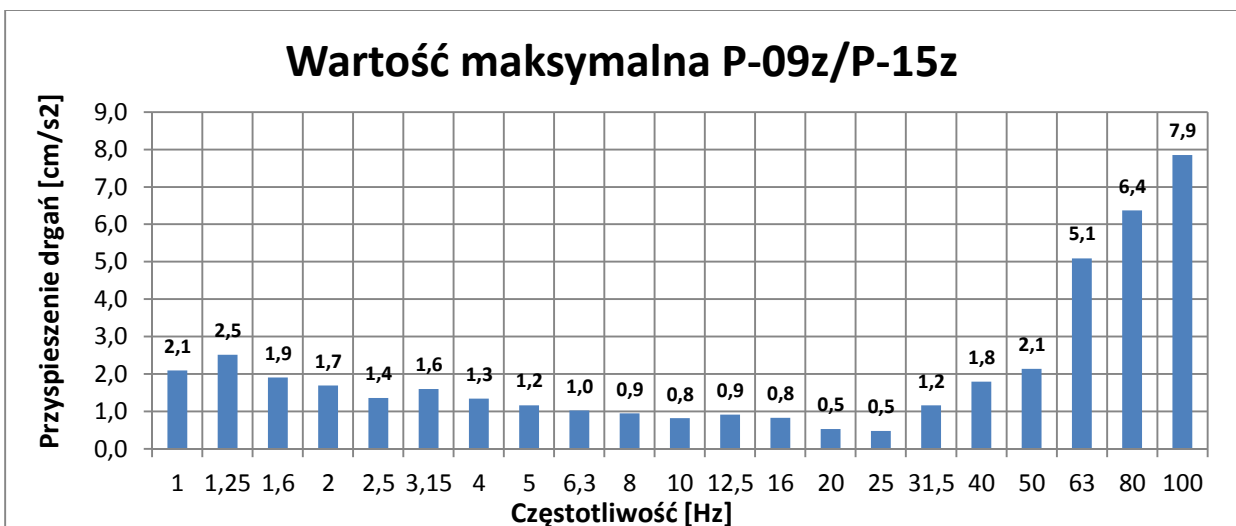
Rys. 3.36. Analiza tercjowa stosunku dla czujników P-09z/P-15z dla wartości średnich z pomiarów

Wartość maksymalna

Rys. 3.37. Analiza tercjowa dla wartości maksymalnych (szczytowych) z pomiaru dla czujnika na stopie piwnicy

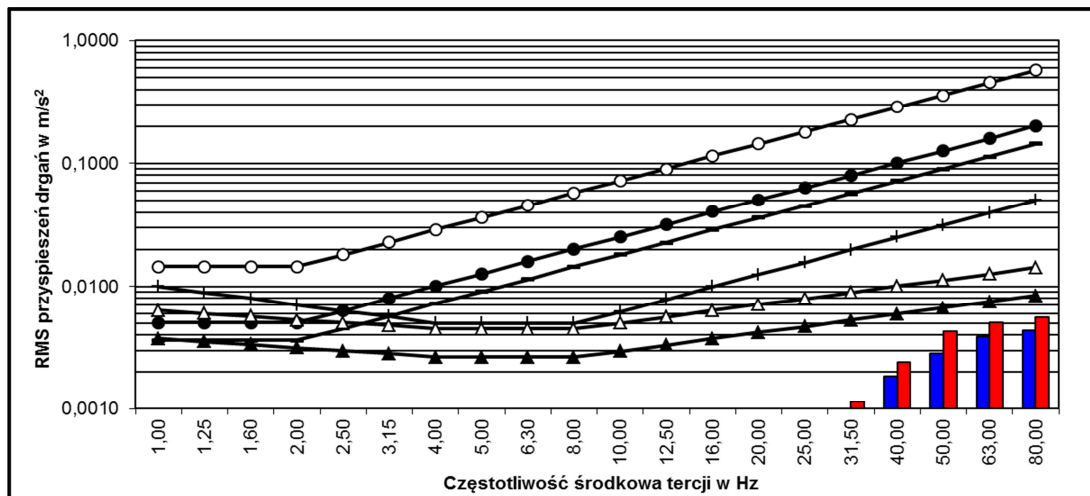


Rys. 3.38. Analiza tercjowa dla wartości maksymalnych (szczytowych) z pomiaru dla czujnika na podłodze parteru



Rys. 3.39. Analiza tercjowa stosunku dla czujników P-09z/P-15z pomierzonych wartości maksymalnych (szczytowych) przyspieszenia drgań

W odniesieniu do wartości maksymalnych RMS (nie uśrednionych wykonano analizę wpływu drgań na ludzi w budynkach (dla kierunku Z):



Rys. 3.40. Analiza tarczowa wpływu drgań na ludzi dla kierunku Z, strop piwnicy – kolor niebieski, podłoga parteru – kolor czerwony

Co prawda, w omawianym przypadku poziom drgań był na tyle niski, że nie przekroczył progu odczuwalności drgań przez ludzi, zachodzi jednak obawa, iż niebawem może wystąpić sytuacja, kiedy drgania te wzrosną, np. na skutek zmiany stanu kół poszczególnych składów. Wtedy, wykonując analizę wpływu drgań na ludzi i opierając się na pomiarze drgań dolnej powierzchni stropu nad piwnicą – zaniża się rzeczywiste wartości przyspieszenia drgań, które mogą się pojawić na podłodze parteru w miejscu odbioru drgań przez ludzi.

PODSUMOWANIE

- Oceniając wpływ drgań na ludzi w budynku można popełnić duży błąd opierając się na danych z wartości maksymalnych przebiegów czasowych. Pomiar powinien być zawsze przeprowadzany w pomieszczeniu przeznaczonym na stały pobyt ludzi. Wyjątek stanowi sytuacja, kiedy znamy współczynnik przeniesienia wartości drgań przez strop – wtedy po przeprowadzeniu uprzednich pomiarów, można wykonywać tego typu badania na stropie pod pomieszczeniem, którego drgania rejestrujemy.
- Ocena wpływu drgań na ludzi wykonana na podstawie pomiarów drgań dolnej powierzchni stropu piwnicy może być obarczona sporym błędem (w zależności od rodzaju stropu i warstw na nim ułożonych – strop może te drgania tłumić, bądź wzmacniać jak w opisanym przypadku) – zawsze, (o ile to możliwe) należy mierzyć drgania w pomieszczeniu gdzie przebywają ludzie. Podobny błąd można popełnić, mierząc drgania w niewykończonym pomieszczeniu przed położeniem podłogi.
- Jeśli monitoruje się drgania na stropie piwnicy – powinniśmy znać ich rzeczywistą wartość w pomieszczeniu mieszkalnym (tzw. kalibracja) – dobrać odpowiedni współczynnik, na podstawie pomiarów funkcji przejścia.
- Wartość maksymalna z analiz ma identyczne spektrum częstotliwościowe w stosunku do

wartości średniej ale wyższą wartość we wszystkich tercjach.

- System rejestruje przyspieszenia drgań tych budynków wywołane przez każdy z pociągów, przejeżdżających w najbliższym tunelu metra. Między innymi w obu obiektach rejestrowane są drgania pionowe wybranego stropu najniższej kondygnacji.
- Ze względów praktycznych czujnik jest umieszczony na stropie piwnicy ale dzięki odpowiednim badaniom kalibracyjnym – pokazuje on wartości takie jak gdyby był umieszczony w pomieszczeniu na podłodze parteru. Dobór miejsca (parter) jest podyktowany faktem, iż zazwyczaj drgania pochodzące od komunikacji podziemnej, generują większe wartości na najniższej kondygnacji, w przeciwieństwie do komunikacji naziemnej (wieloletnie badania prof. K. Stypuły) [por. Stypuła (2001) – Rozdz. 5.3].

4. WYNIKI POMIARÓW I ANALIZ DRGAŃ GENEROWANYCH PRZEJAZDAMI POCIĄGÓW METRA

W niniejszym rozdziale zaprezentowano wyniki pomiarów (wraz z analizami) wykonanych w budynkach i w tunelu metra. Obejmują one zarówno dane pozyskane z systemu ciągłego monitorowania drgań Metra Warszawskiego jak i dane pochodzące z pomiarów doraźnych, wykonanych na tzw. „czwartym profilu pomiarowym”.

Pierwszą część niniejszego rozdziału poświęcono analizom szeroko rozumianego wpływu drgań na konstrukcję budynku wraz z ilościowym przedstawieniem krótkookresowego – dobowego rozkładu drgań odbieranych przez budynek jak też przenoszenia się drgań z tunelu metra na konstrukcję budynku. Analizy przedstawiono zarówno w dziedzinie czasu jak też w dziedzinie częstotliwości. W dalszej części rozdziału zaprezentowano zagadnienie spektrum odpowiedzi. Przedstawiono wpływ tłumienia na zmianę rzędnych przyspieszeniowego spektrum odpowiedzi oraz uwzględniono zmiany spektrum odpowiedzi w przypadku przejazdu jednego z poddanych badaniom składów pociągu metra.

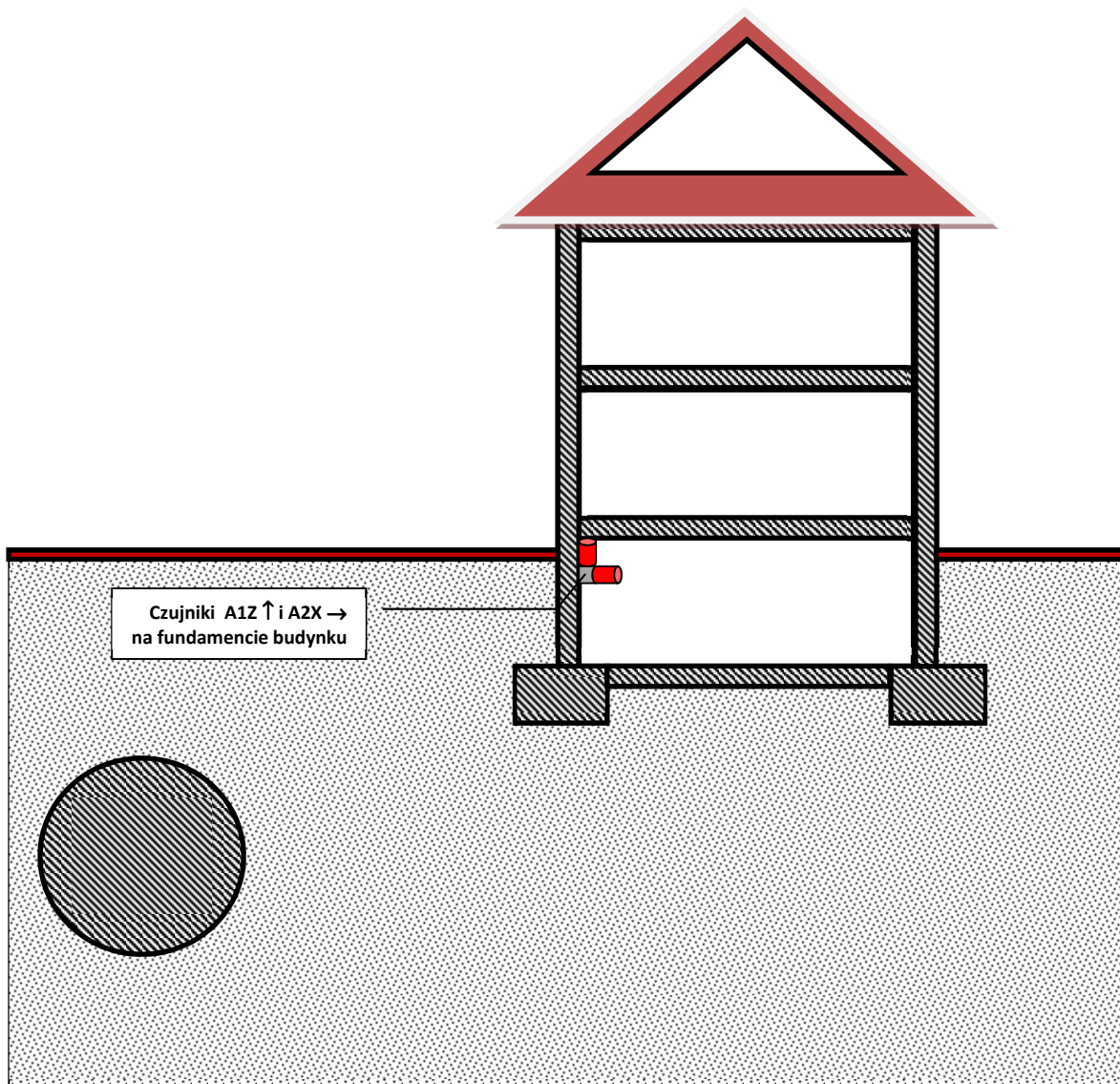
W drugiej części rozdziału 4, poświęconej w całości wpływowi drgań na ludzi przebywających w budynku zaprezentowano dobowy (krótkookresowy) i wielotygodniowy (długookresowy) rozkład wartości wskaźnika WODL opracowany na podstawie dostępnych danych.

W części poświęconej analizie trendu długookresowego przedstawiono obwiednię maksymalną wartości WODL, która jest próbą wyznaczenia doświadczonego wskaźnika diagnostycznego. Może on okazać się pomocny w przypadku uwzględniania możliwych wpływów dynamicznych od eksploatowanej linii metra w projektowaniu nowych budynków.

4.1. Wpływ drgań na konstrukcję budynków

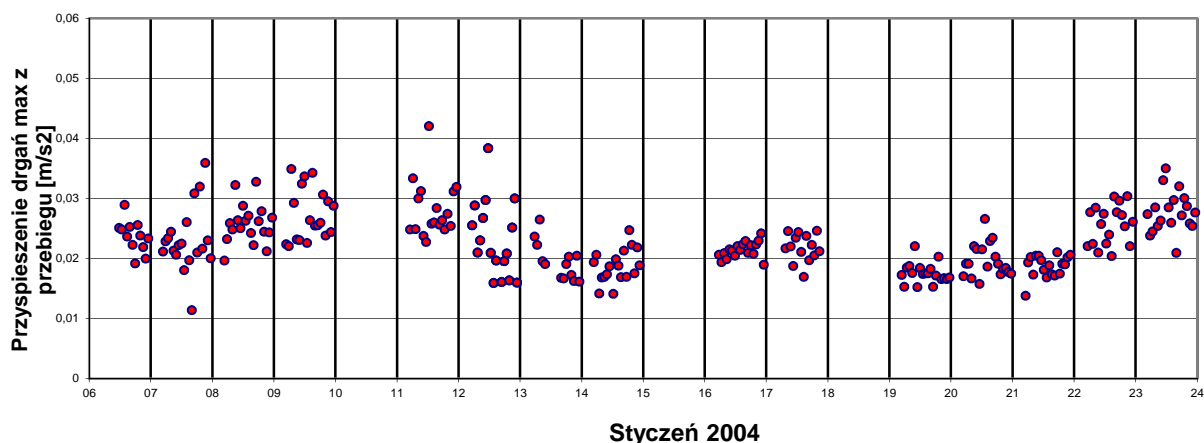
4.1.1. Dobowy (krótkookresowy) rozkład drgań

System rejestruje przyspieszenia drgań monitorowanych budynków (w wybranych punktach) wywołane przez każdy z pociągów, przejeżdżających w najbliższym tunelu metra. Między innymi w obu obiektach rejestrowane są drgania poziome (kierunek prostopadły do osi tunelu) oraz pionowe najniższej kondygnacji (w poziomie terenu). Dla każdego przebiegu czasowego drgań ustalana jest maksymalna wartość szczytowa przyspieszeń (MAX). Dobowy rozkład tych wartości uzyskany podczas przejazdów wybranych pociągów typu Metropolis (pociąg nr 18) omówiono na przykładzie budynku N118.

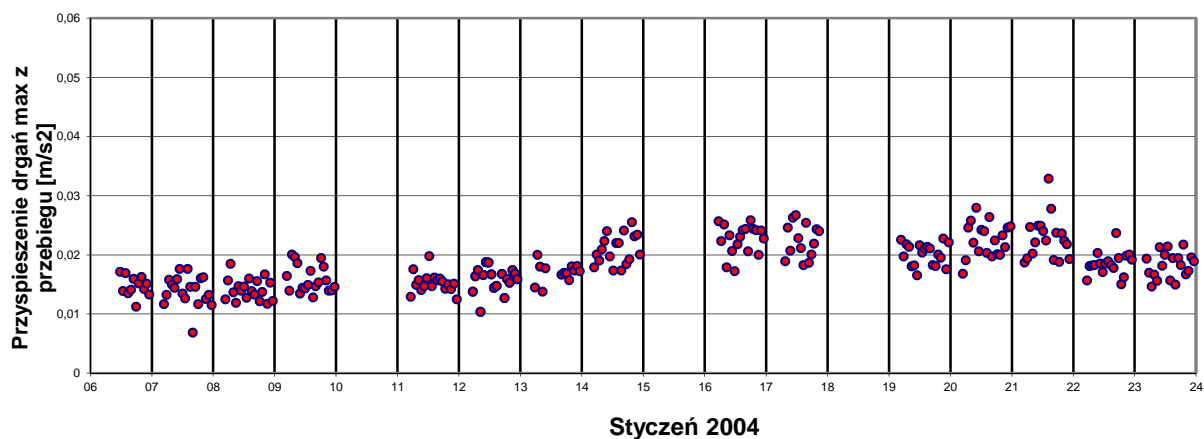


Rys. 4.1.1. Schemat ideowy rozmieszczenia akcelerometrów do pomiaru wymuszenia kinematycznego konstrukcji budynku

Na rys. 4.1.2. i 4.1.3 przedstawiono, dla wybranego miesiąca, dobowe rozkłady maksymalnych wartości szczytowych (MAX) przyspieszeń drgań poziomych (A2X) oraz pionowych (A1Z) z przebiegu czasowego w całym paśmie częstotliwości (nie z analizy w 1/3 oktawowych pasmach częstotliwości) drgań budynku N118 zarejestrowanych odpowiednio podczas kolejnych przejazdów pociągu nr 18. Traktując wartość MAX jako zmienną losową X podano w tabelach 4.1.1 i 4.1.2 charakterystyki rozkładu dobowego tych wartości.



Rys. 4.1.2. Dobowe rozkłady wartości MAX przyspieszeń drgań pionowych (A1Z) budynku N118 zarejestrowanych podczas przejazdów pociągu (typu Metropolis) nr 18 w styczniu 2004



Rys. 4.1.3. Dobowe rozkłady wartości MAX przyspieszeń drgań poziomych (A2X) budynku N118 zarejestrowanych podczas przejazdów pociągu (typu Metropolis) nr 18 w styczniu 2004 (kierunek x jest zgodny z kierunkiem propagacji drgań od tunelu do budynku)

Tab. 4.1.1. Charakterystyki rozkładu dobowego wartości MAX przyspieszeń drgań pionowych budynku N118 podczas przejazdów pociągu 18 (czujnik A1Z)

Data	Liczba przejazdów	X_{\max} [cm/s ²]	$X_{\text{śr}}$ [cm/s ²]	σ [cm/s ²]	$(X_{\max} - X_{\text{śr}} / X_{\text{śr}}) * 100\%$
06.01	12	2,89	2,36	0,26	22,5
07.01	19	3,59	2,30	0,54	55,8
08.01	19	3,27	2,57	0,33	27,2
09.01	19	3,49	2,72	0,43	28,0
11.01	18	4,20	2,81	0,46	49,7
12.01	17	3,84	2,35	0,61	65,9
13.01	13	2,65	1,95	0,31	35,7
14.01	18	2,47	1,87	0,28	32,1
16.01	18	2,41	2,14	0,13	13,0
17.01	14	2,46	2,17	0,23	13,0
19.01	19	2,20	1,75	0,17	25,7
20.01	19	2,66	1,96	0,28	35,4
21.01	18	2,10	1,87	0,18	12,5
22.01	18	4,74	2,67	0,61	18,7
23.01	19	3,50	2,77	0,34	26,5

Tab. 4.1.2. Charakterystyki rozkładu dobowego wartości MAX przyspieszeń drgań poziomych budynku N118 podczas przejazdów pociągu 18 (czujnik A2X)

Data	Liczba przejazdów	X_{\max} [cm/s ²]	$X_{\text{śr}}$ [cm/s ²]	σ [cm/s ²]	$(X_{\max}-X_{\text{śr}}/X_{\text{śr}})*100\%$
06.01	12	1,71	1,47	0,17	16,3
07.01	19	1,76	1,39	0,26	26,5
08.01	19	1,85	1,41	0,18	30,8
09.01	19	2,00	1,59	0,23	26,2
11.01	18	1,98	1,53	0,16	29,7
12.01	13	1,88	1,62	0,17	15,7
13.01	13	2,00	1,70	0,16	17,5
14.01	18	2,55	2,09	0,25	22,1
16.01	18	2,58	2,26	0,25	14,1
17.01	14	2,67	2,24	0,29	19,1
19.01	19	2,28	2,01	0,19	13,2
20.01	19	2,79	2,25	0,29	24,0
21.01	18	3,29	2,28	0,36	44,0
22.01	18	2,37	1,80	0,33	28,0
23.01	19	2,17	1,82	0,22	19,3

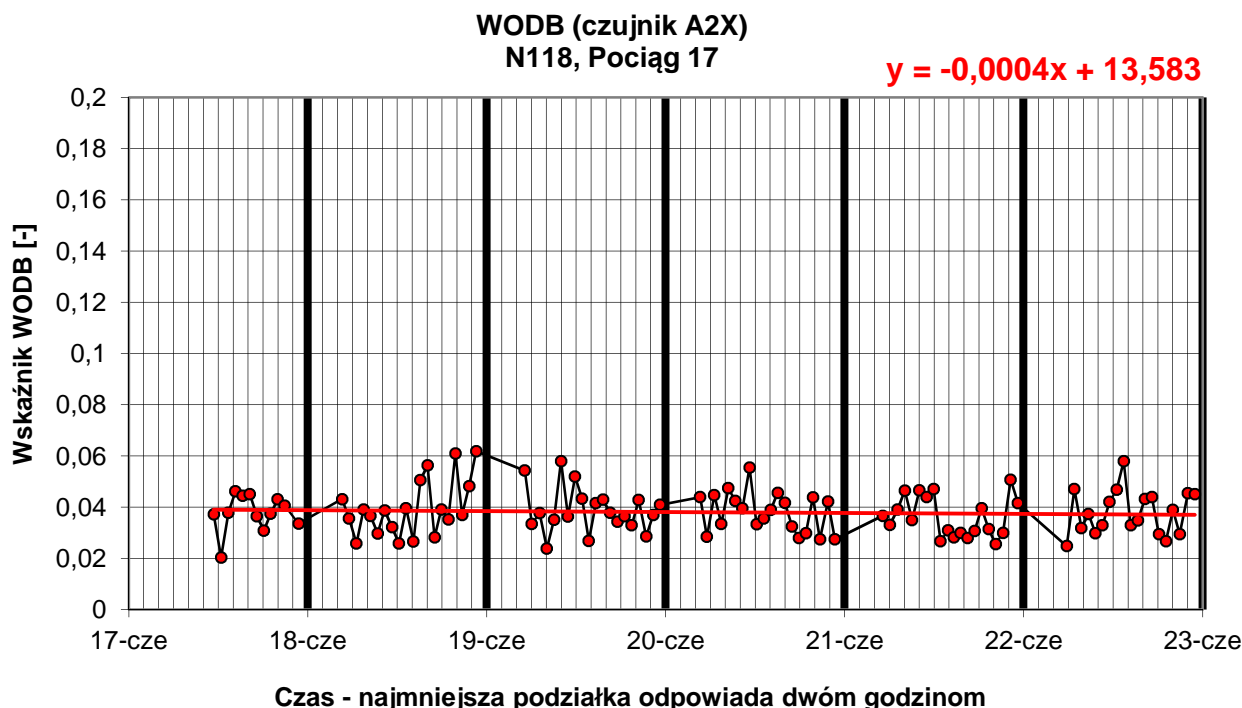
Różnice pomiędzy maksymalną a średnią wartością MAX (maksymalna wartość przyspieszenia drgań określona dla każdego przebiegu czasowego w całym badanym paśmie częstotliwości) wynosiły w ciągu doby dla czujnika A1Z (pionowego) od **12% do 66%**, zaś dla czujnika A2X (poziomego) od **14% do 44%**. Jedną z przyczyn występowania tych różnic, mogą być zachodzące w ciągu doby zmiany napełnienia pociągów pasażerami. Podane wartości odchylenia mogą być traktowane jako oszacowanie maksymalnej różnicy pomiędzy wartościami (MAX) uzyskanymi z pomiarów doraźnych, a wartościami maksymalnymi, jakie potencjalnie mogą wystąpić w cyklu dobowym.

Poniżej w tabelach 4.1.3 do 4.1.6 oraz na rys. 4.1.4 do 4.1.7 zaprezentowano wyniki z analiz częstotliwościowych (tercjowych) gdzie pojedynczy punkt oznacza wartość wskaźnika odczuwalności drgań przez budynek WODB (patrz Rozdział 2).

Tab. 4.1.3. Wybrane dobowe rozkłady wartości WODB drgań poziomych (A2X) budynku N118 wywołanych przejazdem pociągu typu Metropolis nr 17 – wyniki analiz w pasmach tercjowych

Pociąg	Data	Liczba przejazdów	WODB max	WODB śr	Odch. std.	$[(WODB_{max}-WODB_{śr})/WODB_{śr}]*100\%$
17	17.06	12	0,0462	0,0377	0,0072	46,2
	18.06	20	0,0618	0,0395	0,0111	34,7
	19.06	20	0,0580	0,0388	0,0087	49,5
	20.06	20	0,0554	0,0381	0,0079	45,6
	21.06	20	0,0507	0,0360	0,0078	30,6
	22.06	19	0,0579	0,0379	0,0087	52,8
Wartość maksymalna			0,0618	0,0395	0,0111	52,8
Wartość średnia			0,0550	0,0380	0,0086	43,2
Wartość minimalna			0,0462	0,0360	0,0072	30,6
Odchylenie standardowe			0,0057	0,0012		

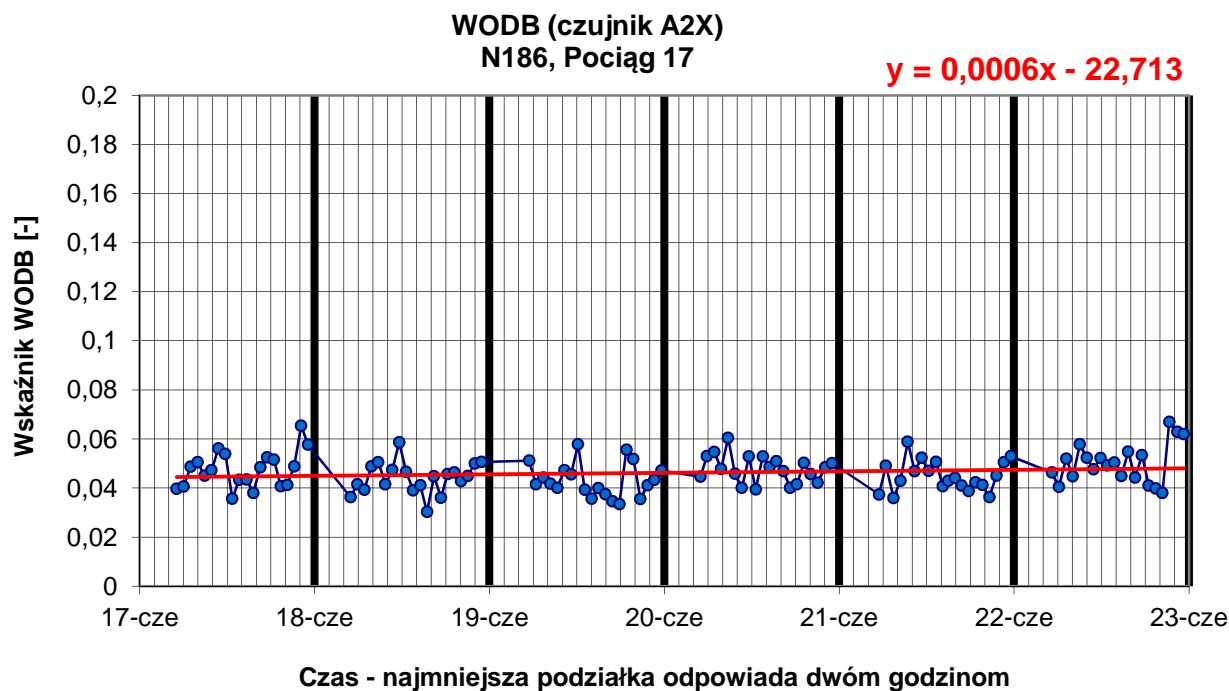
Cztery ostatnie wiersze w tabeli 4.1.3. prezentują kolejno: wartość maksymalną policzoną ze wszystkich przejazdów składu pociągu nr 17 i zaprezentowaną w kolumnie WODB max dla kolejnych dni (wystąpiła 18 czerwca w analizowanym okresie), analogicznie wartość średnią i minimalną (wykazana 12 czerwca w badanym okresie). Odchylenie standardowe policzono dla maksymalnych, średnich i minimalnych wartości WODB oraz dla rozrzutu wartości maksymalnej wokół wartości średniej WODB.



Rys. 4.1.4. Wybrane dobowe rozkłady wartości WODB drgań poziomych (A2X) budynku N118 wywołanych przejazdem pociągu typu Metropolis nr 17 – wyniki analiz tercyjnych

Tab. 4.1.4. Wybrane dobowe rozkłady wartości WODB drgań poziomych (A2X) budynku N186 wywołanych przejazdem pociągu typu Metropolis nr 17 – wyniki analiz tercyjnych

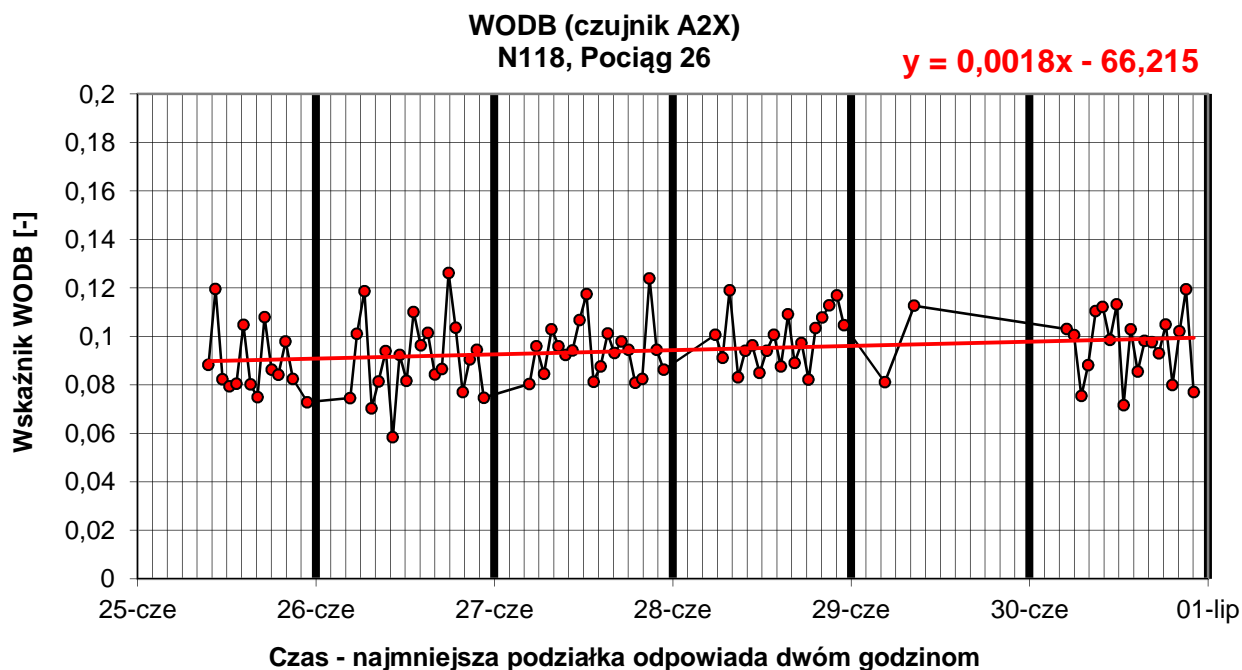
Pociąg	Data	Liczba przejazdów	WODB max	WODB śr	Odch std.	$[(WODB_{max} - WODB_{śr}) / WODB_{śr}] * 100\%$
17	17.06	20	0,0654	0,0398	0,0475	37,9
	18.06	20	0,0587	0,0363	0,0441	32,9
	19.06	20	0,0578	0,0512	0,0433	33,7
	20.06	20	0,0604	0,0447	0,0479	26,3
	21.06	20	0,0588	0,0449	0,0061	31,1
	22.06	20	0,0669	0,0463	0,0501	33,6
Wartość maksymalna			0,0669	0,0512	0,0501	37,9
Wartość średnia			0,0614	0,0439	0,0398	32,6
Wartość minimalna			0,0578	0,0363	0,0061	26,3
Odchylenie standardowe			0,0039	0,0052		



Rys. 4.1.5. Wybrane dobowe rozkłady wartości WODB drgań poziomych (A2X) budynku N186 wywołanych przejazdem pociągu typu Metropolis nr 17 – wyniki analiz tercjowych

Tab. 4.1.5. Wybrane dobowe rozkłady wartości WODB drgań poziomych (A2X) budynku N118 wywołanych przejazdem pociągu typu Metropolis nr 26 – wyniki analiz tercjowych

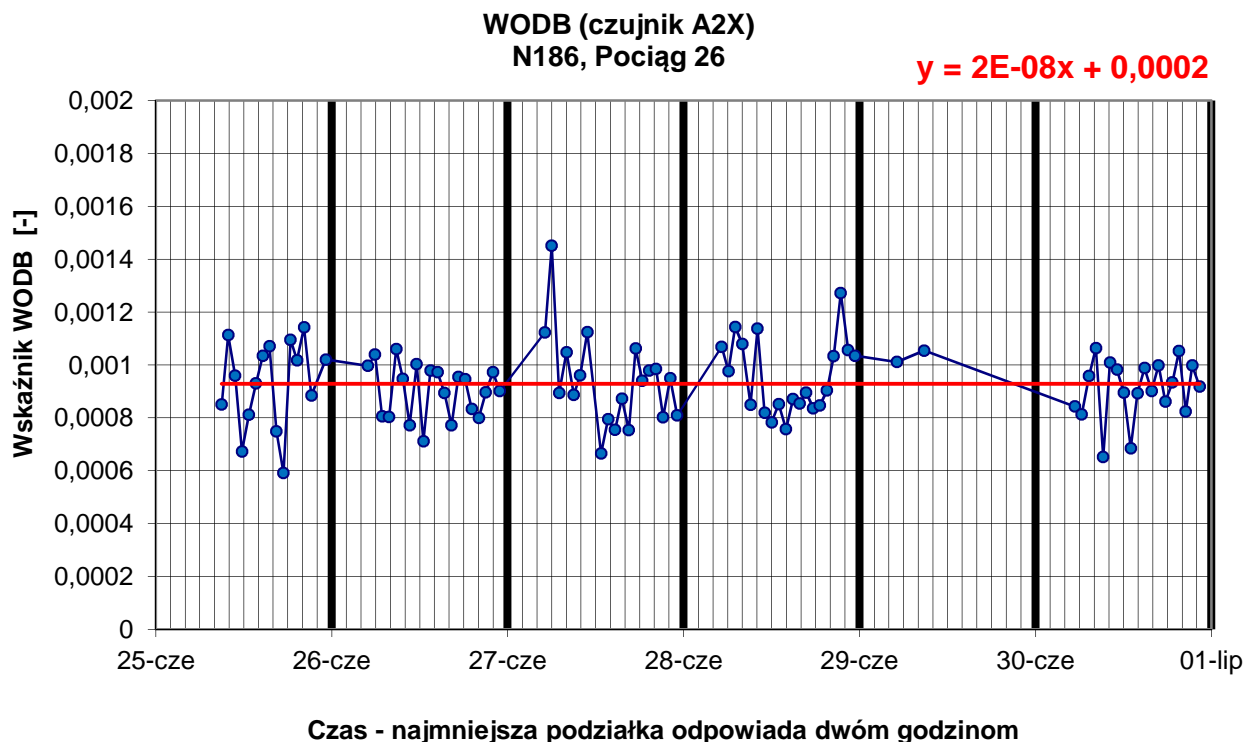
Pociąg	Data	Liczba przejazdów	WODB max	WODB śr	Odch std.	$[(WODB_{max} - WODB_{śr}) / WODB_{śr}] * 100\%$
26	25.06	14	0,1196	0,0887	0,0137	34,9
	26.06	20	0,1261	0,0909	0,0166	38,8
	27.06	20	0,1239	0,0947	0,0117	30,9
	28.06	19	0,1191	0,0987	0,0111	20,7
	29.06	2	0,1127	0,0811	0,0969	16,3
	30.06	19	0,1194	0,1030	0,0965	23,7
Wartość maksymalna			0,1261	0,1030	0,0969	38,8
Wartość średnia			0,1201	0,0928	0,0411	27,5
Wartość minimalna			0,1127	0,0811	0,0111	16,3
Odchylenie standardowe			0,0047	0,0077		



Rys. 4.1.6. Wybrane dobowe rozkłady wartości WODB drgań poziomych (A2X) budynku N118 wywołanych przejazdem pociągu typu Metropolis nr 26 – wyniki analiz tercjowych

Tab. 4.1.6. Wybrane dobowe rozkłady wartości WODB drgań poziomych (A2X) budynku N186 wywołanych przejazdem pociągu typu Metropolis nr 26 – wyniki analiz tercjowych.

Pociąg	Data	Liczba przejazdów	WODB max	WODB śr	Odch std.	$[(WODB_{max} - WODB_{śr}) / WODB_{śr}] * 100\%$
26	25.06	15	0,0011	0,0009	0,0009	23,7
	26.06	20	0,0011	0,0010	0,0009	17,4
	27.06	19	0,0015	0,0011	0,0009	54,4
	28.06	20	0,0013	0,0011	0,0010	33,4
	29.06	2	0,0011	0,0010	0,0010	2,1
	30.06	19	0,0011	0,0008	0,0009	17,1
Wartość maksymalna			0,0015	0,0011	0,0010	54,4
Wartość średnia			0,0012	0,0010	0,0009	24,7
Wartość minimalna			0,0011	0,0008	0,0009	2,1
Odchylenie standardowe			0,0002	0,0001		



Rys. 4.1.7. Wybrane dobowe rozkłady wartości WODB drgań poziomych (A2X) budynku N186 wywołanych przejazdem pociągu typu Metropolis nr 26 – wyniki analiz tercjowych

Rozrzut wartości maksymalnej WODB wokół wartości średniej WODB wynosił dla składu 17 od 53-31% (średnia 43,2) w ciągu sześciu dni dla lokalizacji N118 – przy odchyleniu standardowym danych na poziomie 0,0086. Dla lokalizacji N186 w tym samym czasie rozrzut wartości WODB odnotowano na poziomie 38-26% dla tego samego składu pociągu przy średniej wartości 32,6 (wartość odchylenia standardowego danych to 0,0398).

Skład nr 26 przejeżdżając w sąsiedztwie monitorowanych budynków, generował odpowiednie drgania, których rozrzut wartości maksymalnej WODB wokół wartości średniej WODB mieści się w zakresie 39 – 16 (wartość średnia 27,5) dla lokalizacji N118 przy odchyleniu standardowym równym 0,0411. Rozrzut wartości WODB w drugiej lokalizacji pomiarowej (N186) w tym samym czasie jest odnotowany w zakresie 55 – 2 (wartość średnia 24,7) przy odchyleniu standardowym równym 0,0009.

Badane dwa pociągi tego samego typu (METROPOLIS) nr 17 i nr 26 przez sześć kolejnych dni podczas przejazdów w sąsiedztwie budynku N118 generują drgania o różnym poziomie intensywności.

W przypadku pociągu nr 17 wartość 0,0380 (przy budynku N118) i 0,0614 (przy budynku N186). Zauważalna jest różnica prawie dwukrotna w poziomie rejestrowanych drgań na konstrukcji budynku. Podczas przejazdów pociągu nr 26 poziom ten oscylował wokół wartości 0,0928 (budynek N118) i 0,0010 (dla budynku N186). Zaobserwowano praktycznie dziewięciokrotną różnicę w poziomie

generowanych drgań w zależności od lokalizacji składu pociągu.

Wytłumaczeniem zaistniałego faktu może być różny stan kół obu pociągów, a obserwowany rozrzut wartości może być spowodowany dobowymi zmianami wypełnienia pasażerami.

Analogicznie sytuacja przedstawia się w przypadku drugiego z badanych przekrojów pomiarowych N186. Można zatem stwierdzić, że główną przyczyną, która ma wpływ na dobowy rozrzut odpowiedzi dynamicznej budynku jest stan wypełnienia składu podróżnymi, a w dłuższych okresach czasu na wzrost poziomu generowanych drgań wpływa stan kół (stopień owalizacji) poszczególnych składów pociągów.

4.1.2. Przenoszenie drgań w układzie tunel-budynek



Rys. 4.1.8. Widok budynku przy ul. Słowackiego

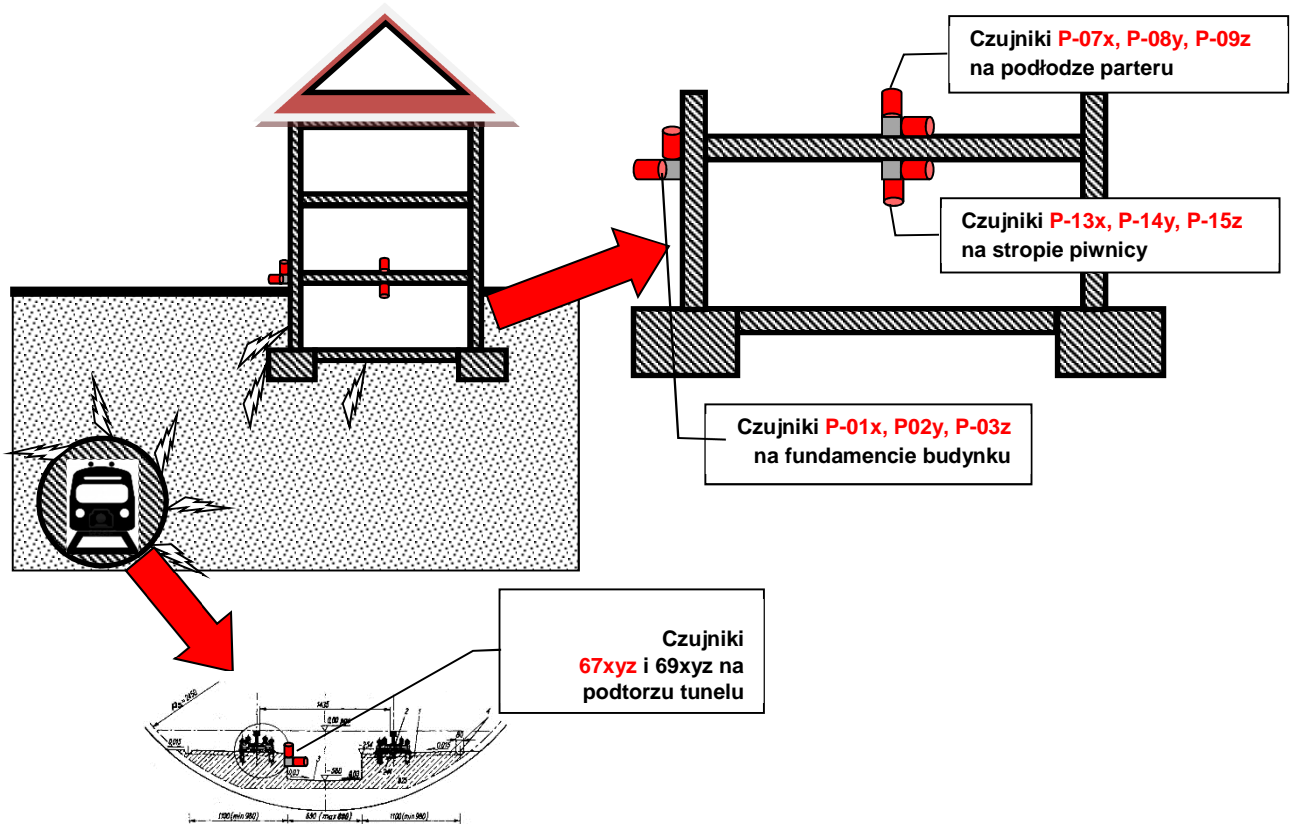
W związku z badaniami dotyczącymi modernizacji nawierzchni torowej, pojawiła się możliwość uzyskania dodatkowych danych pomiarowych, które są komplementarne do danych z systemu ciągłego monitoringu drgań – innymi słowy udało się uzyskać czasowo – czwarty profil pomiarowy. Dokładny opis budynku (rys. 4.1.8) objętego tymi dodatkowymi badaniami znajduje się w rozdziale 3 – Metodyka Pomiarów i Analiz.

System ciągłego monitoringu drgań zaimplementowany w Metrze Warszawskim jest o tyle unikatowy, że profil pomiarowy składa się z dwóch części: pierwszej zainstalowanej w budynku (pomiar wpływu drgań na budynek i na ludzi w nim przebywających) i drugiej w tunelu (rys. 4.1.9), ściślej w przekroju tunelu sąsiadującym z wybranym budynkiem.



Rys. 4.1.9. Widok tunelu przy ul. Słowackiego w sąsiedztwie badanego budynku

W tymczasowym profilu pomiarowym (rys. 4.1.10, 4.1.11) uzyskano niemal identyczne warunki rejestracji z tym, że pomiary wykonano we wszystkich trzech kierunkach x – prostopadły do kierunku jazdy, y – równoległy do kierunku jazdy i z – pionowy (w systemie monitoringu dostępne są tylko dwa kierunki x i z).

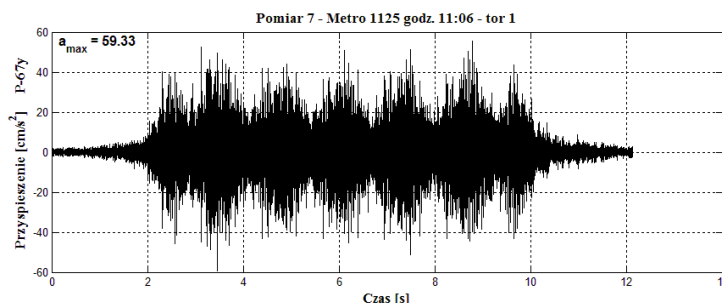


Rys. 4.1.10. Schemat ideowy tymczasowego przekroju pomiarowego



Rys. 4.1.11. Rozmieszczenie punktów pomiarowych na budynku i w tunelu metra na tzw. „czwartym przekroju” tymczasowym

Uzyskany w ten sposób poligon pomiarowy wykorzystano do przeprowadzenia bardziej szczegółowych analiz między innymi określenia funkcji przejścia dla układu tunel-budynek. Czujniki drgań zamocowano na konstrukcji budynku jak też w tunelu metra we wzajemnie prostopadłych kierunkach i w ten sposób uzyskano dane w postaci przebiegów czasowych przyspieszenia drgań (rys. 4.1.12).



Rys. 4.1.12. Przykładowy przebieg czasowy przyspieszenia drgań zarejestrowany w tunelu metra w sąsiedztwie budynku S32/36

Przejazdy rejestrowano w ciągu dnia przez dwa niezależne systemy pomiarowe (jeden w tunelu a drugi w budynku) z uwagi na brak technicznych możliwości wykorzystania jednego systemu pomiarowego. Następnie po uzyskaniu z Metra Warszawskiego danych dotyczących czasu przejazdów poszczególnych składów w interesującym nas okresie –przeprowadzono identyfikację poszczególnych przejazdów (zidentyfikowano poszczególne składy na podstawie dokładnego czasu przejazdu).

Kolejny krok polegał na dobraniu w parę przebiegów czasowych drgań zarejestrowanych na dwóch niezależnych stanowiskach pomiarowych (tunel i budynek) podczas tego samego przejazdu pociągu. Przysporzyło to nieco kłopotów z uwagi na fakt, że część przejazdów realizowanych drugim torem (dalszym od budynku) nie była widoczna w postaci przebiegów czasowych na budynku – sygnał od przejazdu był niemożliwy do wyłonienia z poziomu szumów.

Dodatkowo oba stanowiska pomiarowe rozpoczęły rejestrację z pewnym przesunięciem czasowym, co spowodowało, że numery pomiarów w tunelu były różne od numerów pomiarów w budynku i należało te rejestracje skorelować - Tab. 4. 1.7.

Tab. 4.1.7. Zestawienie wraz z identyfikacją poszczególnych przejazdów w parach tunel-budynek

P-67x podtorze tunelu (MAX)

NAZWA POMIARU
Pomiar 01 - Metro 0909 godz. 10:53 - tor 1
Pomiar 02 - Metro 2011 godz. 10:57 - tor 2
Pomiar 03 - Metro 1033 godz. 10:00 - tor 1
Pomiar 05 - Metro 2215 godz. 11:02 - tor 1
Pomiar 07 - Metro 1125 godz. 11:06 - tor 1
Pomiar 09 - Metro 2308 godz. 11:09 - tor 1
Pomiar 10 - Metro 2103 godz. 11:12 - tor 2
Pomiar 12 - Metro 1228 godz. 11:16 - tor 1
Pomiar 13 - Metro 1302 godz. 11:19 - tor 1
Pomiar 15 - Metro 0129 godz. 11:21 - tor 1
Pomiar 17 - Metro 1438 godz. 11:26 - tor 1
Pomiar 19 - Metro 0230 godz. 11:29 - tor 1
Pomiar 21 - Metro 1534 godz. 11:33 - tor 1
Pomiar 23 - Metro 0337 godz. 11:38 - tor 1
Pomiar 25 - Metro 1604 godz. 11:41 - tor 1
Pomiar 27 - Metro 0414 godz. 11:44 - tor 1
Pomiar 29 - Metro 1707 godz. 11:47 - tor 1
Pomiar 31 - Metro 0505 godz. 11:51 - tor 1
Pomiar 33 - Metro 1806 godz. 11:55 - tor 1
Pomiar 35 - Metro 1924 godz. 11:58 - tor 1
Pomiar 37 - Metro 0414 godz. 12:04 - tor 2
Pomiar 38 - Metro 2011 godz. 12:07 - tor 1
Pomiar 40 - Metro 0617 godz. 12:09 - tor 1
Pomiar 41 - Metro 0713 godz. 12:12 - tor 1
Pomiar 43 - Metro 0801 godz. 12:15 - tor 1
Pomiar 45 - Metro 2103 godz. 12:20 - tor 1
Pomiar 47 - Metro 0923 godz. 12:23 - tor 1
Pomiar 49 - Metro 1033 godz. 12:26 - tor 1
Pomiar 51 - Metro 1125 godz. 12:33 - tor 1

P-01x poziom gruntu (MAX)

NAZWA POMIARU
Pomiar 13 - Metro 0909 godz. 10:54 - tor 1
Pomiar 14 - Metro 2011 godz. 10:58 - tor 2
Pomiar 15 - Metro 1033 godz. 11:00 - tor 1
Pomiar 16 - Metro 2215 godz. 11:03 - tor 1
Pomiar 17 - Metro 1125 godz. 11:07 - tor 1
Pomiar 18 - Metro 2308 godz. 11:10 - tor 1
Pomiar 19 - Metro 2103 godz. 11:12 - tor 1
Pomiar 20 - Metro 1228 godz. 11:16 - tor 1
Pomiar 21 - Metro 1302 godz. 11:19 - tor 1
Pomiar 22 - Metro 0129 godz. 11:22 - tor 1
Pomiar 23 - Metro 1438 godz. 11:26 - tor 1
Pomiar 24 - Metro 0230 godz. 11:29 - tor 1
Pomiar 25 - Metro 1534 godz. 11:34 - tor 1
Pomiar 26 - Metro 0337 godz. 11:39 - tor 1
Pomiar 27 - Metro 1604 godz. 11:42 - tor 1
Pomiar 28 - Metro 0414 godz. 11:44 - tor 1
Pomiar 29 - Metro 1707 godz. 11:47 - tor 1
Pomiar 30 - Metro 0505 godz. 11:52 - tor 1
Pomiar 31 - Metro 1806 godz. 11:55 - tor 1
Pomiar 32 - Metro 1924 godz. 11:58 - tor 1
Pomiar 33 - Metro 0414 godz. 12:05 - tor 2
Pomiar 34 - Metro 2011 godz. 12:07 - tor 1
Pomiar 35 - Metro 0617 godz. 12:10 - tor 1
Pomiar 36 - Metro 0713 godz. 12:13 - tor 1
Pomiar 37 - Metro 0801 godz. 12:15 - tor 1
Pomiar 38 - Metro 2103 godz. 12:21 - tor 1
Pomiar 39 - Metro 0923 godz. 12:24 - tor 1
Pomiar 40 - Metro 1033 godz. 12:27 - tor 1
Pomiar 42 - Metro 1125 godz. 12:33 - tor 1

Po wykonaniu tych prac przygotowawczych można było wykonać bardziej szczegółowe analizy związane z zagadnieniem przenoszenia się fali przez obudowę tunelu na konstrukcję budynku.

Analiza przenoszenia drgań tunel-budynek

W tej części przedstawiono przykładowe wyniki analiz uzyskane w wyniku obliczeń. W pierwszej kolejności wnikliwej analizie poddano wartości maksymalne przyspieszenia drgań z przebiegów czasowych i określono dla par tunel-budynek procent przejścia w tym układzie.

4.1.2.1. Analiza w dziedzinie czasu

Poniżej zamieszczono wyniki analiz wykonanych na podstawie zarejestrowanych przebiegów czasowych przyspieszenia drgań w celu oszacowania wartości współczynnika przeniesienia drgań W_p [porównaj Stypuła K. (2001)].

Transmitancję $H(\omega)$ [por. rys. 3.1. Rozdział 3 „Metodyka pomiarów i analiz”] można wyznaczyć dokonując przekształcenia Fouriera odpowiedzi impulsowej układu:

$$H(i\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau)e^{-i\omega\tau} d\tau \quad (4.1.1)$$

Transmitancja $H(\omega)$ określa odpowiedź konstrukcji przy ustalonym wzbudzeniu: $1e^{-i\omega t}$. Opisuje ona w sposób jednoznaczny układ w dziedzinie częstotliwości, podobnie jak funkcja $h(\tau)$ w dziedzinie czasu. Transmitancja funkcji f jest w przypadku ogólnym wielkością zespoloną:

$$H(f) = A(f) + iB(f) = |H(f)|e^{-i\phi(f)} \quad (4.1.2)$$

gdzie:

$H(f)$ – współczynnik wzmocnienia

$\phi(f)$ – współczynnik fazowy

Moduł funkcji $H(f)$ nazywa się współczynnikiem wzmocnienia, a argument $\phi(f)$ współczynnikiem fazowym układu. Mają one prostą interpretację fizyczną. Mianowicie jeżeli na wejściu układu działa sygnał harmoniczny o częstotliwości f , istniejący w nieskończonym przedziale czasu, to na wyjściu układu pojawi się także sinusoidalny sygnał o tej samej częstotliwości. Stosunek wartości sygnałów na wyjściu i na wejściu układu jest równy współczynnikowi wzmocnienia układu $|H(f)|$, a przesunięcie fazy sygnału na wyjściu względem sygnału na wejściu równe jest współczynnikowi fazowemu $\phi(f)$. Pomiedzy spektrum gęstości mocy wzbudzenia $S_x(\omega)$, a spektrum gęstości mocy odpowiedzi $S_y(\omega)$ istnieje związek:

$$S_y(\omega) = |H(i\omega)|^2 \cdot S_x(\omega) \quad (4.1.3)$$

W przypadku prognozowania wpływu drgań na konstrukcję projektowanego budynku, który ma powstać w sąsiedztwie istniejącego źródła drgań parasejsmicznych, istotne jest określenie współczynnika wzmocnienia – czyli stopnia w jakim drgania będą przenoszone z gruntu (lub źródła – w tym przypadku z podtorza tunelu metra) na budynek. Znajomość tego współczynnika umożliwia prognozowanie drgań budynku na podstawie pomierzonych, w miejscu jego planowanej lokalizacji, drgań powierzchni gruntu. Poniżej zaprezentowano zmodyfikowany współczynnik wzmocnienia pod zmienioną nazwą na współczynnik przeniesienia drgań W_p . Jest to współczynnik określony na podstawie porównania maksymalnych wartości przyspieszenia drgań budynku (na fundamencie w poziomie terenu) A_{max}^b i drgań podtorza tunelu metra A_{max}^t . Można go nazwać globalnym współczynnikiem przeniesienia (w odróżnieniu od współczynników określanych w poszczególnych pasmach widma):

$$W_p = \frac{A_{max}^b}{A_{max}^t} \quad (4.1.4)$$

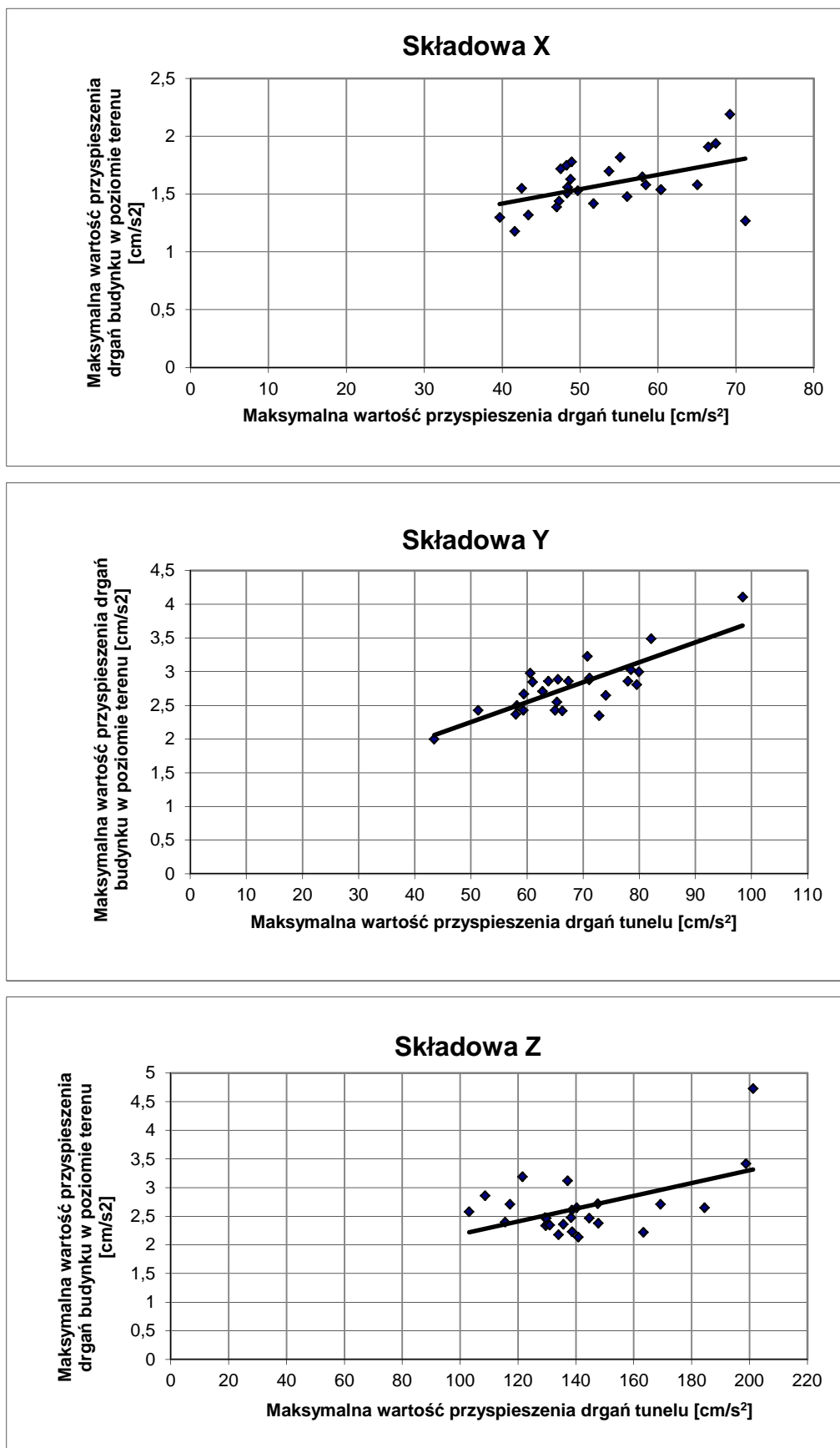
Poniżej w tabeli 4.1.8 zestawiono wyniki pomiarów dla pomiarów wykonanych dla budynku M22A – czwartego dodatkowego profilu pomiarowego, którego usytuowanie opisano w rozdziale 3 „Metodyka pomiarów i analiz”.

Tab. 4.1.8. Analiza wartości maksymalnych z przebiegów czasowych układu tunel-budynek

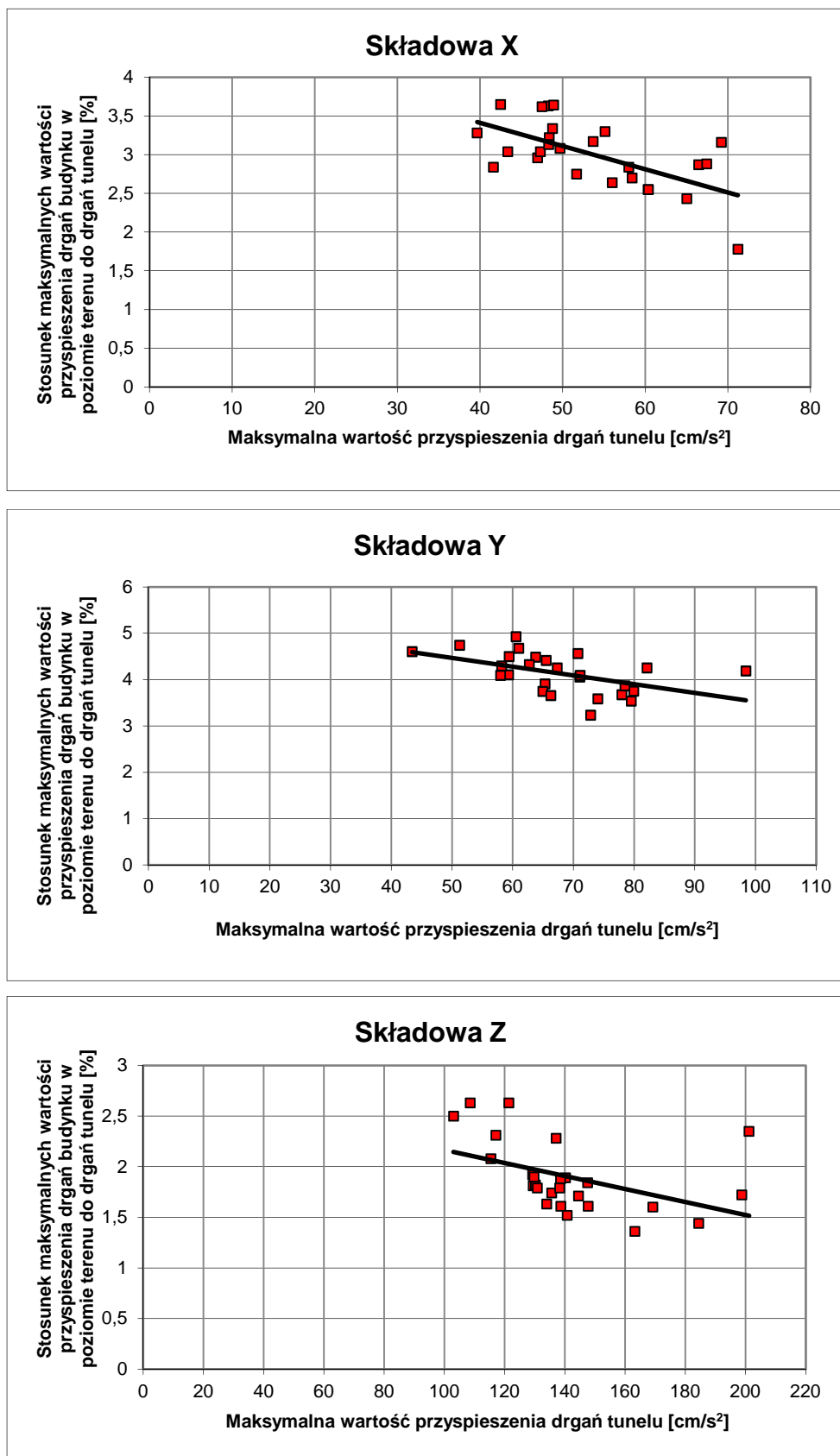
OPIS	P-67x tunel [cm/s ²]	P-01x budynek [cm/s ²]	W _p kierunek X	P-67y tunel [cm/s ²]	P-02y budynek [cm/s ²]	W _p kierunek Y	P-67z tunel [cm/s ²]	P-03z budynek [cm/s ²]	W _p kierunek Z
Pomiar 01 - Metro 909 godz. 10:53 - tor 1	60,37	1,54	2,55	70,76	3,23	4,56	147,56	2,72	1,84
Pomiar 03 - Metro 1033 godz. 10:00 - tor 1	58	1,65	2,84	63,79	2,86	4,48	129,52	2,34	1,81
Pomiar 05 - Metro 2215 godz. 11:02 - tor 1	48,39	1,56	3,22	65,32	2,55	3,9	140,8	2,14	1,52
Pomiar 07 - Metro 1125 godz. 11:06 - tor 1	71,21	1,27	1,78	59,33	2,43	4,1	137,12	3,12	2,28
Pomiar 09 - Metro 2308 godz. 11:09 - tor 1	58,43	1,58	2,7	72,85	2,35	3,23	147,73	2,38	1,61
Pomiar 12 - Metro 1228 godz. 11:16 - tor 1	42,51	1,55	3,65	51,27	2,43	4,74	121,49	3,19	2,63
Pomiar 13 - Metro 1302 godz. 11:19 - tor 1	43,37	1,32	3,04	64,99	2,43	3,74	144,6	2,47	1,71
Pomiar 15 - Metro 129 godz. 11:21 - tor 1	66,47	1,91	2,87	77,98	2,86	3,67	169,22	2,71	1,6
Pomiar 17 - Metro 1438 godz. 11:26 - tor 1	46,97	1,39	2,96	71,09	2,88	4,05	115,5	2,4	2,08
Pomiar 19 - Metro 230 godz. 11:29 - tor 1	65,05	1,58	2,43	79,56	2,81	3,53	163,28	2,22	1,36
Pomiar 21 - Metro 1534 godz. 11:33 - tor 1	47,31	1,44	3,04	66,3	2,42	3,65	129,32	2,48	1,92
Pomiar 23 - Metro 337 godz. 11:38 - tor 1	48,27	1,75	3,63	58,21	2,5	4,29	130,22	2,37	1,82
Pomiar 25 - Metro 1604 godz. 11:41 - tor 1	53,7	1,7	3,17	59,42	2,67	4,49	129,78	2,47	1,9
Pomiar 27 - Metro 414 godz. 11:44 - tor 1	67,43	1,94	2,88	82,13	3,49	4,25	201,2	4,73	2,35
Pomiar 29 - Metro 1707 godz. 11:47 - tor 1	39,67	1,3	3,28	57,99	2,37	4,09	108,58	2,86	2,63
Pomiar 31 - Metro 505 godz. 11:51 - tor 1	51,7	1,42	2,75	62,74	2,71	4,32	103,08	2,58	2,5
Pomiar 33 - Metro 1806 godz. 11:55 - tor 1	48,91	1,78	3,64	67,35	2,86	4,25	138,67	2,23	1,61
Pomiar 35 - Metro 1924 godz. 11:58 - tor 1	60,4	1,54	2,55	79,93	3	3,75	130,94	2,35	1,79
Pomiar 38 - Metro 2011 godz. 12:07 - tor 1	56,02	1,48	2,64	71,14	2,91	4,09	184,44	2,65	1,44
Pomiar 40 - Metro 617 godz. 12:09 - tor 1	41,62	1,18	2,84	43,46	2	4,6	117,17	2,71	2,31
Pomiar 41 - Metro 713 godz. 12:12 - tor 1	48,31	1,51	3,13	65,53	2,89	4,41	140,28	2,65	1,89
Pomiar 43 - Metro 801 godz. 12:15 - tor 1	47,51	1,72	3,62	74,05	2,65	3,58	133,98	2,18	1,63
Pomiar 45 - Metro 2103 godz. 12:20 - tor 1	69,22	2,19	3,16	98,41	4,11	4,18	198,78	3,42	1,72
Pomiar 47 - Metro 923 godz. 12:23 - tor 1	48,77	1,63	3,34	61,01	2,85	4,67	138,6	2,61	1,88
Pomiar 49 - Metro 1033 godz. 12:26 - tor 1	49,7	1,53	3,08	60,55	2,98	4,92	135,64	2,36	1,74
Pomiar 51 - Metro 1125 godz. 12:33 - tor 1	55,14	1,82	3,3	78,48	3,03	3,86	138,36	2,48	1,79
Wartość średnia	53,95	1,58	2,97	67,98	2,76	4,08	141,88	2,67	1,91

Wartości średnie współczynników przeniesienia dla poszczególnych kierunków przyjmują odpowiednio wartości dla kierunku X około 3 (2,97), dla kierunku Y wartość 4,08, a dla kierunku pionowego Z wartość bliską 2 (1,91). Największe uśrednione wartości przyspieszenia drgań zarejestrowano odpowiednio na podtorzu dla kierunku pionowego – 141,88 cm/s^2 , poziomego, równoległego dla kierunku przemieszczania się źródła drgań Y – 67,98 cm/s^2 i najmniejszą wartość zarejestrowano dla kierunku poziomego prostopadłego do kierunku przemieszczania się źródła drgań – 53,95 cm/s^2 . Odpowiednio na konstrukcji budynku w poziomie terenu odnotowano wartości od największej do najmniejszej: dla Y równe 2,76 cm/s^2 , podobnie dla kierunku pionowego 2,67 cm/s^2 oraz dla kierunku X 1,58 cm/s^2 .

Poniżej zaprezentowano graficzną interpretację uzyskanych wyników dla poszczególnych kierunków na rys. 4.1.2.6 i 4.1.2.7.



Rys. 4.1.13. Stosunek maksymalnych wartości przyspieszenia drgań budynku do maksymalnych wartości drgań tunelu dla wszystkich trzech kierunków



Rys. 4.1.14. Stosunek maksymalnych wartości przyspieszenia drgań budynku do maksymalnych wartości przyspieszenia drgań tunelu w procentach w zależności od maksymalnych wartości przyspieszenia drgań tunelu dla wszystkich trzech składowych drgań

Na podstawie zaprezentowanych wykresów można zaobserwować pewną prawidłowość, która jest uwidoczniła dla wszystkich trzech wzajemnie prostopadłych kierunków rejestrowanych drgań: przyrost rejestrowanej wartości przyspieszenia drgań na fundamencie budynku nie jest proporcjonalny do przyrostu wartości przyspieszenia drgań rejestrowanej na podtorzu tunelu metra.

Im wyższy przyrost wartości przyspieszenia drgań w tunelu tym przyrost wartości przyspieszenia drgań na fundamencie jest mniejszy.

4.1.2.2. Analiza w dziedzinie częstotliwości

Dla każdej z par tunel-budynek została wykonana analiza tercjowa. Analizie poddano dane dla czujników w kierunku X i Z (z uwagi na duże zakłócenia na czujniku w kierunku Y danych nie analizowano). Poniżej zamieszczono tabelę z wynikami analiz wartości maksymalnej dla kierunku X w pasmach tercjowych z całego pomiaru – obejmująca wszystkie zdarzenia (rejestracje), które wystąpiły w czasie pomiarów. Taki zabieg miał na celu otrzymanie jednej zbiorczej analizy ze wszystkich wykonanych rejestracji i wybór najbardziej niekorzystnej możliwej do uzyskania sytuacji pomiarowej – można ją nazwać analizą obwiedni. Najniekorzystniejsze wyniki dla każdej tercji ze wszystkich pomiarów zaznaczono kolorem żółtym w tabeli 4.1.9. Są to maksymalne wartości przyspieszenia drgań budynku w poziomie terenu w poszczególnych pasmach tercjowych.

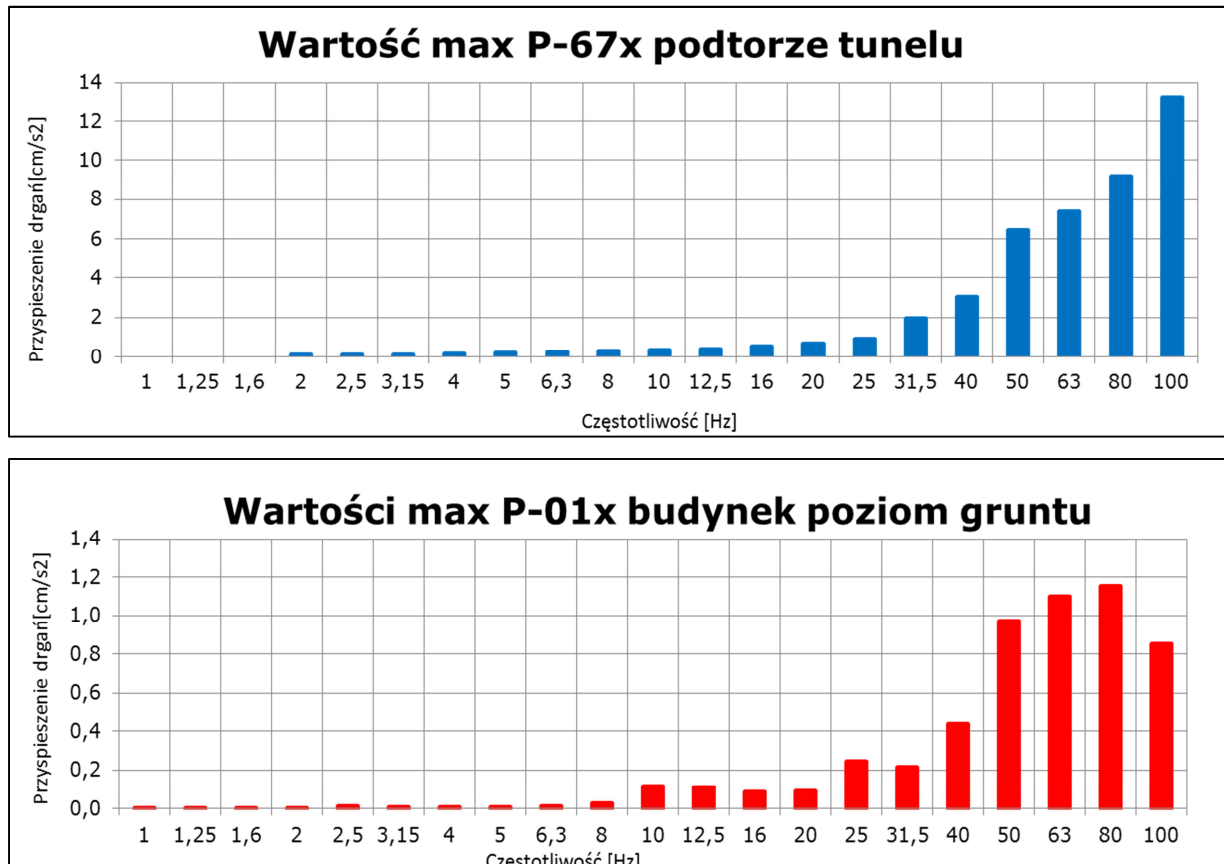
Tab. 4.1.9. Schemat doboru maksymalnej wartości przyspieszeń drgań budynku (w poziomie terenu w kierunku x) w każdej tercji ze wszystkich pomiarów celem utrzymania obwiedni tych wartości (wartości opisujące obwiednię zebrano w dolnym wierszu zaznaczonym kolorem żółtym)

P-01x poziom gruntu (MAX)	Częstotliwość środkowa [Hz]																				
	1	1,25	1,6	2	2,5	3,15	4	5	6,3	8	10	12,5	16	20	25	31,5	40	50	63	80	100
Pomiar 13 - Metro 0909 godz. 10:54 - tor 1	0.0020	0.0023	0.0036	0.0032	0.0056	0.0033	0.0055	0.0035	0.0111	0.0163	0.0184	0.0192	0.0390	0.0500	0.1249	0.1066	0.3360	0.5620	0.7198	1.0689	0.4781
Pomiar 14 - Metro 2011 godz. 10:58 - tor 2	0.0012	0.0021	0.0014	0.0047	0.0055	0.0030	0.0040	0.0044	0.0066	0.0098	0.0143	0.0331	0.0417	0.0437	0.0501	0.0491	0.1276	0.2073	0.1139	0.0574	0.0503
Pomiar 15 - Metro 1033 godz. 11:00 - tor 1	0.0018	0.0015	0.0023	0.0044	0.0077	0.0033	0.0038	0.0070	0.0154	0.0206	0.1185	0.1106	0.0677	0.0726	0.1491	0.1405	0.4395	0.9170	0.5723	1.0479	0.8556
Pomiar 16 - Metro 2215 godz. 11:03 - tor 1	0.0015	0.0016	0.0029	0.0035	0.0088	0.0043	0.0040	0.0047	0.0084	0.0200	0.0203	0.0300	0.0681	0.0690	0.1029	0.1095	0.3915	0.7235	0.6049	0.9224	0.5223
Pomiar 17 - Metro 1125 godz. 11:07 - tor 1	0.0022	0.0021	0.0029	0.0034	0.0047	0.0036	0.0065	0.0040	0.0121	0.0138	0.0167	0.0204	0.0269	0.0741	0.1791	0.1473	0.2324	0.5816	0.6927	0.6978	0.5120
Pomiar 18 - Metro 2308 godz. 11:10 - tor 1	0.0015	0.0011	0.0027	0.0035	0.0044	0.0045	0.0053	0.0060	0.0075	0.0209	0.0333	0.0214	0.0488	0.0792	0.1294	0.1699	0.2634	0.6730	0.5286	0.9517	0.6402
Pomiar 19 - Metro 2103 godz. 11:12 - tor 1	0.0013	0.0018	0.0017	0.0022	0.0048	0.0025	0.0032	0.0031	0.0063	0.0139	0.0152	0.0227	0.0367	0.0462	0.0426	0.0665	0.2053	0.3453	0.1985	0.1148	0.0846
Pomiar 20 - Metro 1228 godz. 11:16 - tor 1	0.0011	0.0017	0.0027	0.0024	0.0051	0.0039	0.0033	0.0054	0.0185	0.0112	0.0159	0.0163	0.0281	0.0578	0.1194	0.1199	0.2617	0.5376	0.5641	0.8723	0.4631
Pomiar 21 - Metro 1302 godz. 11:19 - tor 1	0.0012	0.0012	0.0013	0.0030	0.0057	0.0034	0.0047	0.0042	0.0099	0.0127	0.0282	0.0292	0.0419	0.0638	0.1151	0.1432	0.2173	0.4362	0.5769	0.8882	0.4453
Pomiar 22 - Metro 0129 godz. 11:22 - tor 1	0.0017	0.0030	0.0022	0.0035	0.0054	0.0053	0.0046	0.0062	0.0088	0.0169	0.0248	0.0256	0.0481	0.0761	0.2069	0.1647	0.4109	0.4734	0.6130	0.9421	0.7819
Pomiar 23 - Metro 1438 godz. 11:26 - tor 1	0.0015	0.0016	0.0025	0.0034	0.0076	0.0046	0.0047	0.0060	0.0101	0.0146	0.0290	0.0328	0.0432	0.0512	0.1167	0.1183	0.2613	0.4033	0.6546	0.9993	0.4545
Pomiar 24 - Metro 0230 godz. 11:29 - tor 1	0.0008	0.0009	0.0028	0.0044	0.0101	0.0041	0.0035	0.0071	0.0113	0.0115	0.0288	0.0209	0.0337	0.0636	0.2485	0.1486	0.3535	0.6953	0.6401	0.8372	0.7415
Pomiar 25 - Metro 1534 godz. 11:34 - tor 1	0.0012	0.0009	0.0022	0.0023	0.0060	0.0031	0.0037	0.0048	0.0082	0.0186	0.0236	0.0210	0.0377	0.0526	0.1286	0.1261	0.4107	0.3909	0.7525	0.9966	0.4211
Pomiar 26 - Metro 0337 godz. 11:39 - tor 1	0.0018	0.0040	0.0043	0.0043	0.0118	0.0064	0.0061	0.0063	0.0137	0.0294	0.0936	0.0612	0.0679	0.0822	0.1261	0.1063	0.3207	0.7018	0.6597	1.0881	0.5138
Pomiar 27 - Metro 1604 godz. 11:42 - tor 1	0.0024	0.0029	0.0027	0.0038	0.0063	0.0034	0.0045	0.0063	0.0104	0.0157	0.0221	0.0234	0.0471	0.0582	0.1150	0.1224	0.2976	0.8046	0.6371	1.1361	0.4634
Pomiar 28 - Metro 0414 godz. 11:44 - tor 1	0.0020	0.0019	0.0019	0.0024	0.0066	0.0047	0.0036	0.0046	0.0090	0.0124	0.0147	0.0189	0.0255	0.0534	0.0918	0.2165	0.2615	0.5749	0.8353	1.0793	0.7402
Pomiar 29 - Metro 1707 godz. 11:47 - tor 1	0.0014	0.0019	0.0025	0.0027	0.0042	0.0040	0.0048	0.0048	0.0104	0.0130	0.0151	0.0182	0.0340	0.0831	0.1009	0.1666	0.2078	0.4497	0.6491	0.8310	0.3863
Pomiar 30 - Metro 0505 godz. 11:52 - tor 1	0.0010	0.0015	0.0042	0.0039	0.0094	0.0072	0.0041	0.0076	0.0131	0.0119	0.0144	0.0245	0.0307	0.0658	0.0966	0.1429	0.3407	0.4481	0.6858	0.9189	0.4271
Pomiar 31 - Metro 1806 godz. 11:55 - tor 1	0.0006	0.0017	0.0039	0.0027	0.0055	0.0043	0.0046	0.0054	0.0079	0.0112	0.0219	0.0296	0.0425	0.0926	0.1252	0.1761	0.3019	0.6323	0.7484	1.1633	0.4651
Pomiar 32 - Metro 1924 godz. 11:58 - tor 1	0.0021	0.0036	0.0032	0.0041	0.0079	0.0092	0.0054	0.0047	0.0141	0.0151	0.0306	0.0278	0.0320	0.0554	0.1355	0.1383	0.4174	0.9359	0.6991	0.7573	0.5306
Pomiar 33 - Metro 0414 godz. 12:05 - tor 2	0.0015	0.0012	0.0019	0.0026	0.0043	0.0047	0.0035	0.0039	0.0066	0.0112	0.0173	0.0641	0.0444	0.0563	0.0531	0.0951	0.2512	0.2556	0.0945	0.1181	0.1238
Pomiar 34 - Metro 2011 godz. 12:07 - tor 1	0.0015	0.0023	0.0037	0.0046	0.0062	0.0041	0.0061	0.0060	0.0106	0.0149	0.0193	0.0229	0.0675	0.0639	0.1374	0.1306	0.3156	0.5877	0.6288	1.0573	0.5205
Pomiar 35 - Metro 0617 godz. 12:10 - tor 1	0.0019	0.0043	0.0027	0.0029	0.0071	0.0044	0.0049	0.0070	0.0107	0.0157	0.0376	0.0668	0.0751	0.0645	0.0725	0.1024	0.1949	0.6110	0.7234	0.4963	0.4025
Pomiar 36 - Metro 0713 godz. 12:13 - tor 1	0.0015	0.0012	0.0025	0.0029	0.0053	0.0031	0.0029	0.0041	0.0100	0.0146	0.0320	0.0546	0.0669	0.0661	0.1296	0.1009	0.3161	0.6121	0.6316	0.9207	0.3931
Pomiar 37 - Metro 0801 godz. 12:15 - tor 1	0.0015	0.0020	0.0013	0.0023	0.0067	0.0035	0.0046	0.0043	0.0075	0.0182	0.0224	0.0330	0.0586	0.0763	0.1333	0.1164	0.2699	0.5790	0.7154	1.0335	0.5012
Pomiar 38 - Metro 2103 godz. 12:21 - tor 1	0.0012	0.0015	0.0035	0.0033	0.0044	0.0034	0.0046	0.0049	0.0139	0.0143	0.0197	0.0254	0.0592	0.0697	0.0984	0.1476	0.2723	0.6515	1.0992	1.1437	0.6098
Pomiar 39 - Metro 0923 godz. 12:24 - tor 1	0.0012	0.0011	0.0025	0.0024	0.0124	0.0058	0.0039	0.0047	0.0114	0.0110	0.0234	0.0267	0.0367	0.0853	0.1341	0.1592	0.3509	0.6492	0.8154	1.0807	0.5011
Pomiar 40 - Metro 1033 godz. 12:27 - tor 1	0.0008	0.0017	0.0018	0.0029	0.0070	0.0040	0.0041	0.0050	0.0140	0.0133	0.0225	0.0250	0.0416	0.0563	0.1257	0.1414	0.3665	0.6731	0.6903	1.1122	0.6705
Pomiar 42 - Metro 1125 godz. 12:33 - tor 1	0.0019	0.0052	0.0052	0.0061	0.0067	0.0078	0.0058	0.0081	0.0148	0.0142	0.0225	0.0370	0.0424	0.0519	0.1597	0.1272	0.3604	0.7832	0.7708	0.9275	0.6005
WARTOŚĆ MAKSYMALNA	0.0024	0.0052	0.0052	0.0054	0.0124	0.0092	0.0068	0.0091	0.0155	0.0294	0.1185	0.1106	0.0973	0.0926	0.2463	0.2164	0.4392	0.9731	1.0992	1.1532	0.8556

Dla każdej tercji wytypowano wartość maksymalną (dla każdej tercji ze wszystkich pomiarów), a następnie uzyskane w ten sposób dane zaprezentowano w postaci graficznej. Wart uwagi jest fakt uzyskania w ten sposób hipotetycznej analizy, która nie wystąpiła w rzeczywistości ale jest sumą

najbardziej niekorzystnych wyników rejestracji w ciągu całego pomiaru. Uzyskany w ten sposób plik reprezentuje najgorszy możliwy do wystąpienia w rzeczywistości wpływ drgań na konstrukcję budynku.

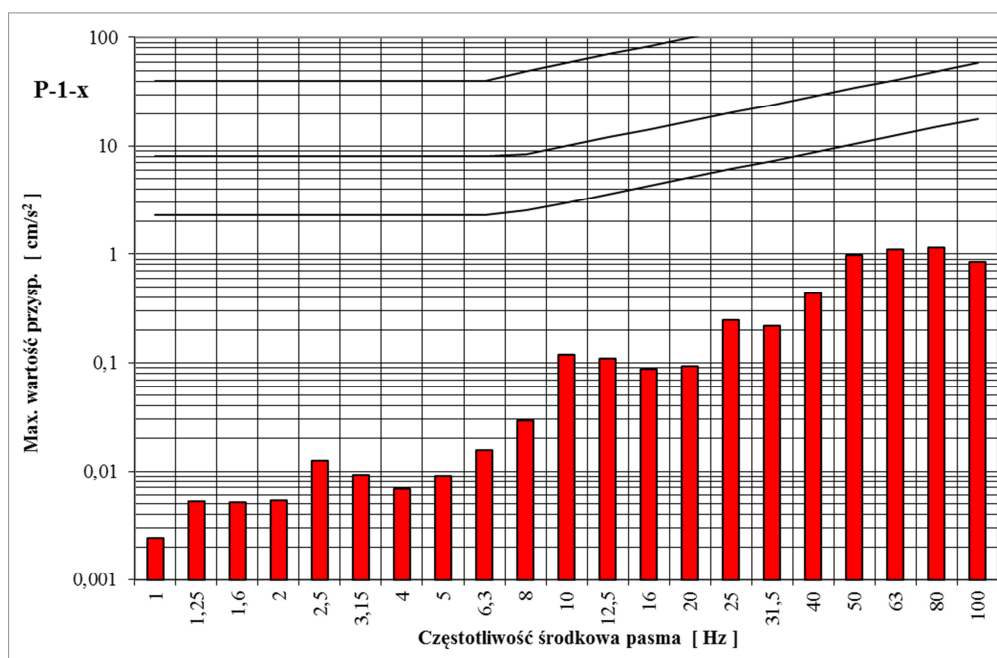
Poniżej przedstawiono wykresy w pasmach tercjowych dla najbardziej niekorzystnych sytuacji dla podtorza tunelu i dla fundamentu budynku (Rys. 4.1.15). Dane uzyskano w taki sam sposób jak dla przedstawionego przykładu z tabeli 4.1.9.



Rys. 4.1.15. Analiza tercjowa ze wszystkich zdarzeń z pomiaru dla tunelu i budynku dla kierunku poziomego X

Maksymalna wartość przyspieszenia drgań zarejestrowana na fundamencie budynku jest o rząd wielkości mniejsza od tej zmierzonej na podtorzu tunelu metra.

Na rys. 4.1.16 przedstawiono ocenę wpływu drgań na konstrukcję budynku za pomocą skali SWD-II w przypadku obwiedni maksymalnych wartości przyspieszenia drgań z wszystkich pomiarów wymienionych w tabeli 4.1.9.



Rys.4.1.16. Obwiednia wyników analizy trójcewej wpływu drgań na budynek dla wszystkich pomiarów zamieszczonych w tabeli 4.1.9

Jak można zauważyć (rys. 4.1.16.), drgania są usytuowane w I strefie wpływów dynamicznych – czyli są nieodczuwalne przez konstrukcję budynku.

W kolejnym etapie wykonano analizy FFT funkcji przejścia dla wszystkich par tunel budynek. W poniższej tabeli zaprezentowano dane, na podstawie których dokonano selekcji poszczególnych pomiarów.

Opis poszczególnych pól znajduje się poniżej:

Numeracja według pomiarów w tunelu (podtorze tunelu)

Nr – oznacza numer pociągu

D – duża wartość max przyspieszenia drgań z przebiegu czasowego

M – mała wartość max przyspieszenia drgań z przebiegu czasowego – z uwagi na ten fakt, aby unikać zakłóceń, oznaczone tak przebiegi zostały usunięte z dalszej analizy.

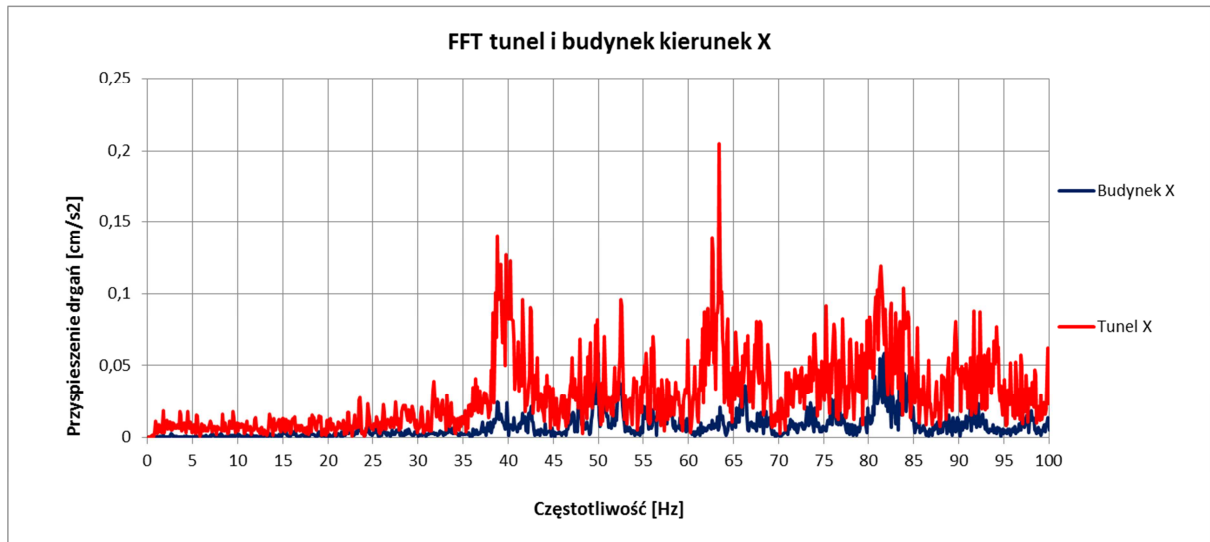
b- mała literka b w ostatniej kolumnie oznacza brak danych do porównania (brak danych z FFT)

Tab. 4.1.10. Spis pomiarów na podstawie którego dokonano selekcji poszczególnych par tunel-budynek dla potrzeb analizy FFT

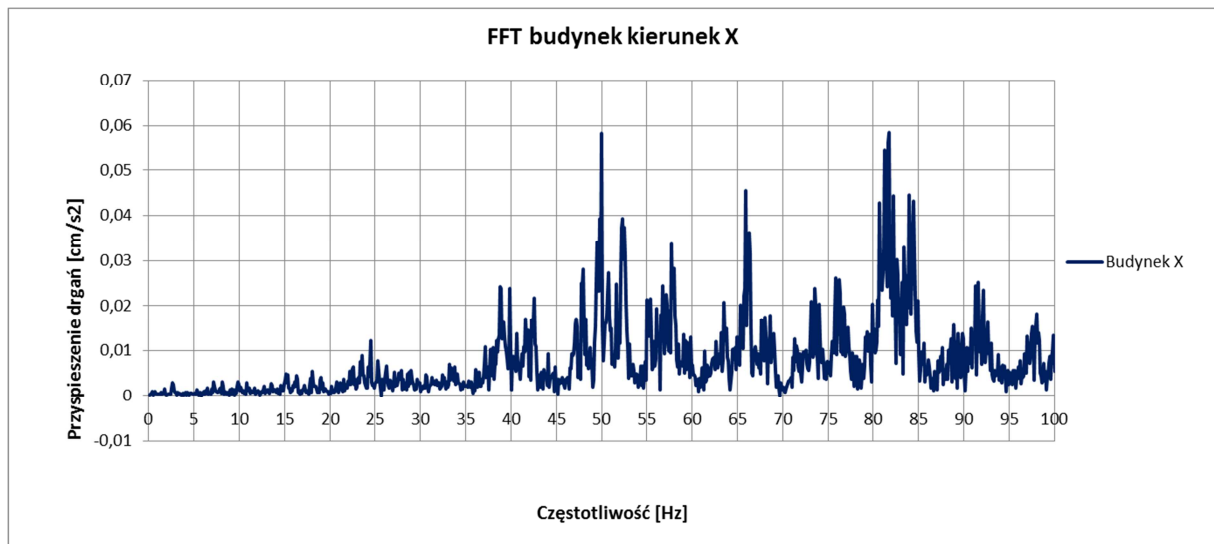
P-01x budynek poziom gruntu (MAX)	Nr	D	M			
NAZWA POMIARU						
Pomiar 13 - Metro 0909 godz. 10:54 - tor 1	09	x				
Pomiar 14 - Metro 2011 godz. 10:58 - tor 2	11		x			b
Pomiar 15 - Metro 1033 godz. 11:00 - tor 1	33	x				b
Pomiar 16 - Metro 2215 godz. 11:03 - tor 1	15	x				
Pomiar 17 - Metro 1125 godz. 11:07 - tor 1	25	x				
Pomiar 18 - Metro 2308 godz. 11:10 - tor 1	08	x				
Pomiar 19 - Metro 2103 godz. 11:12 - tor 1	03		x			
Pomiar 20 - Metro 1228 godz. 11:16 - tor 1	28	x				
Pomiar 21 - Metro 1302 godz. 11:19 - tor 1	02	x				
Pomiar 22 - Metro 0129 godz. 11:22 - tor 1	29	x				
Pomiar 23 - Metro 1438 godz. 11:26 - tor 1	38	x				
Pomiar 24 - Metro 0230 godz. 11:29 - tor 1	30	x				
Pomiar 25 - Metro 1534 godz. 11:34 - tor 1	34	x				
Pomiar 26 - Metro 0337 godz. 11:39 - tor 1	37	x				
Pomiar 27 - Metro 1604 godz. 11:42 - tor 1	04	x				
Pomiar 28 - Metro 0414 godz. 11:44 - tor 1	14	x				
Pomiar 29 - Metro 1707 godz. 11:47 - tor 1	07	x				
Pomiar 30 - Metro 0505 godz. 11:52 - tor 1	05	x				
Pomiar 31 - Metro 1806 godz. 11:55 - tor 1	06	x				
Pomiar 32 - Metro 1924 godz. 11:58 - tor 1	24	x				
Pomiar 33 - Metro 0414 godz. 12:05 - tor 2	14		x			
Pomiar 34 - Metro 2011 godz. 12:07 - tor 1	11	x				
Pomiar 35 - Metro 0617 godz. 12:10 - tor 1	17	x				
Pomiar 36 - Metro 0713 godz. 12:13 - tor 1	13	x				
Pomiar 37 - Metro 0801 godz. 12:15 - tor 1	01	x				
Pomiar 38 - Metro 2103 godz. 12:21 - tor 1	03	x				
Pomiar 39 - Metro 0923 godz. 12:24 - tor 1	23	x				
Pomiar 40 - Metro 1033 godz. 12:27 - tor 1	33	x				
Pomiar 42 - Metro 1125 godz. 12:33 - tor 1	25	x				

P-67x podtorze tunelu (MAX)	Nr	D	M			
NAZWA POMIARU						
Pomiar 01 - Metro 0909 godz. 10:53 - tor 1	09	x				
Pomiar 02 - Metro 2011 godz. 10:57 - tor 2	11		x			b
Pomiar 03 - Metro 1033 godz. 10:00 - tor 1	33	x				b
Pomiar 05 - Metro 2215 godz. 11:02 - tor 1	15	x				
Pomiar 07 - Metro 1125 godz. 11:06 - tor 1	25	x				
Pomiar 09 - Metro 2308 godz. 11:09 - tor 1	08	x				
Pomiar 10 - Metro 2103 godz. 11:12 - tor 2	03		x			
Pomiar 12 - Metro 1228 godz. 11:16 - tor 1	28	x				
Pomiar 13 - Metro 1302 godz. 11:19 - tor 1	02	x				
Pomiar 15 - Metro 0129 godz. 11:21 - tor 1	29	x				b
Pomiar 17 - Metro 1438 godz. 11:26 - tor 1	38	x				
Pomiar 19 - Metro 0230 godz. 11:29 - tor 1	30	x				
Pomiar 21 - Metro 1534 godz. 11:33 - tor 1	34	x				
Pomiar 23 - Metro 0337 godz. 11:38 - tor 1	37	x				
Pomiar 25 - Metro 1604 godz. 11:41 - tor 1	04	x				
Pomiar 27 - Metro 0414 godz. 11:44 - tor 1	14	x				
Pomiar 29 - Metro 1707 godz. 11:47 - tor 1	07	x				
Pomiar 31 - Metro 0505 godz. 11:51 - tor 1	05	x				
Pomiar 33 - Metro 1806 godz. 11:55 - tor 1	06	x				
Pomiar 35 - Metro 1924 godz. 11:58 - tor 1	24	x				
Pomiar 37 - Metro 0414 godz. 12:04 - tor 2	14		x			
Pomiar 38 - Metro 2011 godz. 12:07 - tor 1	11	x				
Pomiar 40 - Metro 0617 godz. 12:09 - tor 1	17	x				
Pomiar 41 - Metro 0713 godz. 12:12 - tor 1	13	x				
Pomiar 43 - Metro 0801 godz. 12:15 - tor 1	01	x				
Pomiar 45 - Metro 2103 godz. 12:20 - tor 1	03	x				
Pomiar 47 - Metro 0923 godz. 12:23 - tor 1	23	x				
Pomiar 49 - Metro 1033 godz. 12:26 - tor 1	33	x				b
Pomiar 51 - Metro 1125 godz. 12:33 - tor 1	25	x				

Poniżej zaprezentowano przykładowo wykresy dla pomiaru 1 (na stanowisku pomiarowym w budynku odpowiedni pomiar ma numer 13). Na rysunku 4.1.17 pokazano analizę FFT dla kierunku poziomego z czujnika usytuowanego w tunelu metra na podtorzu (kolor czerwony). Jest to sygnał jaki zarejestrowano podczas przejazdu pociągu w tunelu, innymi słowy można go traktować jako wymuszenie początkowe. Kolorem niebieskim zaznaczono sygnał zarejestrowany na konstrukcji budynku w tym samym kierunku poziom. Kolejny rysunek 4.1.18 jest powiększeniem sygnału zarejestrowanego na konstrukcji ale z uwagi na skalę, był mało czytelny na rysunku poprzednim. Poziom sygnału rejestrowanego na budynku jest ponad trzykrotnie mniejszy od sygnału wymuszającego, rejestrowanego w tunelu metra i charakteryzuje się nieco innym rozkładem poszczególnych rzędnych.

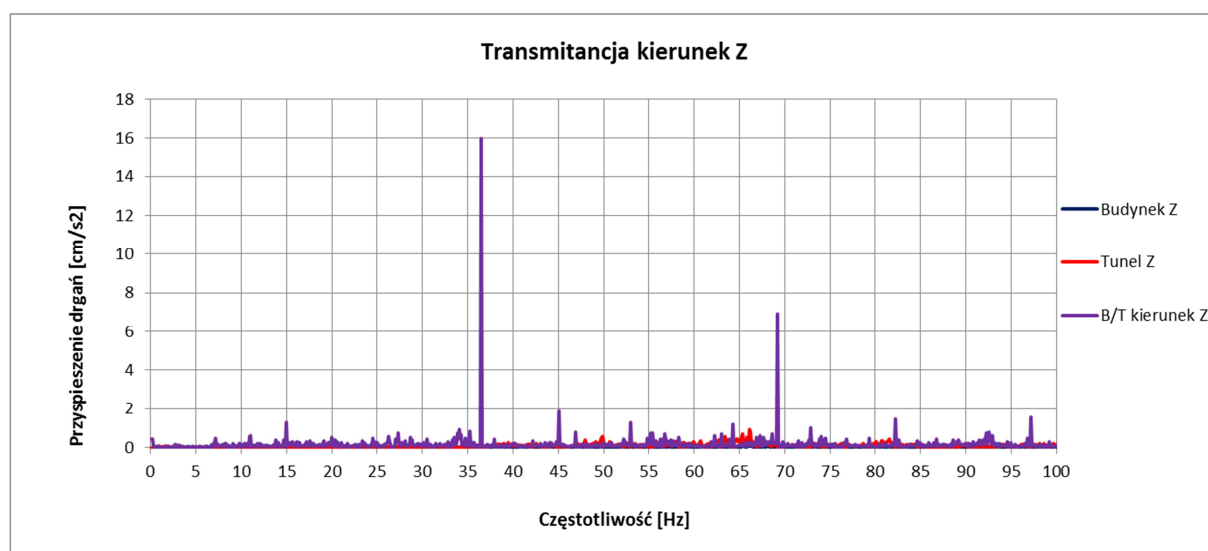
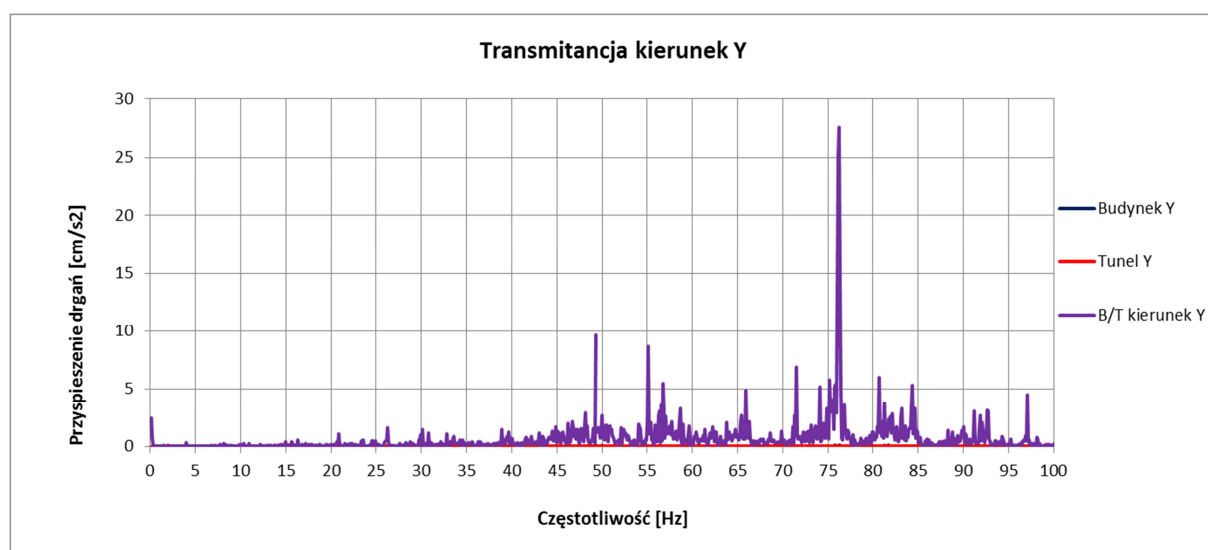
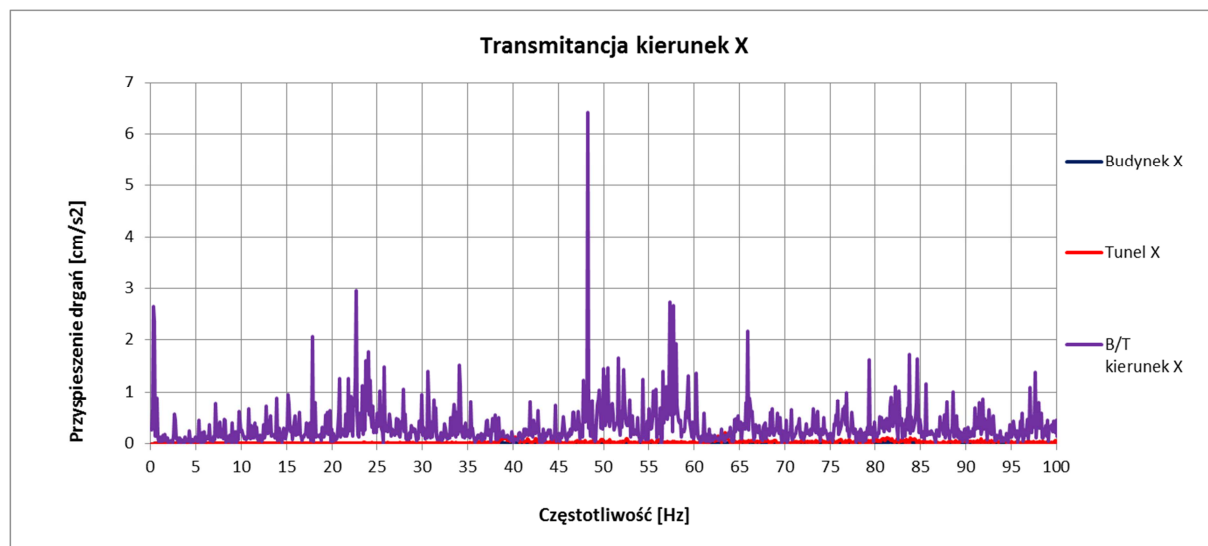


Rys. 4.1.17. Przykładowa analiza FFT dla pary tunel-budynek dla kierunku poziomego X



Rys. 4.1.18. Powiększenie analizy FFT z rysunku 4.1.17 dla samego budynku – kierunek X

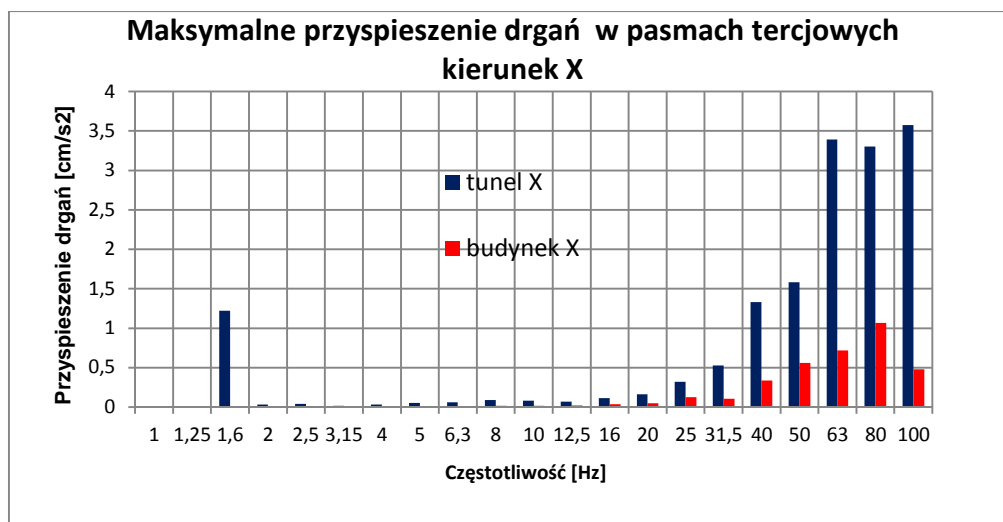
W kolejnym etapie policzono transmitancję dla każdej pary pomiarów z tab. 4.1.10 dla trzech wzajemnie prostopadłych kierunków X, Y i Z. Pozostałe wyniki uzyskane dla poszczególnych par tunel-budynek, pominięto w niniejszej pracy z uwagi na obszerność uzyskanego materiału. Następnie zsumowano rezultaty obliczeń dla poszczególnych kierunków (X, Y i Z) dla wszystkich zdarzeń zarejestrowanych podczas pomiarów i przedstawiono na zbiorczym wykresie (Rys. 4.1.19).



Rys. 4.1.19. Wyniki graficzne dla transmitancji sygnału tunel-budynek dla wszystkich trzech kierunków X, Y, Z

Dla każdej pary wykonano analizę FFT oraz odpowiednio policzono funkcję przejścia dla każdego kierunku X, Y i Z.

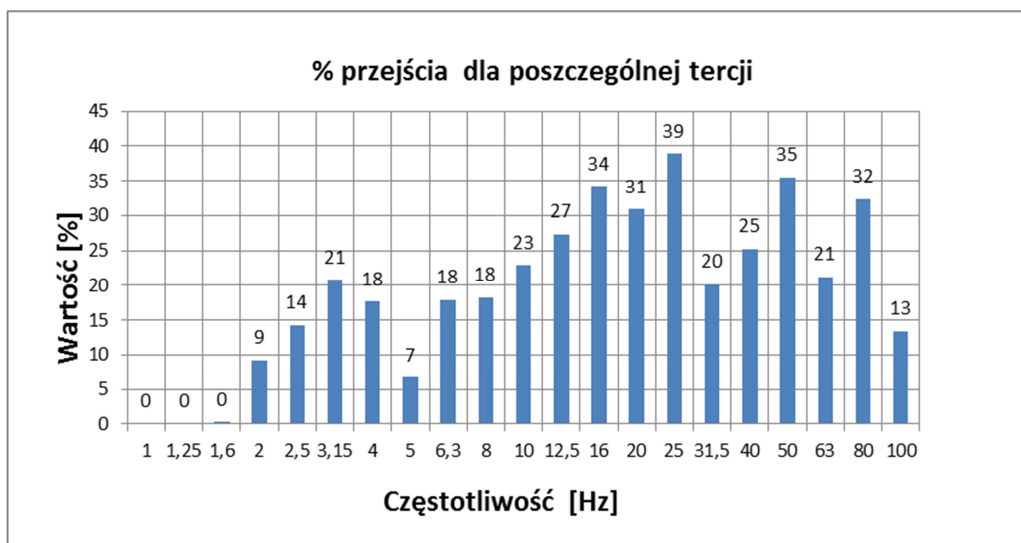
Dla uproszczenia wnioskowania w kolejnym kroku wykonano obliczenia dla analiz tercjowych – wizualnie i liczbowo bardziej przejrzystych pod kątem interpretacji wyników.



Rys. 4.1.20. Maksymalna wartość przyspieszenia drgań w pasmach tercjowych kierunek X

Uwidoczniona tutaj tercja w postaci prążka o częstotliwości środkowej pasma 1,6 Hz obrazuje przyspieszenie drgań obudowy tunelu. Częstotliwość ta jednak w żaden sposób nie przenosi się na sąsiedni budynek (jest niewidoczna). Taki sygnał pojawił się na niemal wszystkich danych zarejestrowanych na podtorzu tunelu metra.

Następnie policzono procent przejścia sygnału dla każdej tercji w zakresie od 0 do 100Hz. Przykładowy wykres zamieszczono poniżej na rys. 4.1.21. Dla każdej tercji dodatkowo zaprezentowano wartość liczbową w % nad każdym słupkiem (rys. 4.1.22).



Rys. 4.1.21. Procent przejścia sygnału tunel-budynek w tercjowych pasmach częstotliwości dla przykładowego pomiaru

W kolejnym etapie dane dotyczące procentu przenoszenia się przyspieszenia drgań dla poszczególnych tercji potraktowano zbiorczo dla dwóch kierunków X i Z. Dane dotyczą zbiorczo wszystkich zdarzeń czyli całego zbioru pomiarowego.

Tab. 4.1.11. Procent przenoszenia się przyspieszenia drgań w tercjowych pasmach częstotliwości – ze wszystkich analizowanych przejazdów dla kierunku X

Nr tercji	Częstotliwość [Hz]	Wartość Maksymalna [cm/s ²]	Wartość Minimalna [cm/s ²]	Wartość Średnia [cm/s ²]
1	1	0	0	0
2	1,25	0	0	0
3	1,6	00,86	00,02	00,17
4	2	11,93	02,01	06,58
5	2,5	18,64	04,60	11,10
6	3,15	28,60	02,47	10,41
7	4	17,64	03,01	07,49
8	5	15,82	02,39	07,91
9	6,3	21,75	04,96	13,32

10	8	27,59	04,27	15,28
11	10	44,30	05,82	21,86
12	12,5	43,98	06,44	23,03
13	16	44,91	09,02	25,42
14	20	76,97	10,19	31,03
15	25	64,00	10,72	38,80
16	31,5	37,13	11,00	19,10
17	40	47,86	08,92	24,88
18	50	62,72	10,11	35,04
19	63	37,70	14,81	22,27
20	80	44,04	12,38	28,40
21	100	23,00	05,60	13,04

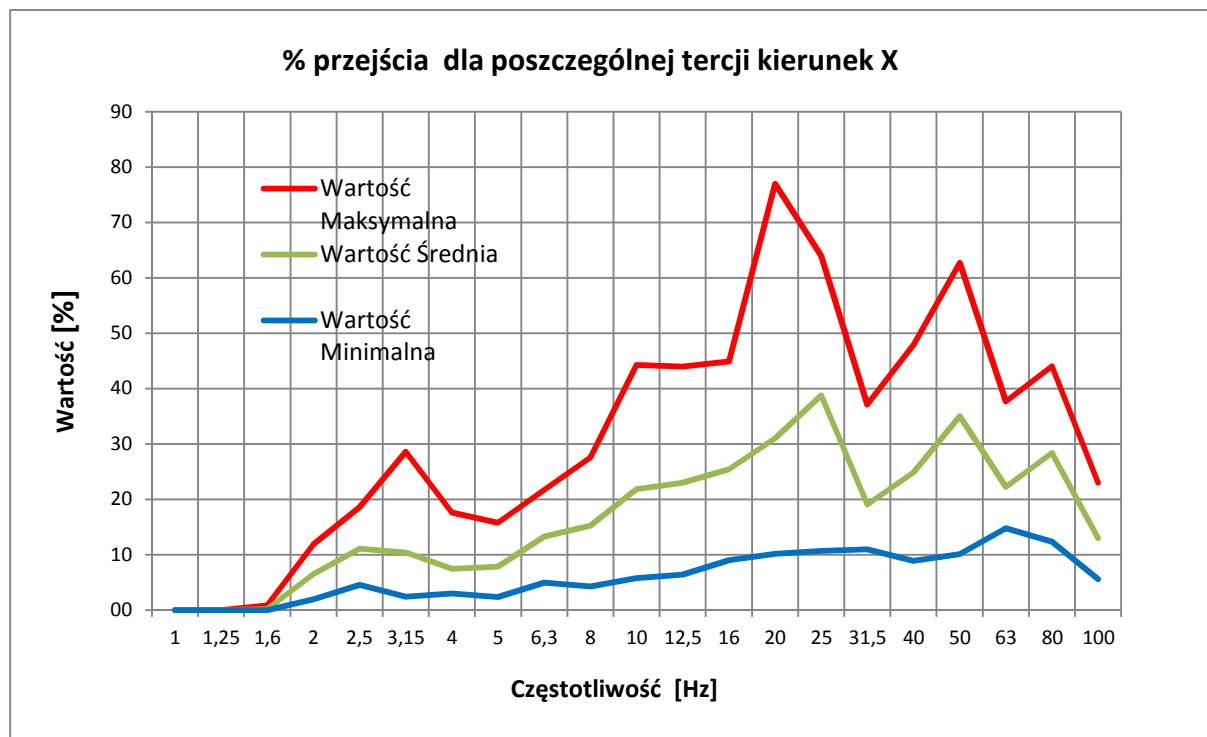
Największy uśredniony procent przejścia zaobserwowano dla częstotliwości środkowych pasma od 20 Hz do 25 Hz co przedstawiono w postaci graficznej na rysunku 4.1.11. Kolejny skok wartości można obserwować dla częstotliwości środkowej pasma 50 Hz.

Tab. 4.1.12. Procent przenoszenia się przyspieszenia drgań w tercjowych pasmach częstotliwości – ze wszystkich analizowanych przejazdów dla kierunku Z

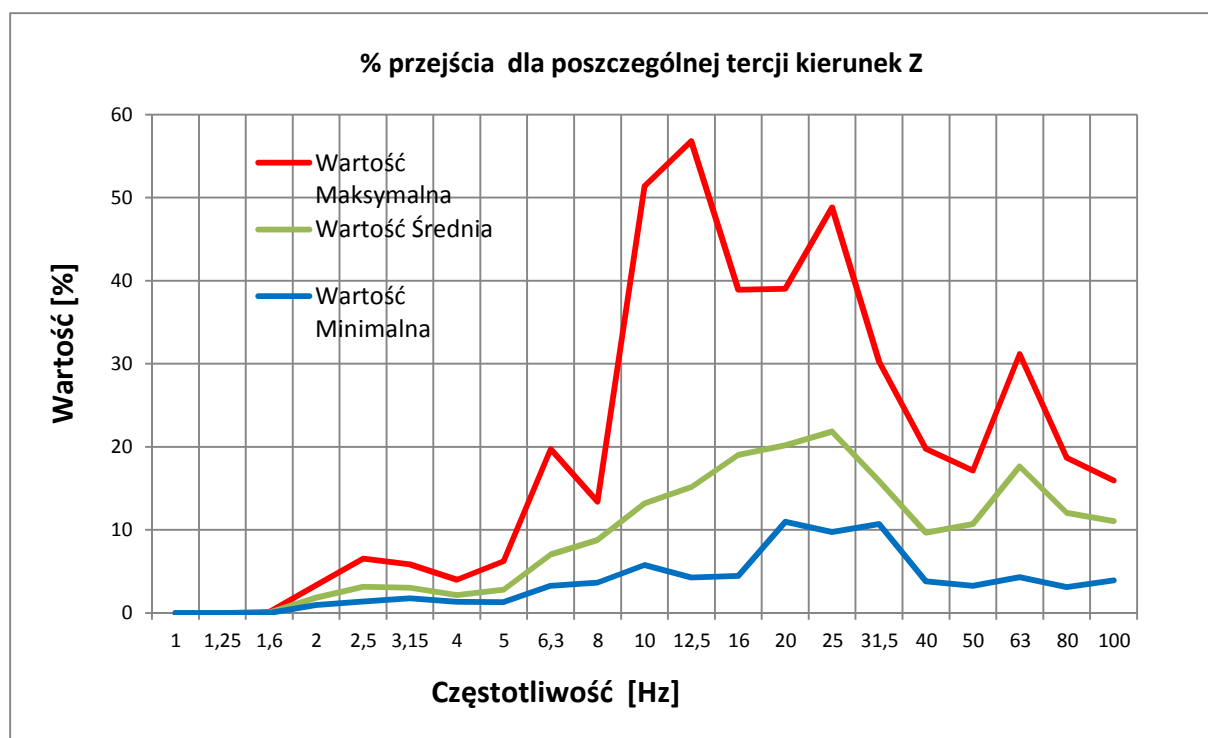
Nr tercji	Częstotliwość [Hz]	Wartość Maksymalna [cm/s ²]	Wartość Minimalna [cm/s ²]	Wartość Średnia [cm/s ²]
1	1	0	0	0
2	1,25	0	0	0
3	1,6	00,10	00,01	00,04
4	2	03,34	00,96	01,87
5	2,5	06,54	01,39	03,17
6	3,15	05,85	01,76	03,05
7	4	04,00	01,34	02,15
8	5	06,23	01,31	02,82
9	6,3	19,72	03,27	07,07

10	8	13,39	03,67	08,80
11	10	51,38	05,78	13,17
12	12,5	56,78	04,26	15,13
13	16	38,91	04,48	19,04
14	20	39,03	10,99	20,18
15	25	48,82	09,74	21,85
16	31,5	30,26	10,72	15,93
17	40	19,77	03,81	09,69
18	50	17,13	03,28	10,70
19	63	31,18	04,30	17,64
20	80	18,69	03,13	12,05
21	100	15,96	03,92	11,06

Największy uśredniony procent przejścia zaobserwowano dla częstotliwości środkowych pasma od 16 Hz do 25 Hz co przedstawiono w postaci graficznej na rysunku 4.1.12. Kolejny skok wartości można obserwować dla częstotliwości środkowej pasma 63 Hz.



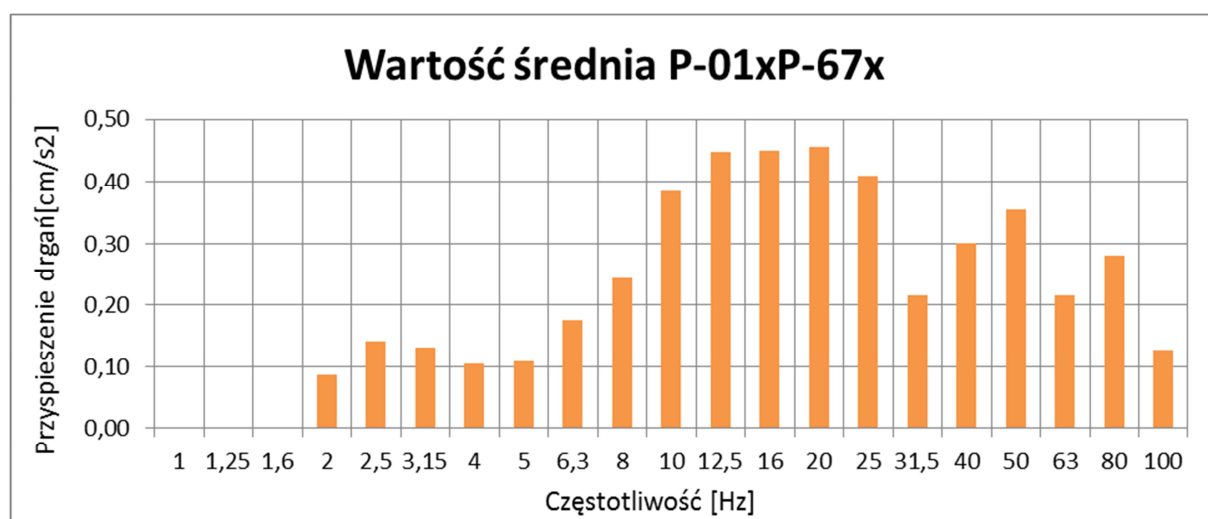
Rys. 4.1.22. Procent przejścia dla poszczególnej tercji kierunek X na podstawie danych z tabeli 4.1.11



Rys. 4.1.23. Procent przejścia dla poszczególnej tercji kierunek Zna podstawie danych z tabeli 4.1.12

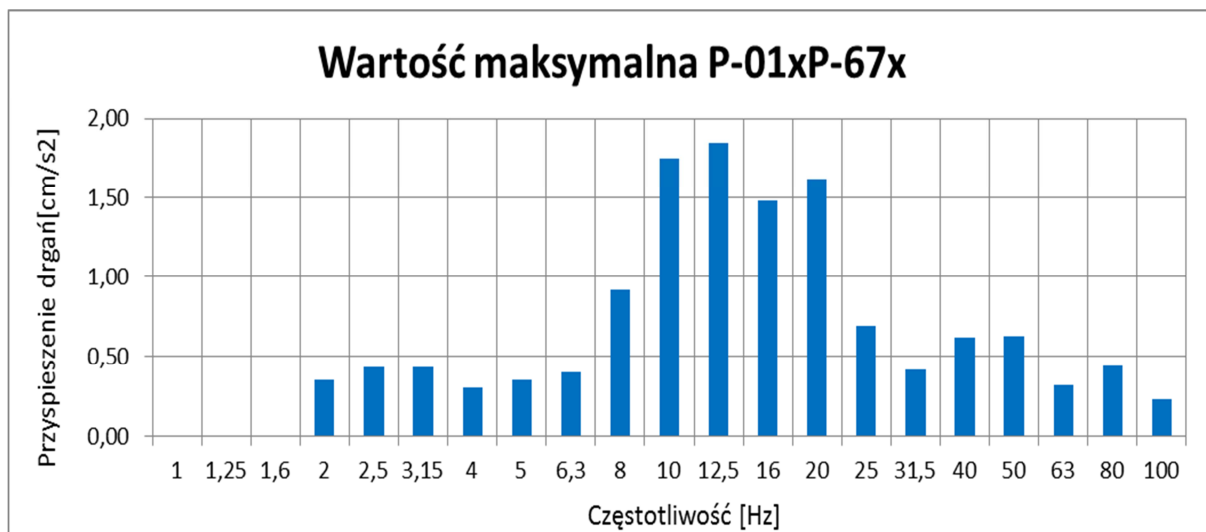
W zależności od kierunku propagacji zmieniają się rzędne częstotliwości środkowej pasma. Dla kierunku pionowego są nieco przesunięte w stronę wyższych wartości.

Dokonano także obliczenia stosunku wartości przyspieszeń drgań w tunelu i w budynku w odniesieniu do wartości średniej składowej x ze wszystkich zarejestrowanych zdarzeń – rys. 4.1.24 a także w odniesieniu do wartości maksymalnych (obwiednia) tej składowej – rys. nr 4.1.25



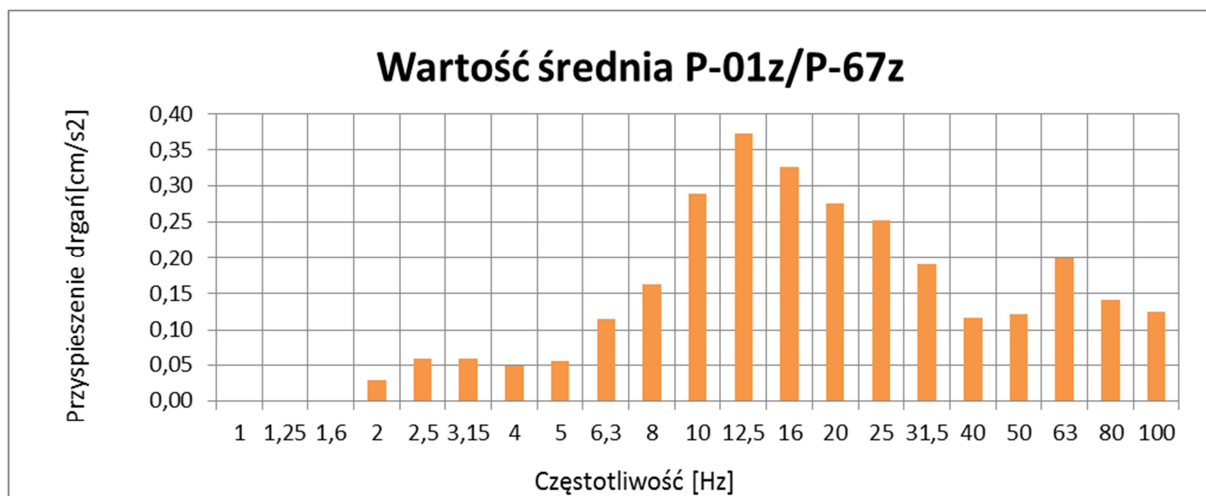
Rys. 4.1.24. Stosunek wartości średniej ze wszystkich zarejestrowanych zdarzeń kier. X

i dla wartości maksymalnej ze wszystkich zarejestrowanych zdarzeń:

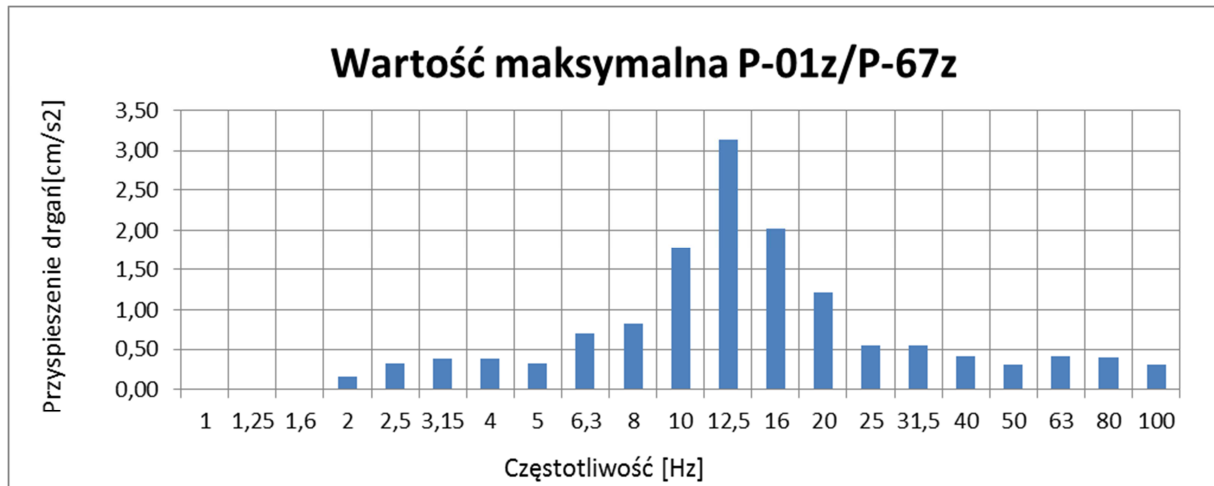


Rys. 4.1.25. Stosunek wartości maksymalnej ze wszystkich zarejestrowanych zdarzeń kier. X

Analogiczne analizy wykonano dla kierunku pionowego Z:



Rys. 4.1.26. Stosunek wartości średniej ze wszystkich zarejestrowanych zdarzeń kier. Z



Rys. 4.1.27. Stosunek wartości maksymalnej ze wszystkich zarejestrowanych zdarzeń kier. Z

PODSUMOWANIE

- Analiza syntetyczna wartości maksymalnych z analiz tercjowych może się okazać przydatna w diagnostyce drgań budynków i określaniu maksymalnych możliwych wpływów dynamicznych od normalnej eksploatacji, które mogą wystąpić w trakcie użytkowania obiektu.
- W przypadku analizowanego przekroju pomiarowego podtorze tunelu – budynek, redukcja maksymalnych wartości przyspieszeń drgań jest prawie 10-krotna natomiast przesunięcie w dziedzinie częstotliwości jest bardzo niewielkie.
- Nawet dla wartości maksymalnej ze wszystkich zdarzeń – drgania są nieodczuwalne przez konstrukcję budynku i mieszczą się w pierwszej strefie skali SWD-II

4.1.3. Spektrum odpowiedzi

Wymuszenie kinematyczne budowli może być scharakteryzowane poprzez spektrum odpowiedzi. Jest ono szeroko stosowane w analizach budowli poddanych działaniom sejsmicznym i parasejsmicznym. Przyspieszeniowe spektrum odpowiedzi niesie informacje o maksymalnych wartościach odpowiedzi oscylatorów na analizowane wymuszenie kinematyczne i jest ono jedną z praktycznych i często wykorzystywanych metod opisu wymuszenia budowli. Jest też szeroko stosowane w inżynierii sejsmicznej i parasejsmicznej.

W przypadku działań sejsmicznych na budowle są opracowane modelowe spektra odpowiedzi stosowane w projektowaniu budowli na obszarach objętych trzęsieniami ziemi [por. Nigham N. C., Jennings P.C., (1969)]. Odpowiednio do lokalnych warunków wyznacza się parametry podane w modelowym spektrum odpowiedzi.

Do opisu wymuszenia kinematycznego danej budowli można wykorzystać spektrum odpowiedzi – jest ono szczególnie przydatne przy opisie przebiegów niestacjonarnych drgań (o charakterze nieregularnym). Spektrum takie sporządzane na podstawie znanego ruchu podłoża, pozwala na oszacowanie maksymalnej odpowiedzi konstrukcji dla budynku o danym okresie drgań własnych i zadanym tłumieniu.

Ma to szczególne znaczenie w przypadku projektowania budowli na terenach zagrożonych wstrząsami. Spektra drgań stanowią też odpowiednią charakterystykę tych przebiegów ułatwiającą ocenę interakcji układu budynek–podłoże podlegającego drganiom, a także służą do porównywania wielkości drgań czy określaniu dominującej częstotliwości drgań.

W ostatnich latach podejmowane są próby wyznaczenia modelowych spektrów odpowiedzi, które odnoszą się do pewnych rodzajów drgań parasejsmicznych. Wyznaczono np. modelowe spektra odpowiedzi drgań wywołanych wstrząsami górniczymi. Podjęto próbę budowania modelu opartego na strukturze sztucznych sieci neuronowych, a opisującego wpływ warunków ruchowo-drogowych na spektrum odpowiedzi drgań generowanych przejazdami samochodów po jezdni drogi [por. Ciurej H., Kawecki J., Stecz P. (2003)].

Niniejszy rozdział jest próbą opisu przyspieszeniowego spektrum odpowiedzi drgań budynku generowanych przejazdami pociągów metra. Podstawą do przeprowadzenia odpowiednich analiz były dane zebrane przez wspomniany już system monitoringu drgań metra.

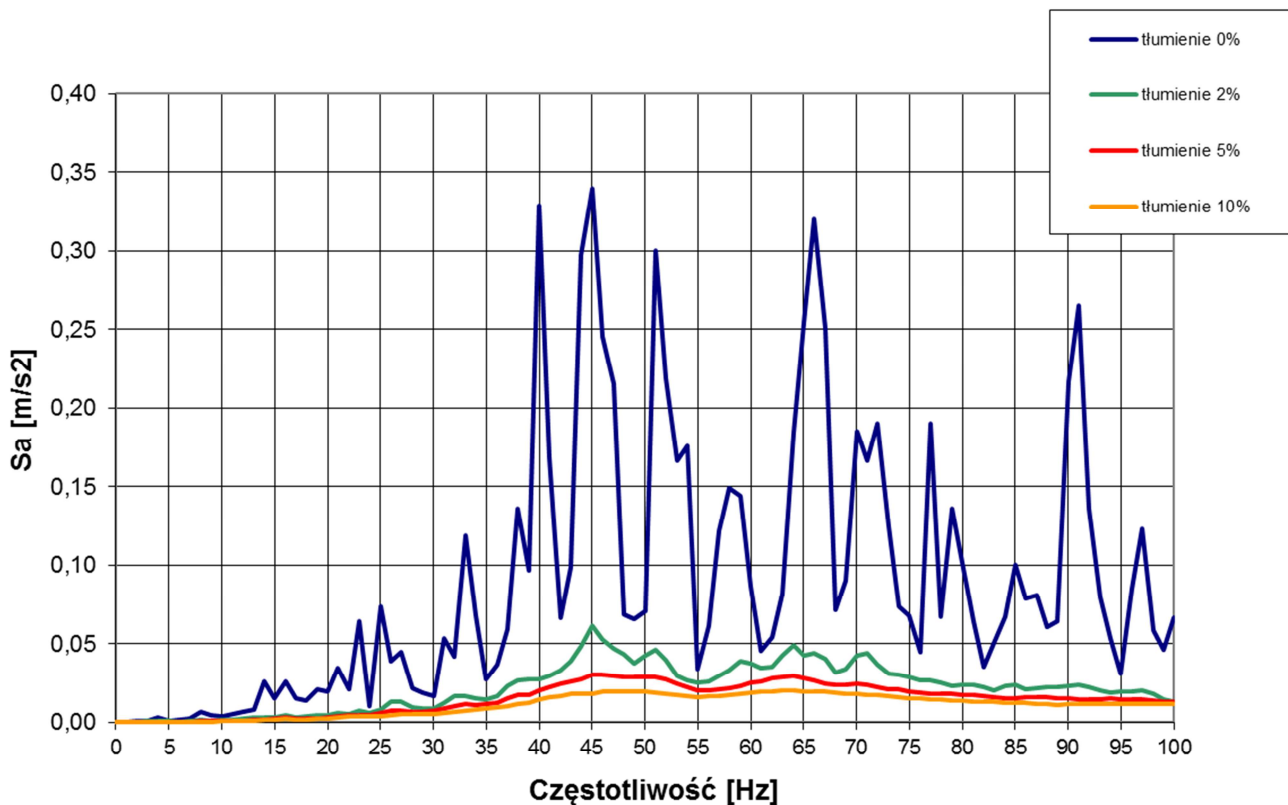
Jako dane wyjściowe z systemu monitorowania drgań metra warszawskiego posłużyły przebiegi czasowe drgań wyselekcjonowanych w ciągu doby pociągów metra. Przebiegi te następnie poddano analizie w programie Matlab i w wyniku zastosowania algorytmu wyznaczania spektrum odpowiedzi obliczono kolejne rzędne spektrum odpowiadające kolejnym częstotliwościom drgań z przedziału od 0 do 100 Hz.

4.1.3.1. Analiza wyników

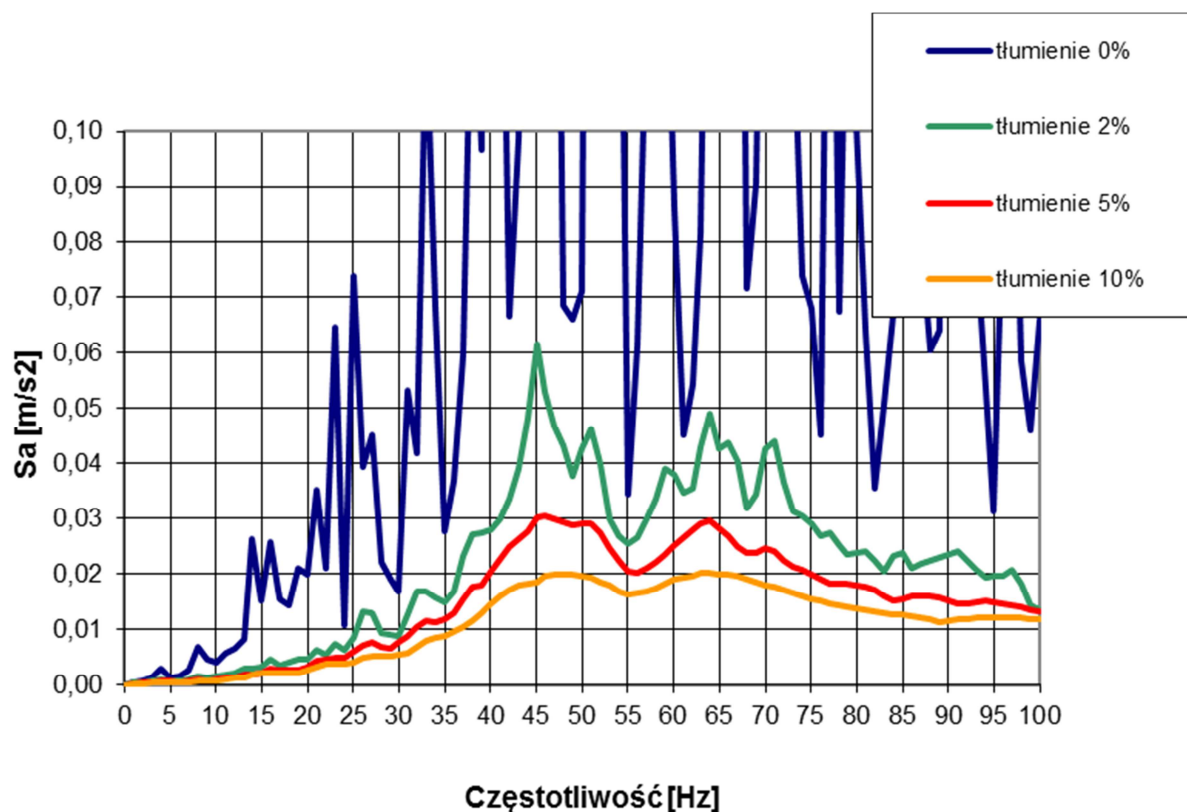
Analizie poddano przejazdy różnych pociągów metra (typu Metropolis). Zostały wyselekcjonowane wszystkie przejazdy badanych pociągów obejmujące kilka kolejnych dni. Z otrzymanych przebiegów czasowych otrzymano przyspieszeniowe spektrum odpowiedzi.

4.1.3.2. Wpływ tłumienia na zmiany rzędnych spektrum odpowiedzi

Na kolejnych rysunkach rys. 4.1.28 i 4.1.29 zaprezentowano spektra odpowiedzi, odpowiednio przy założonym ułamku tłumienia na poziomie 0%, 2%, 5% i 10%. Rysunek 4.1.29. obrazuje z większą dokładnością spektra o tłumieniu od 2% do 10%. Dla tłumienia 0% maksymalna odpowiedź budynku występuje dla częstotliwości 40 Hz i wynosi $0,329 \text{ m/s}^2$, odpowiednio dla spektrum o tłumieniu 2% wynosi ona $0,028 \text{ m/s}^2$, dla spektrum o tłumieniu 5% – $0,020 \text{ m/s}^2$, a dla spektrum o tłumieniu 10% rzędna osiąga wartość $0,015 \text{ m/s}^2$. Kolejne rzędne odpowiedzi budynku wystąpiły dla częstotliwości 45 Hz i przy ułamku tłumienia 0% i wynosiły odpowiednio $0,340 \text{ m/s}^2$, dla tłumienia 2% – $0,062 \text{ m/s}^2$, przy tłumieniu 5% – $0,030 \text{ m/s}^2$, a dla tłumienia 10% – $0,019 \text{ m/s}^2$. Podobnie rzecz się ma z kolejnymi lokalnymi maksimami, które dla tłumienia 0% wystąpiły przy rzędnych 51 Hz, 66 Hz i 91 Hz.



Rys. 4.1.28. Spektrum odpowiedzi w przypadku tego samego przejazdu pociągu przy różnych ułamkach tłumienia



Rys. 4.1.29. Powiększenie spektrum odpowiedzi dla tego samego przejazdu dla różnych ułamków tłumienia

4.1.3.3. Zmiany spektrum odpowiedzi w przypadku przejazdów wybranego pociągu metra

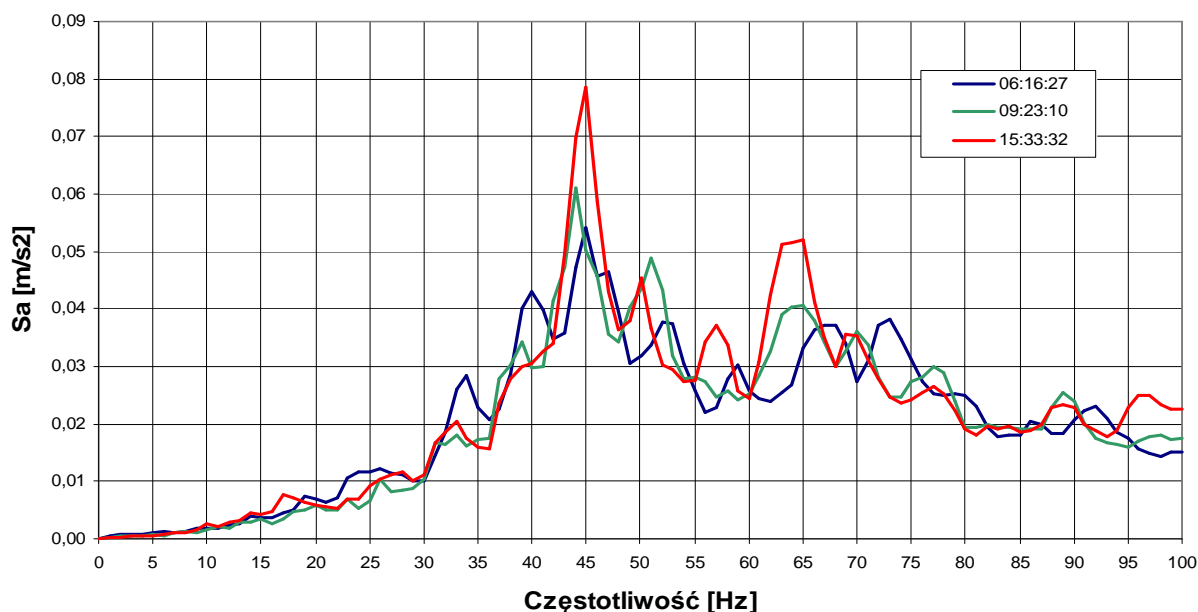
Dla przejazdów tego samego pociągu (rys. 4.1.28.) uwidocznione są dobowe zmiany rzędnych spektrum odpowiedzi, co może być związane ze stopniem wypełnienia pociągów metra na badanym odcinku przejazdu. Dla godzin szczytu zaobserwować można wyraźny wzrost rzędnych spektrum odpowiedzi. Maksymalne odpowiedzi uzyskane podczas przejazdów tego samego pociągu wynosiły kolejno:

Tab. 4.1.13. Wyselekcjonowane dane dotyczące przejazdów tego samego pociągu w ciągu doby

Pociąg 06:16:27		Pociąg 09:23:10		Pociąg 15:33:32	
Częstotliwość	S_a [m/s^2]	Częstotliwość	S_a [m/s^2]	Częstotliwość	S_a [m/s^2]
34	0,028	39	0,034	33	0,020
40	0,043	44	0,061	45	0,079
45	0,054	51	0,049	50	0,045
47	0,047	64	0,040	57	0,037
52	0,038	70	0,036	63	0,051
59	0,030	77	0,030	65	0,052

68	0,037	89	0,026	70	0,035
73	0,038			77	0,026
92	0,023			89	0,023
				97	0,025

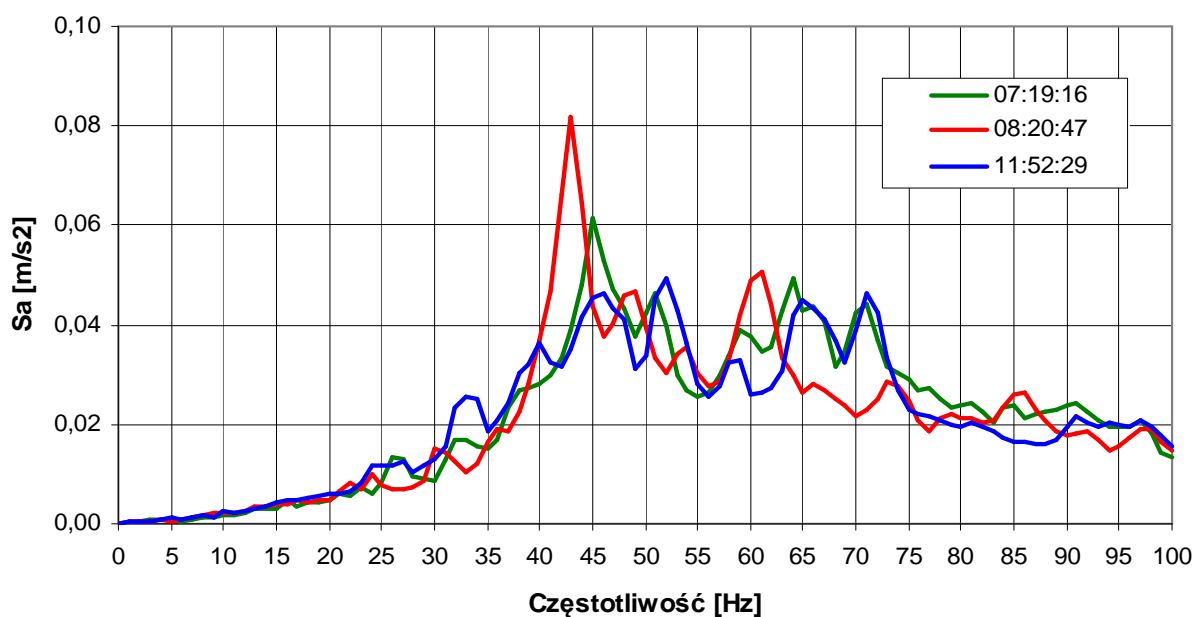
Poniżej zamieszczono przyspieszeniowe spektrum odpowiedzi dla tego pociągu, obrazujące dane zamieszczone w Tab. 4.1.13.



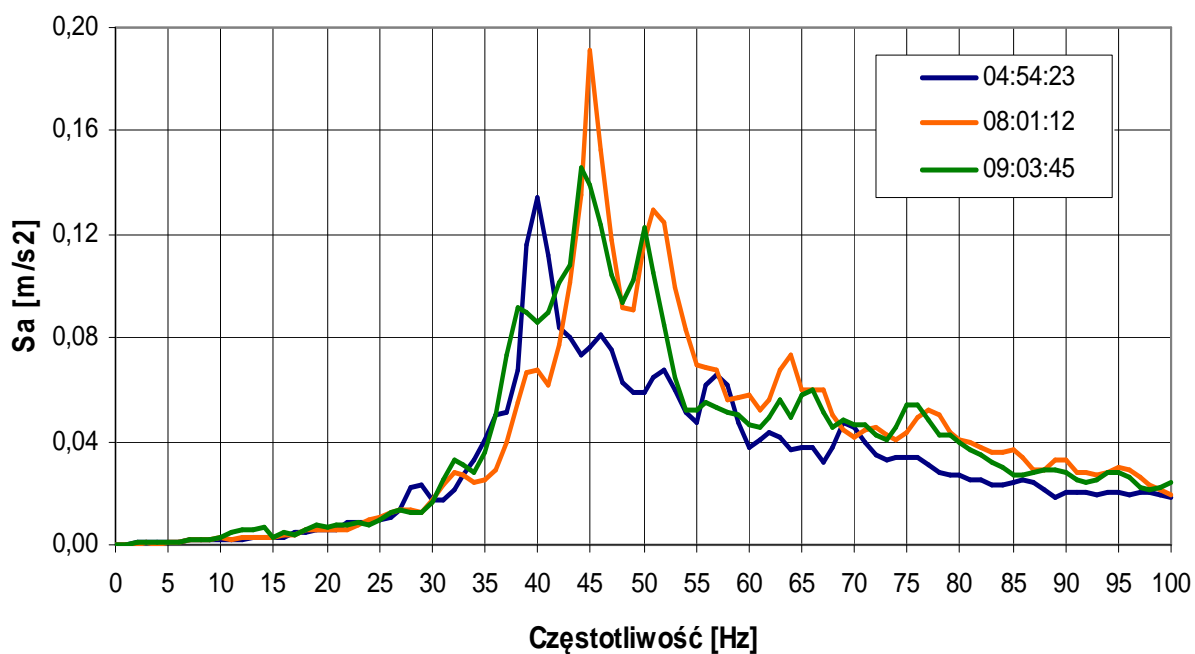
Rys. 4.1.30. Spektre odpowiedzi dla trzech różnych przejazdów tego samego pociągu w danym dniu, tłumienie 2%

4.1.3.4. Zmiany spektrum odpowiedzi w przypadku przejazdów różnych składów pociągów tego samego typu

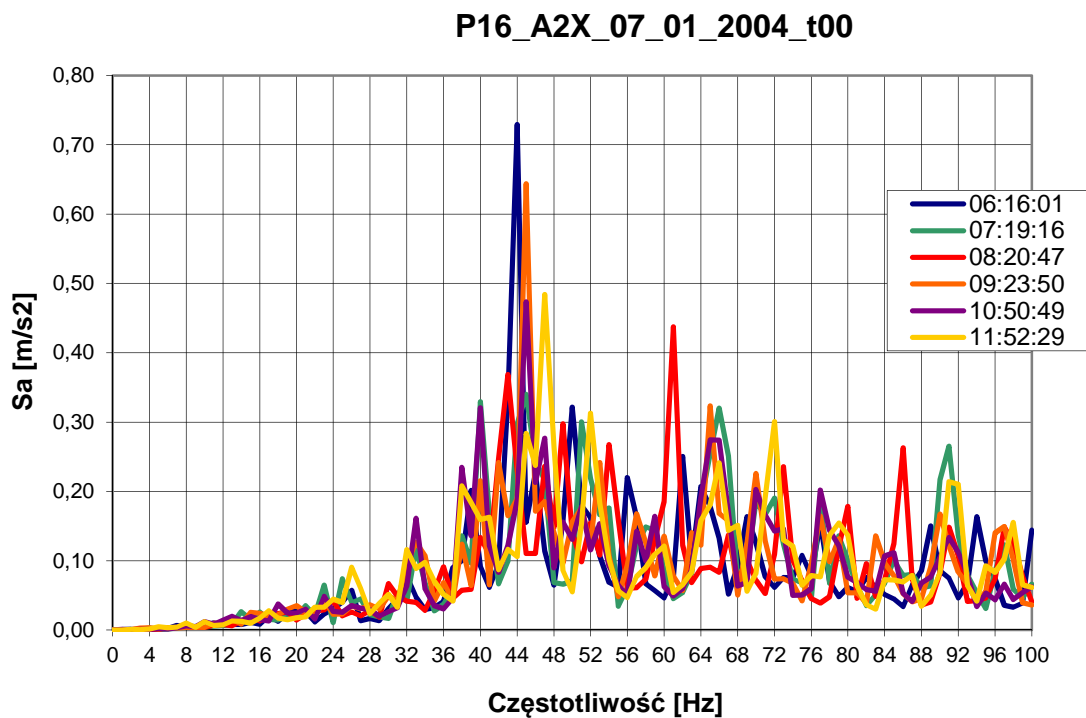
Przejazdom różnych pociągów tego samego typu towarzyszą zróżnicowane spektra odpowiedzi badanego budynku. Dla podanego tu przykładu pociągów 16 i 20 zaobserwować można wyraźną różnicę o rząd wielkości w wartościach rzędnych przyspieszeniowego spektrum odpowiedzi. Jak wynika z wcześniejszych prac prowadzonych w Instytucie Mechaniki Budowli, przyczyną takiego stanu może być większe bicie promieniowe kół składu nr 20 w stosunku do składu nr 16 spowodowane zmianami eksploatacyjnymi na skutek zużycia.



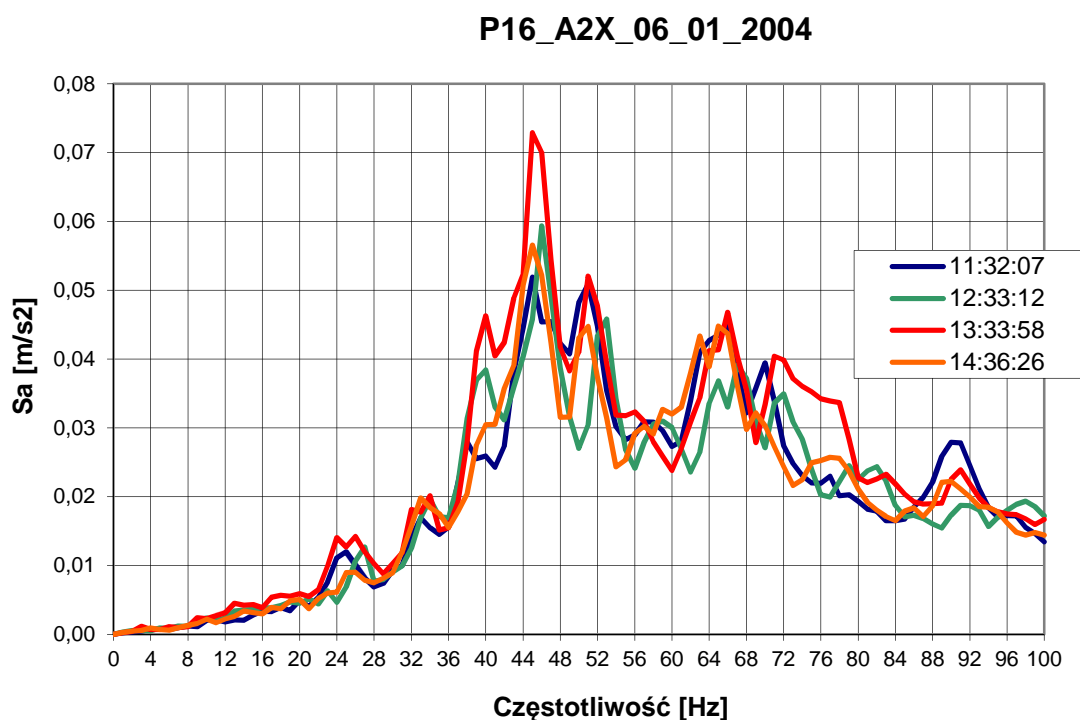
Rys. 4.1.31. Wybrane spektra odpowiedzi w przypadku przejazdów pociągu nr 16 w tym samym dniu, tłumienie 2%



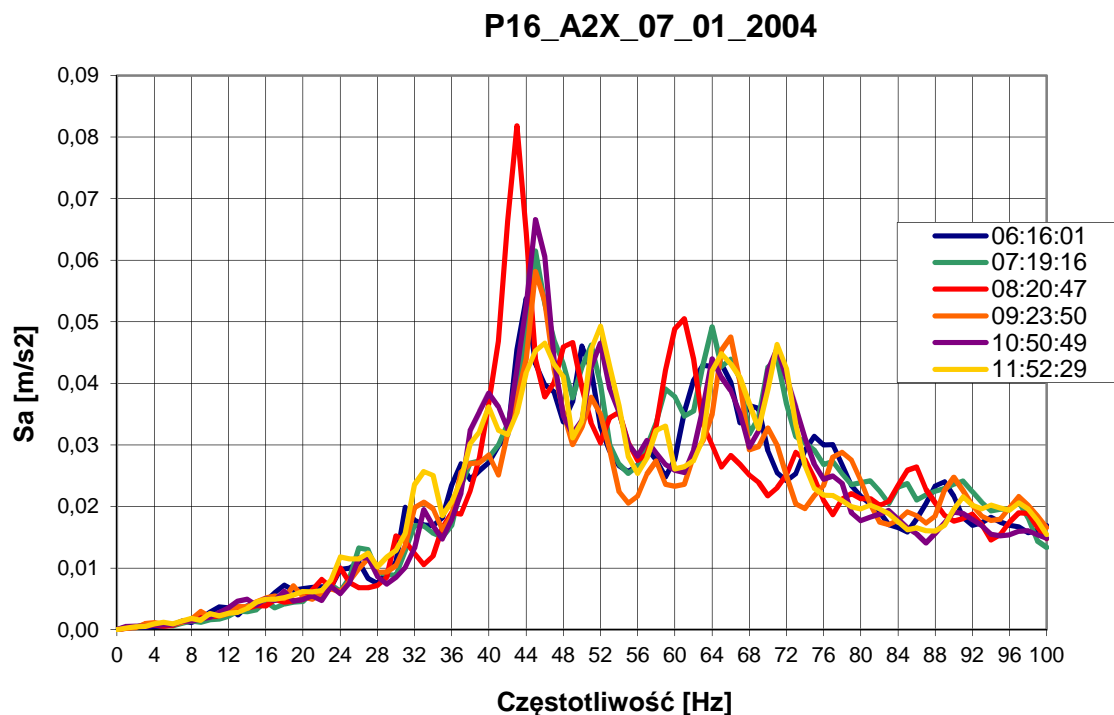
Rys. 4.1.32. Wybrane spektra Wybrane spektra odpowiedzi w przypadku przejazdów pociągu nr 20 w tym samym dniu, tłumienie 2%



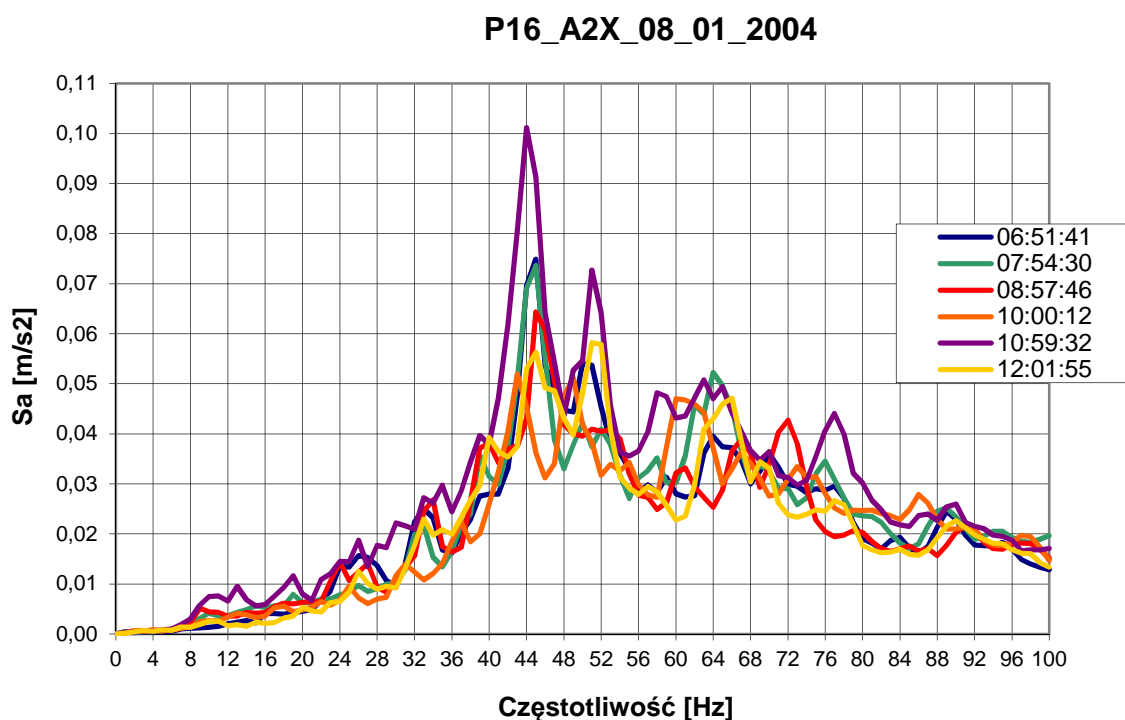
Rys. 4.1.33. Wybrane spektra odpowiedzi w przypadku przejazdów pociągu nr 16 w dniu 7.01.2004, tłumienie 0%



Rys. 4.1.34. Wybrane spektra odpowiedzi w przypadku przejazdów pociągu nr 16 w dniu 6.01.2004, tłumienie 2%

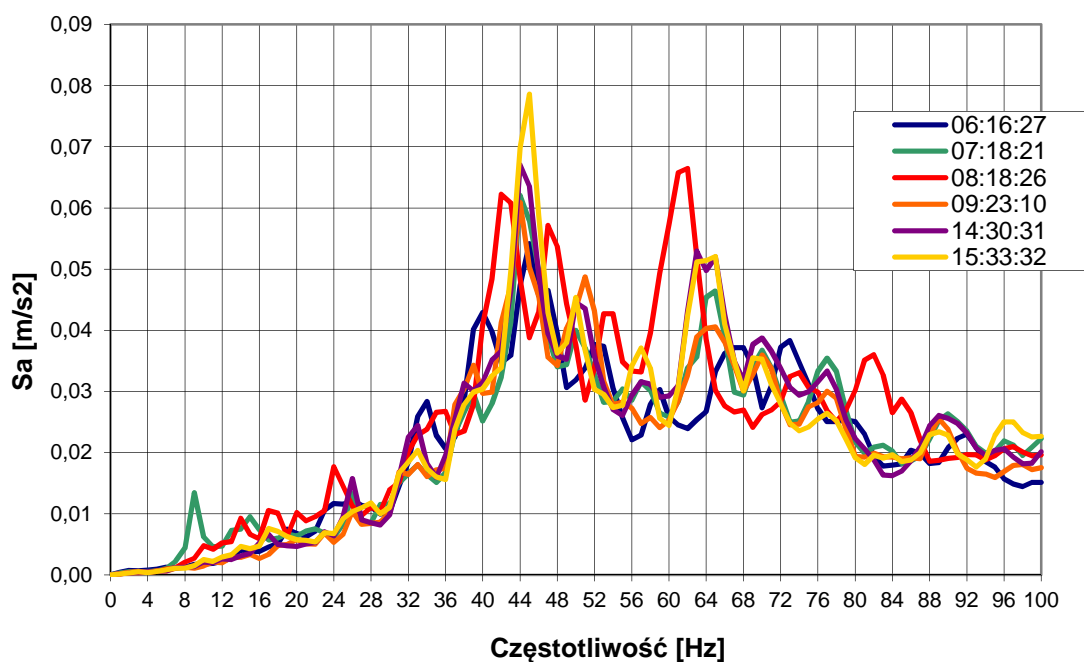


Rys. 4.1.35. Wybrane spektra odpowiedzi w przypadku przejazdów pociągu nr 16 w dniu 7.01.2004, tłumienie 2%



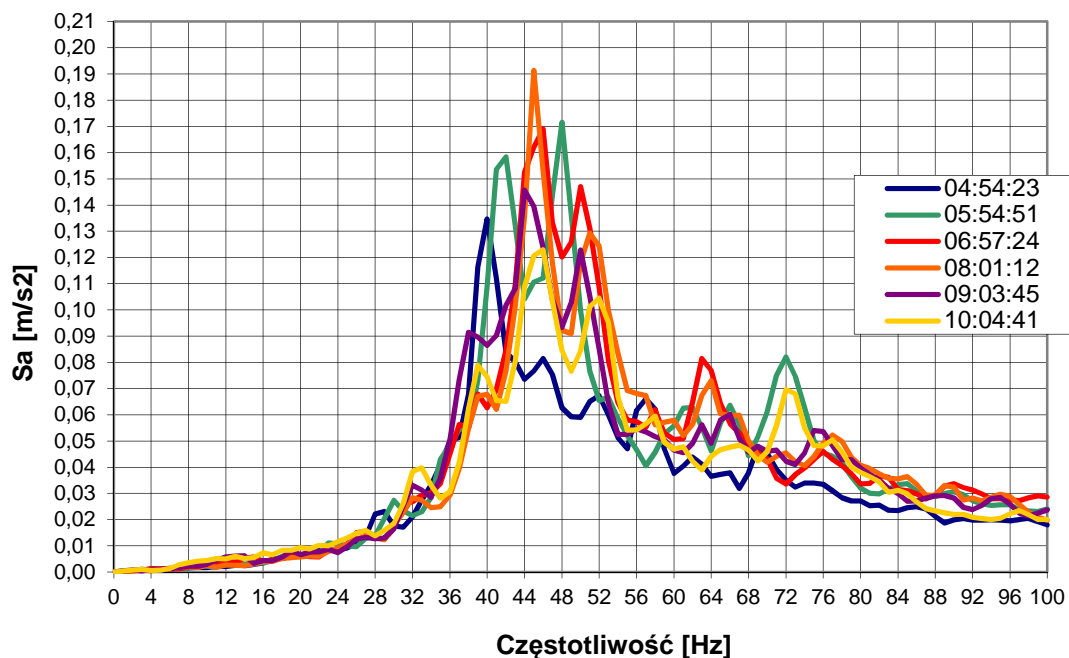
Rys. 4.1.36. Wybrane spektra odpowiedzi w przypadku przejazdów pociągu nr 16 w dniu 8.01.2004, tłumienie 2%

P16_A2X_09_01_2004



Rys. 4.1.37. Wybrane spektra odpowiedzi w przypadku przejazdów pociągu nr 16 w dniu 9.01.2004, tłumienie 2%

P20_A2X_07_01_2004



Rys. 4.1.38. Wybrane spektra odpowiedzi w przypadku przejazdów pociągu nr 20 w dniu 7.01.2004, tłumienie 2%

PODSUMOWANIE

- Zmiana współczynnika tłumienia z 0% na 2% powoduje zmianę maksymalnej wartości odpowiedzi budynku o rząd wielkości, zaś dalsze zwiększanie współczynnika tłumienia ma wpływ na ograniczenie odpowiedzi budynku w mniejszym stopniu np. zmiana tłumienia z 2% aż do 10% zmniejsza odpowiedź do około 1/3.
- Przejazdy tego samego pociągu, z praktycznie tą samą prędkością (około 60 km/h) mogą wywoływać różną, co do wielkości odpowiedź budynku najprawdopodobniej w zależności od stopnia wypełnienia (obciążenia) wagonów pasażerami.
- Przejazdy różnych pociągów tego samego typu dają różną wartość odpowiedzi dynamicznej budynku w zależności od stanu ich kół jak też stopnia wypełnienia wagonów pasażerami.

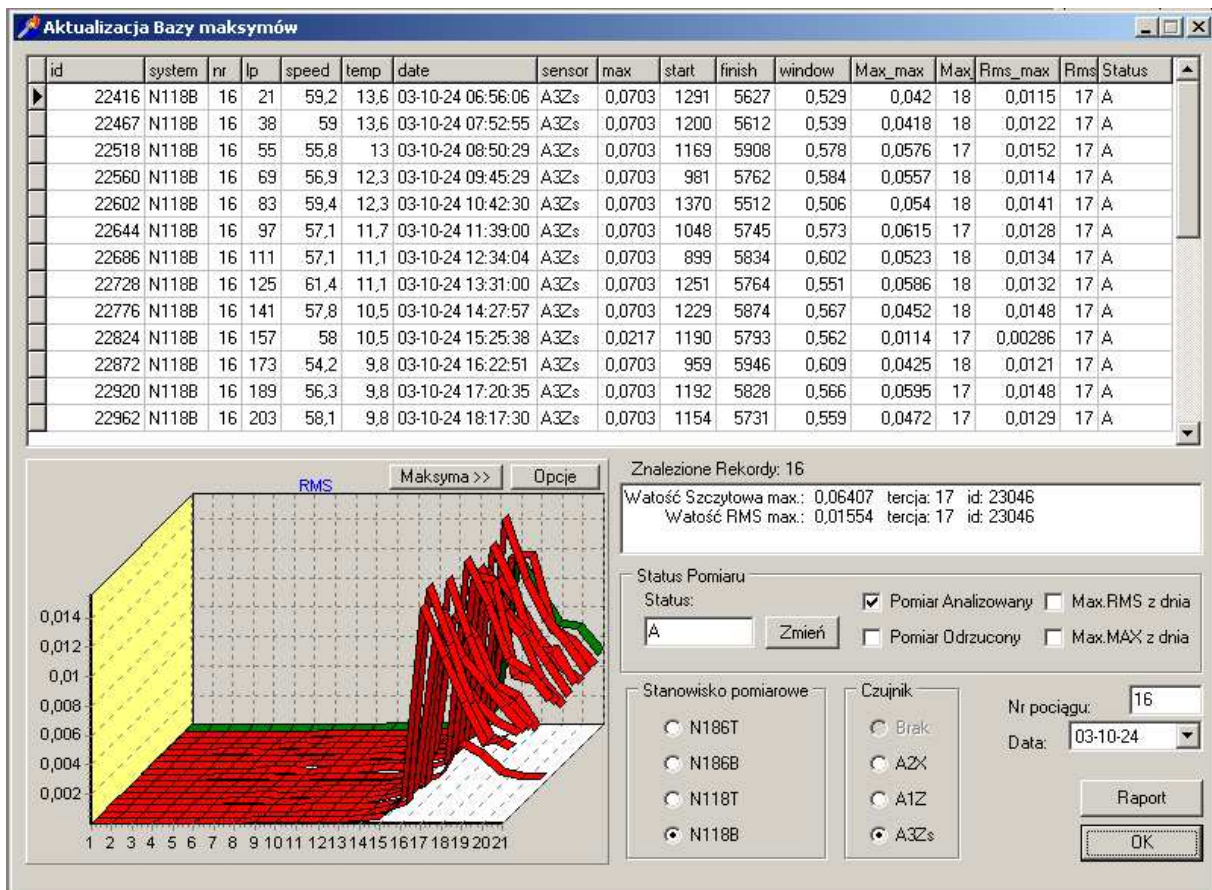
4.2. Wpływ drgań na ludzi w budynkach

Podstawowym celem systemu ciągłego monitorowania drgań w metrze warszawskim jest prowadzenie bieżącej oceny wpływu drgań na ludzi (przede wszystkim ocena wpływu na ludzi drgań pionowych stropów) tak, aby nie dopuścić by drgania od przejazdów poszczególnych pociągów osiągnęły niedopuszczalny poziom wpływu na ludzi na skutek wzrostu emisji drgań wywołanego postępującą w czasie deformacją kół pociągów.

Wrażliwość poszczególnych stropów (charakterystyki dynamiczne stropów) zależy m.in. od konstrukcji stropu, jego sztywności i wymiarów. Dlatego konieczny był dobór reprezentatywnych miejsc pomiaru składowej pionowej drgań stropu celem wykonania analiz wpływu tych drgań na ludzi przebywających w budynku.

Wyniki tych analiz, w odniesieniu do wymaganych dla ludzi granic komfortu w zakresie biernego odbioru drgań, stanowią kryterium oceny dopuszczenia pociągu do dalszej eksploatacji.

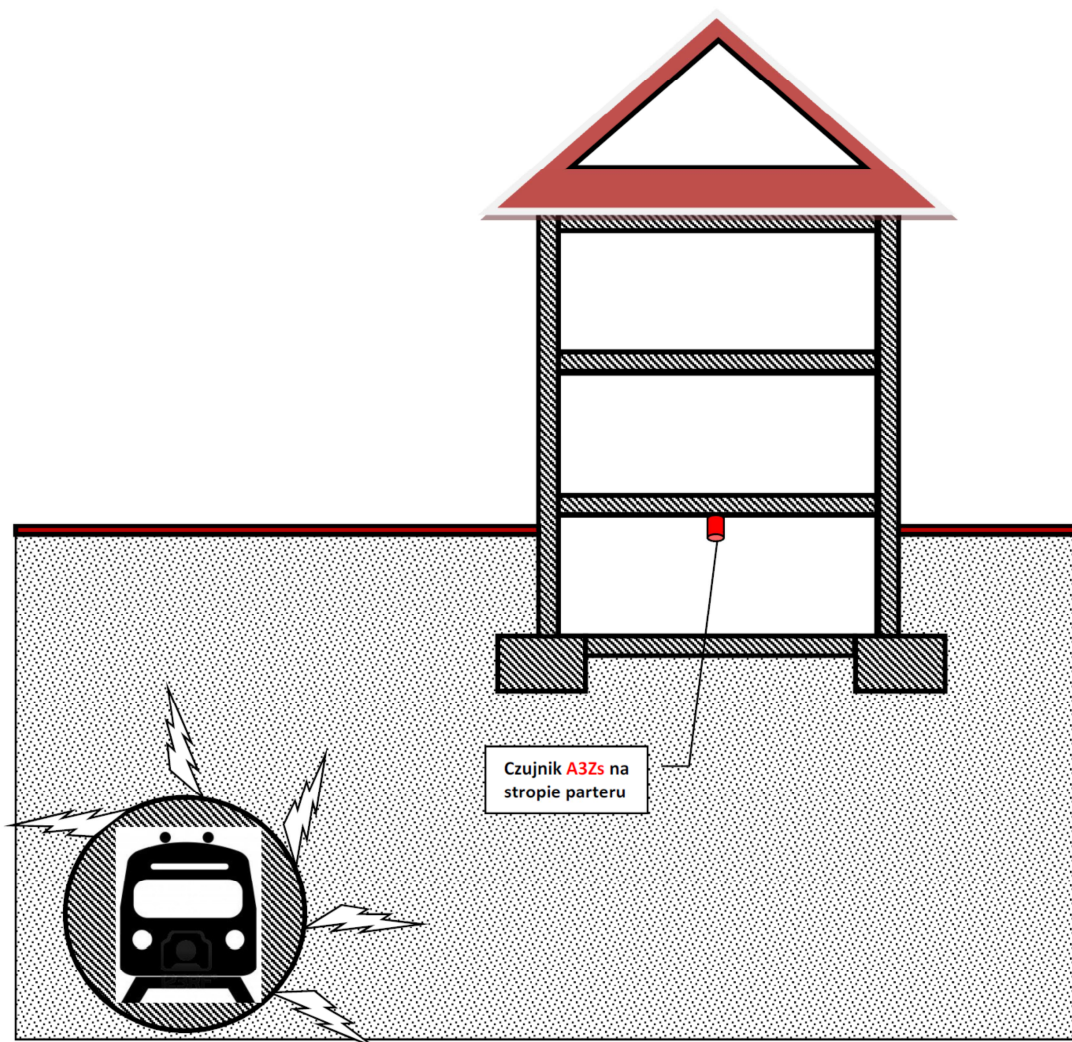
Z przebiegu czasowego drgań, zarejestrowanego podczas każdego przejazdu wylicza się największą wartość RMS ze wszystkich tercji.



Rys. 4.2.1. Wszystkie przejazdy wybranego składu pociągu w ciągu jednej doby. Kolor czerwony oznacza przejazd przekraczający zadany próg (przekroczenie wartości sygnalizacyjnej przy sterowaniu skierowania kół do profilowania). Kolor zielony to przejazd bez naruszenia progów komfortu. Na osi poziomej przedstawione są poszczególne numery tercji [por. Rozdział 2]. Oś pionowa reprezentuje wartości rms przyspieszenia drgań [m/s^2]

Zaprezentowany powyżej rysunek (rys. 4.2.1) pochodzący z systemu monitorowania drgań Metra Warszawskiego przedstawia wszystkie przejazdy jednego z wybranych składów pociągu METROPOLIS w ciągu dnia (w dziedzinie częstotliwości). Ze wszystkich przejazdów danego składu w ciągu dnia, tylko jeden odbył się bez naruszenia progów komfortu. Taka sytuacja była dość charakterystyczna dla przełomu lat 2003/2004, kiedy rozpoczęto monitorowanie drgań z uwagi na problemy z kołami w składach pociągów typu Metropolis (problemy te pojawiły się na przełomie lat 2001/2002). Wspomniany rysunek potwierdza fakt, że system ciągłego monitorowania drgań w Metrze Warszawskim okazał się przydatny w diagnostyce. Niestety w tamtym czasie z różnych powodów nie zawsze wykorzystywano w pełni dane z systemu i jak widać na wspomnianym rysunku występowały przekroczenia progu odczuwalności drgań przez ludzi i progów komfortu wibracyjnego należnego ludziom w budynkach usytuowanych w sąsiedztwie linii Metra w Warszawie.

Dane przedstawione w niniejszym rozdziale są wynikiem rejestracji pochodzących z czujnika na stropie najniższej kondygnacji budynku z systemem ciągłego monitoringu drgań.

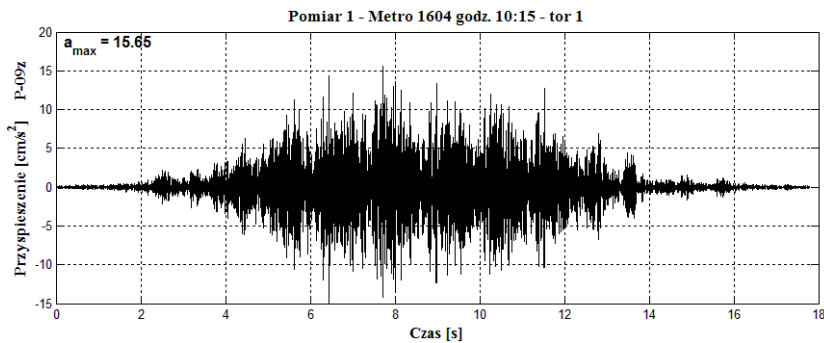


Rys. 4.2.2. Ogólny schemat umieszczenia na stropie najniższej kondygnacji czujnika rejestrującego drgania w celu analizy wpływu drgań na ludzi w budynku

4.2.1. Dobowy (krótkookresowy) rozkład drgań

W przypadku określenia komfortu wibracyjnego należnego ludziom w budynkach, parametrem decyzyjnym są maksymalne wartości RMS uzyskane w poszczególnych pasmach tercjowych z analizy wpływu na ludzi poziomych i pionowych drgań stropów. Ponieważ w badaniach drgań generowanych przez metro w Warszawie stwierdzono, że z reguły większy wpływ na ludzi wywierają drgania pionowe stropów, to w przypadku omawianego tu systemu monitoringu w metrze warszawskim za parametr decyzyjny przyjęto wpływ na ludzi pionowych drgań stropów. Istotne znaczenie dla wyciągania wniosków praktycznych, może mieć rozkład tych wartości w czasie. Poniżej podano wybrane wyniki analizy tego rozkładu w cyklu dobowym.

Zaprezentowane poniżej dane dotyczą wybranego przekroju pomiarowego zainstalowanego w budynku N118.



Rys. 4.2.3. Przykładowy przebieg czasowy drgań pionowych stropu w budynku N118

Każdy z zarejestrowanych przebiegów drgań pionowych stropu (rys. 4.2.3) jest automatycznie poddawany analizie wpływu tych drgań na ludzi wg zasad opisanych w rozdziale 2 niniejszej pracy. W rozdziale 3 opisano schemat analizy danych, który wykorzystano w niniejszym rozdziale aby otrzymać wyniki do przeprowadzenia dalszych analiz.

W dalszej części tego rozdziału przedstawiono bardziej szczegółowe analizy – w odniesieniu do dobowego rozkładu dla czujnika umieszczonego na stropie (A3Zs).

Do bardziej szczegółowej analizy wybrano składy pociągów, które w dłuższym czasokresie charakteryzują się dużymi i małymi wartościami WODL.

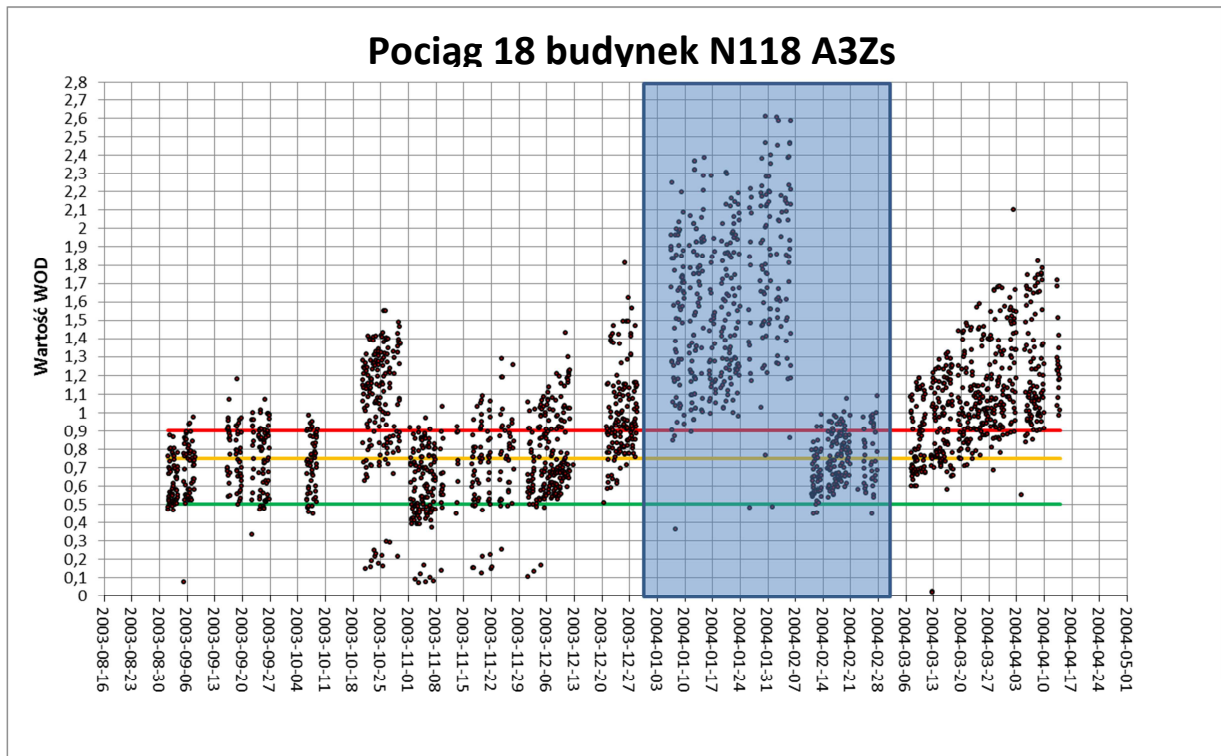
Przedstawione na wykresach wartości WODL prezentują największą (max) wartość skuteczną (średniokwadratową; rms) przyspieszenia drgań, prezentowanego w pasmach tercjowych (badanie wpływu drgań na ludzi w budynkach zgodnie z normą PN-88/B-02171) i normowanych, do wartości odpowiedniego progu odczuwalności drgań. Każdy przejazd reprezentowany jest na wykresie w postaci pojedynczego punktu – kropki. W ciągu jednego dnia może wystąpić od kilku do kilkunastu przejazdów tego samego składu. Zdarzają się także dni (bądź tygodnie), kiedy dany skład nie jest eksploatowany i w związku z tym brak jest rejestracji przejazdów. Poszczególne linie uwidocznione na wykresach informują kolejno o zdefiniowanych w systemie wartościach progowych (ustalonych tak, aby były to wartości reprezentatywne dla całych grup budynków sąsiadujących z tunelami metra):

Kolor zielony – 50% dopuszczalnej wartości zdefiniowanego progu

Kolor żółty – 75% dopuszczalnej wartości zdefiniowanego progu

Kolor czerwony – 90% dopuszczalnej wartości zdefiniowanego progu

Szczegółowa analiza dobowa składu pociągu nr 18



Rys. 4.2.4. Rozkład wartości WODL w przypadku pociągu nr 18, przekrój N118. Zacielenie pole reprezentuje czas, z którego wybrano dane do analiz

W przypadku powyższego składu poddano szczegółowo analizie okres dwóch miesięcy w trakcie których zaobserwować można duże zmiany w wartości współczynnika WODL (styczeń-luty 2004). Analiza dotyczy rozkładu dobowego w kolejnych dniach i rozkładu wartości WODL w zależności od pory dnia (z uwzględnieniem godzin maksymalnego prawdopodobnego obciążenia składów).

W analizie podano informacje dotyczącą toczenia składu, która wystąpiła w dniu 30.10.2003 – rezultat został uwidocznił na powyższym wykresie (spadek wartości WODL). Kolejne miało miejsce początkiem lutego 2004, między 6, a 10 lutego 2004.

W celu dokonania poprawnej analizy danych rozkładu dobowego – co miało pomóc w zdefiniowaniu godzin maksymalnego obciążenia – maksymalnego wypełnienia pociągów pasażerami wykorzystano dane udostępnione dzięki uprzejmości pracowników Metra Warszawskiego.

Na poniżej zaprezentowanych tabelach wyróżniono dwie stacje, pomiędzy którymi jest usytuowany badany przekrój pomiarowy. Tabele ilustrują dobowe obciążenie poszczególnych stacji pasażerami.

Tab.4.2.1. Dane dotyczą środy 24.03.2004, kolorem żółtym wyróżniono interesujące nas stacje A9 (Raławicka) i A10 (Pole Mokotowskie) spośród dostępnych danych

godzina	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	A13	A14	A15
0	16	12	30	21	12	33	37	28	16	52	84	85	62	57
4	19	23	25	18	7	8	27	14	9	7	14	19	5	31
5	118	226	262	138	136	218	353	137	128	99	275	840	94	843
6	677	798	812	585	481	612	1248	356	412	332	958	2755	332	2186
7	2744	2508	2324	1624	1464	1918	2682	806	1072	938	2674	5764	755	4630
8	2464	2303	1980	1455	1357	1521	2124	842	1170	1093	2450	3635	824	4173
9	1120	1081	1021	872	707	1053	1356	490	770	839	1681	2664	607	2590
10	707	716	780	748	657	832	942	547	571	835	1585	2220	588	1734
11	697	689	722	787	564	923	909	641	549	919	1769	2326	670	1766
12	633	628	798	782	617	993	999	681	643	1125	2201	2455	805	1856
13	686	670	849	958	669	1139	1151	811	873	1581	2305	2658	1094	2277
14	781	724	1085	958	710	1173	1246	999	1290	1997	2814	3192	1303	2430
15	1057	976	1453	1192	860	1627	2008	1571	1179	2989	4145	4230	2083	3712
16	1120	1092	1330	1177	840	2236	3217	1604	1514	3722	5599	4974	3209	4880
17	1097	1017	1156	1118	792	2085	3094	1246	1302	2643	4902	3998	3133	3719
18	996	877	899	929	689	1431	1711	1654	946	1619	3263	4065	1980	2550
19	703	676	707	623	533	1010	1159	685	605	1178	2188	2844	1383	1813
20	526	475	525	476	339	702	904	568	460	797	1469	1902	943	1236
21	344	363	339	323	265	445	585	428	281	501	880	1765	609	897
22	200	150	272	132	152	266	367	281	138	501	763	1168	427	703
23	96	60	105	69	77	101	149	65	63	219	300	519	251	247

Tab.4.2.2. Dane dotyczą soboty 27.03.2004, kolorem żółtym wyróżniono interesujące nas stacje A9 (Raławicka) i A10 (Pole Mokotowskie) spośród dostępnych danych

godzina	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	A13	A14	A15
0	29	17	43	25	34	51	50	14	27	98	119	184	98	60
1														
4	27	22	23	17	8	6	19	10	9	10	17	26	9	27
5	153	260	265	158	154	247	384	171	145	139	327	895	111	912
6	737	891	884	635	497	662	1404	409	439	409	1108	2858	386	2542
7	3080	2673	2527	1776	1427	1968	3069	965	1378	1196	2941	6504	1062	5737
8	2629	2432	2204	1598	1227	1670	2447	1033	1381	1487	2666	5675	1006	5384
9	1323	1252	1188	986	853	1272	1779	778	1020	1579	1994	3841	942	3258
10	992	986	979	878	666	1178	1281	678	793	1159	1956	2961	841	2269
11	955	797	1025	937	672	1096	1367	764	723	1327	2108	3182	1097	2488
12	750	706	851	953	652	1241	1274	889	728	1505	2708	3137	1023	2289
13	855	859	942	1046	711	1274	1271	987	931	1916	2891	3575	1239	2756
14	927	887	1016	1315	804	1592	1513	1068	1277	2004	3526	4345	1398	3132
15	1226	1097	1228	1421	865	2043	2415	1314	1568	3001	4033	5187	1989	4231
16	1265	1115	1328	1403	989	2332	3686	1713	1571	3785	4581	6137	3101	5671
17	1244	1219	1257	1293	808	2343	3257	1477	1370	2844	5325	6801	2872	4180
18	951	1072	1071	1197	877	1798	2098	1098	1115	2068	3769	4925	2129	3235
19	767	843	829	1008	620	1454	1299	1094	774	1537	2825	3786	1531	2196
20	561	579	605	649	407	933	954	905	526	1374	2155	3059	1161	1177
21	376	355	430	432	251	585	763	675	365	747	1303	2577	765	419
22	183	196	271	205	188	394	443	339	230	722	878	1880	608	208
23	137	85	100	61	84	172	179	125	86	320	441	1070	307	134

Badania stanu wypełnienia składu (ilości pasażerów) w poprzednich okresach prowadzono wrywkowo, stąd pewne trudności następcza próba porównania ich z danymi ze zbliżonego okresu. Ponadto trzeba mieć na uwadze, że dane te dotyczą ilości pasażerów, którzy weszli na daną stację kasując bilet.

Dane te mogą jedynie posłużyć do wyznaczenia orientacyjnych godzin tzw. szczytu (godzin o największym natężeniu ruchu pasażerów) jednak z trudnym do oszacowania błędem.

Dzięki danym uzyskanym z Metra Warszawskiego ustalono godziny szczytu w rozważanym okresie lat 2003 – 2004. Są to odpowiednio godziny:

Poniedziałek – piątek (dni robocze):

07:00 – 08:00

14:00 – 18:00

Soboty:

11:00 – 15:00

17:00 – 18:00

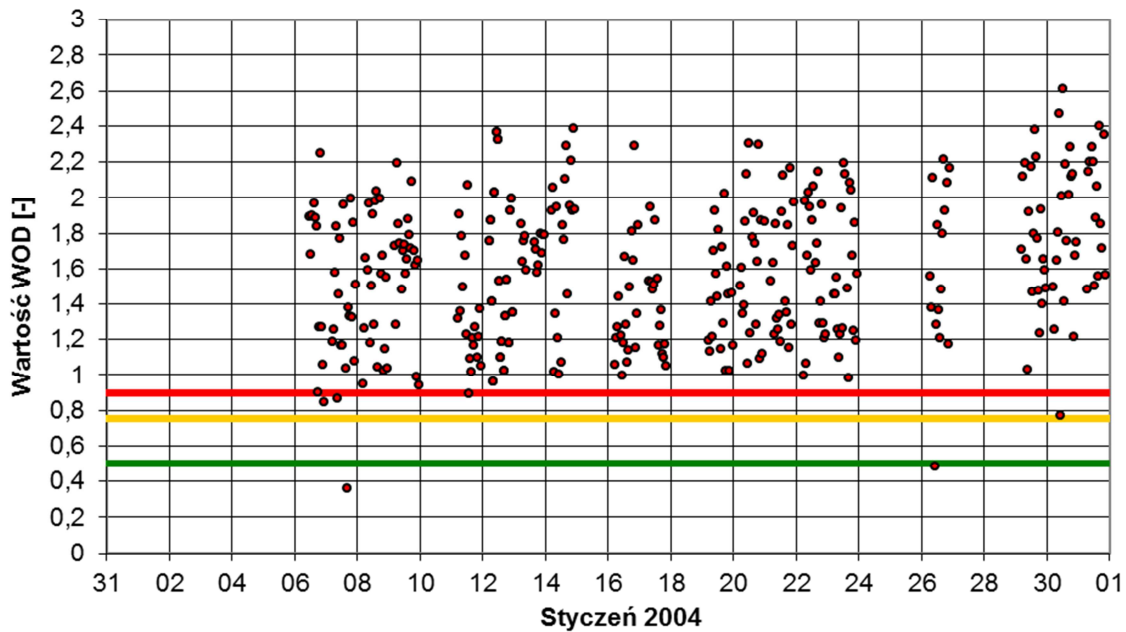
Z uwagi na różnice w godzinach szczytu i niewielką ilość danych dalszej analizie poddano wyniki z przejazdów w dni robocze tj. od poniedziałku do piątku.

Poniżej zobrazowano w sposób graficzny dane dotyczące wartości WODL (unormowanej wartości maksymalnej RMS z analizy) odpowiadające przejazdowi pociągu nr 18, w styczniu 2004. Dane te poddano bardziej szczegółowej analizie w kontekście rozkładów dobowych, aby sprawdzić czy istnieje zależność pomiędzy stopniem wypełnienia (estymowanym na podstawie podanych godzin szczytu), a wartością przyspieszenia drgań rejestrowaną w budynku (drgania stropu odpowiadające za odczucie komfortu mieszkańców), wyrażoną unormowanym wskaźnikiem WODL.

Szczegółowo zaprezentowano dane dotyczące przejazdów składu pociągu nr 18 w okresie dwóch miesięcy: stycznia i lutego, uwzględniając tylko dni robocze (z uwagi na inny godzinowy rozkład stopnia wypełnienia pasażerami w dni wolne od pracy). Na poniższych wykresach nie uwzględniono także czasu porannego szczytu, który trwa tylko godzinę i z tego powodu nastęcza sporych problemów w analizie danych stopnia wypełnienia pociągów.

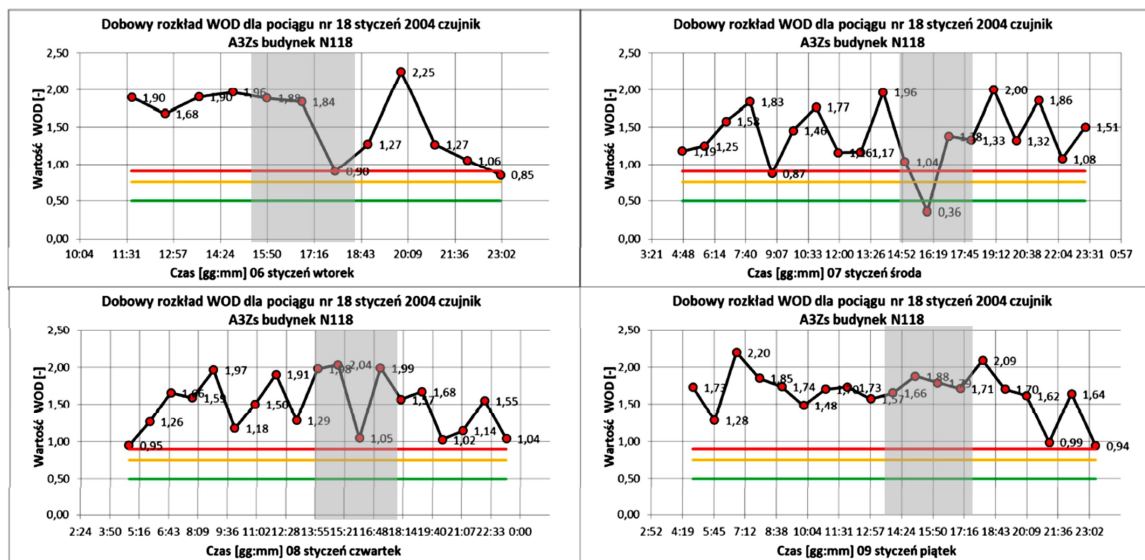
Miesiąc styczeń 2004 roku

Pociąg nr 18 Budynek N118

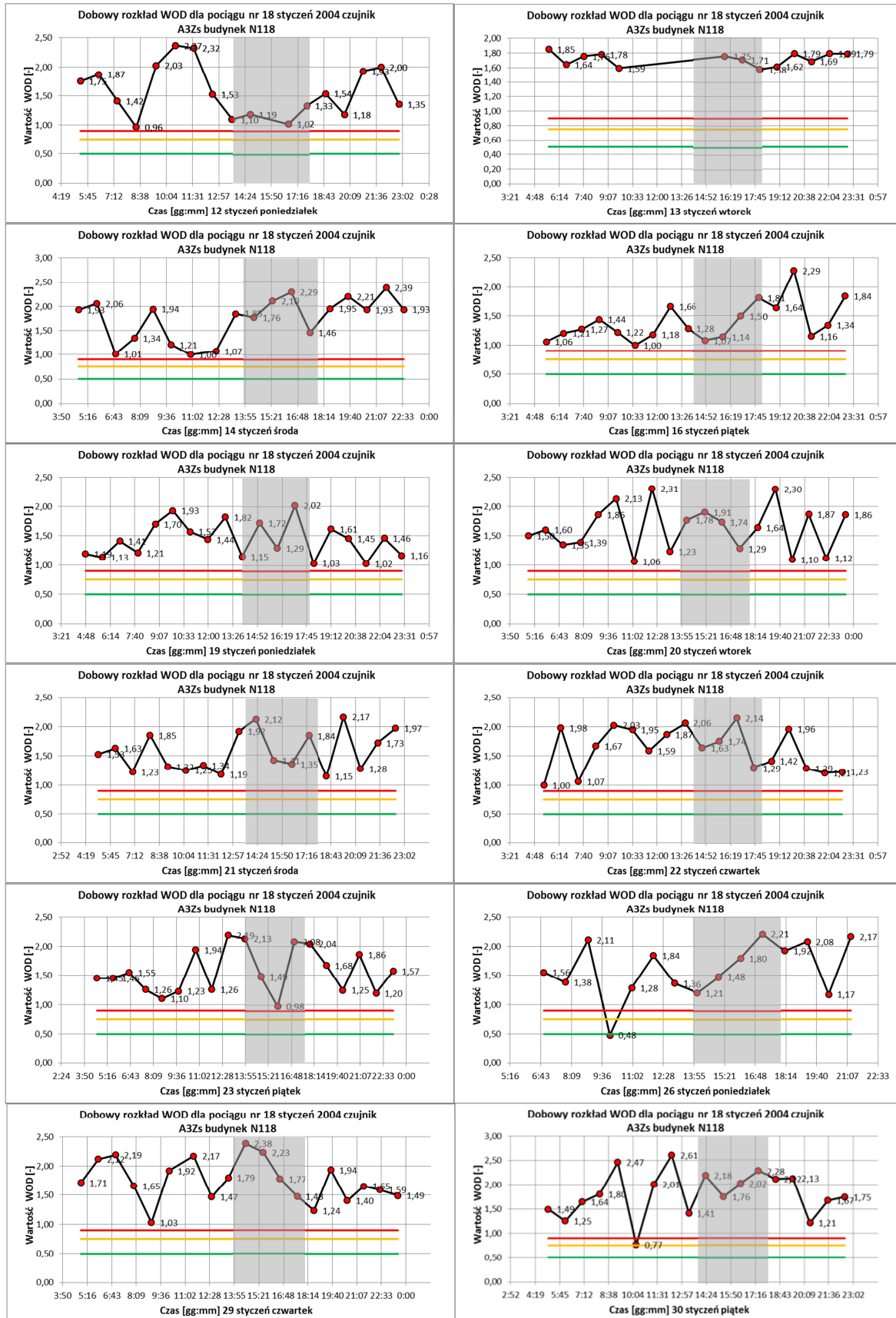


Rys.4.2.5. Miesięczny rozkład wartości WODL w przypadku pociągu nr 18

Poniżej przedstawiono dane dotyczące dobowych rozkładów poniedziałek-piątek w miesiącu styczniu w przypadku składu nr 18.



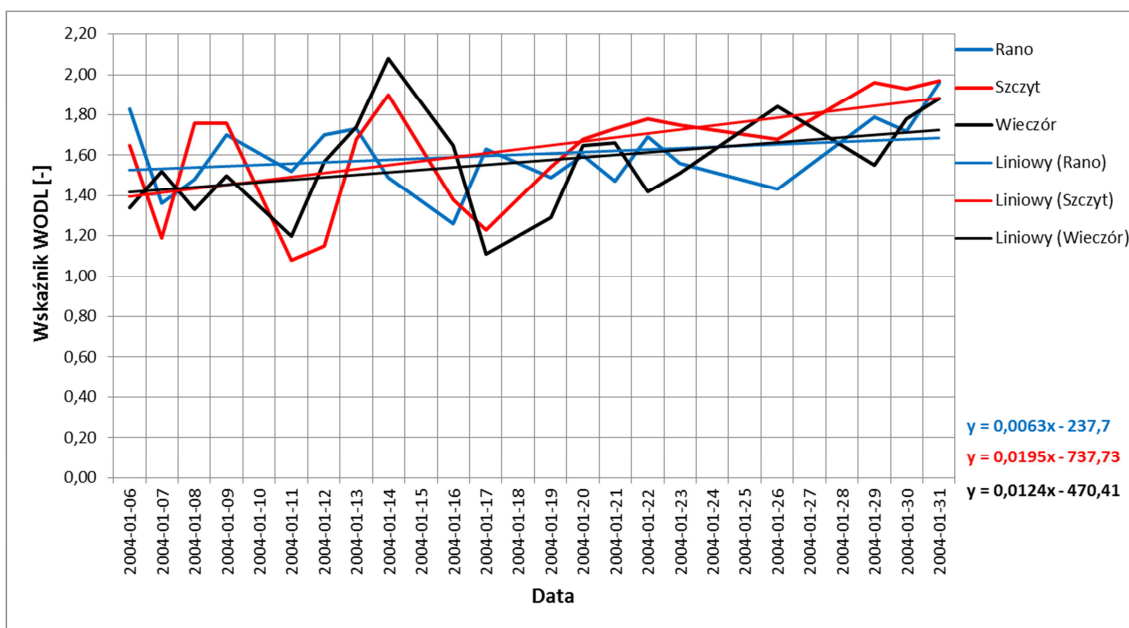
Rys.4.2.6. Dobowy rozkład WODL dla pociągu nr 18 z zaznaczeniem szczytu popołudniowego



Rys.4.2.7. Dobowy rozkład wartości wskaźnika WODL w przypadku pociągu nr 18 z zaznaczeniem szczytu popołudniowego

Tab. 4.2.3. Uśrednione wartości wskaźnika WODL w przypadku poszczególnych dni z rozróżnieniem na pory dnia (rano, godziny szczytu 14:00 – 18:00 i godziny wieczorne) – skład nr 18, styczeń

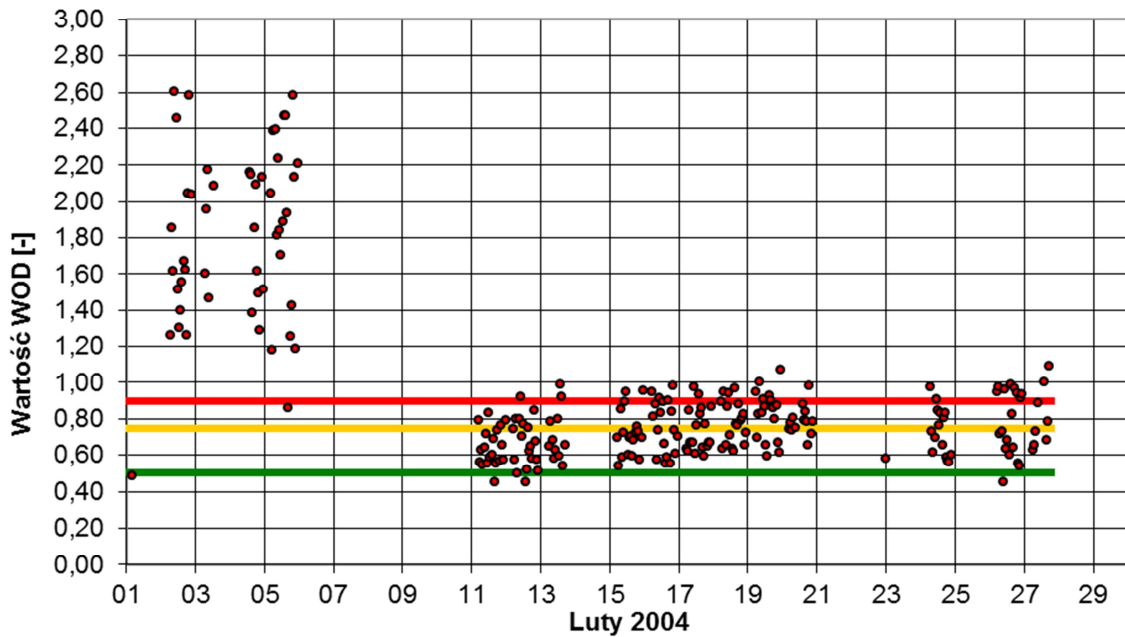
Pociąg nr 18					
Lp.	Data	Liczba przejazdów	Średni WODL		
			Rano	Szczyt	Wieczór
1	2004-01-06	12	1,83	1,65	1,34
2	2004-01-07	19	1,36	1,19	1,52
3	2004-01-08	19	1,48	1,76	1,33
4	2004-01-09	19	1,70	1,76	1,50
5	2004-01-11	18	1,52	1,08	1,20
6	2004-01-12	34	1,70	1,15	1,57
7	2004-01-13	13	1,73	1,68	1,74
8	2004-01-14	18	1,49	1,90	2,08
9	2004-01-16	18	1,26	1,38	1,65
10	2004-01-17	14	1,63	1,23	1,11
11	2004-01-19	19	1,49	1,54	1,29
12	2004-01-20	19	1,60	1,68	1,65
13	2004-01-21	18	1,47	1,73	1,66
14	2004-01-22	18	1,69	1,78	1,42
15	2004-01-23	19	1,56	1,75	1,51
16	2004-01-26	15	1,43	1,68	1,84
17	2004-01-29	19	1,79	1,96	1,55
18	2004-01-30	18	1,72	1,93	1,78
19	2004-01-31	14	1,96	1,97	1,88
Wartość średnia			1,60	1,62	1,56
Odchylenie standardowe			0,1739	0,2820	0,2463
Wartość maksymalna			1,96	1,97	2,08
Wartość minimalna			1,26	1,08	1,11



Rys. 4.2.8. Graficzna prezentacja wyników z tabeli 4.2.3 wartości WODL w przypadku pociągu nr 18 z uwzględnieniem trendu liniowego dla każdej obserwowanej pory dnia

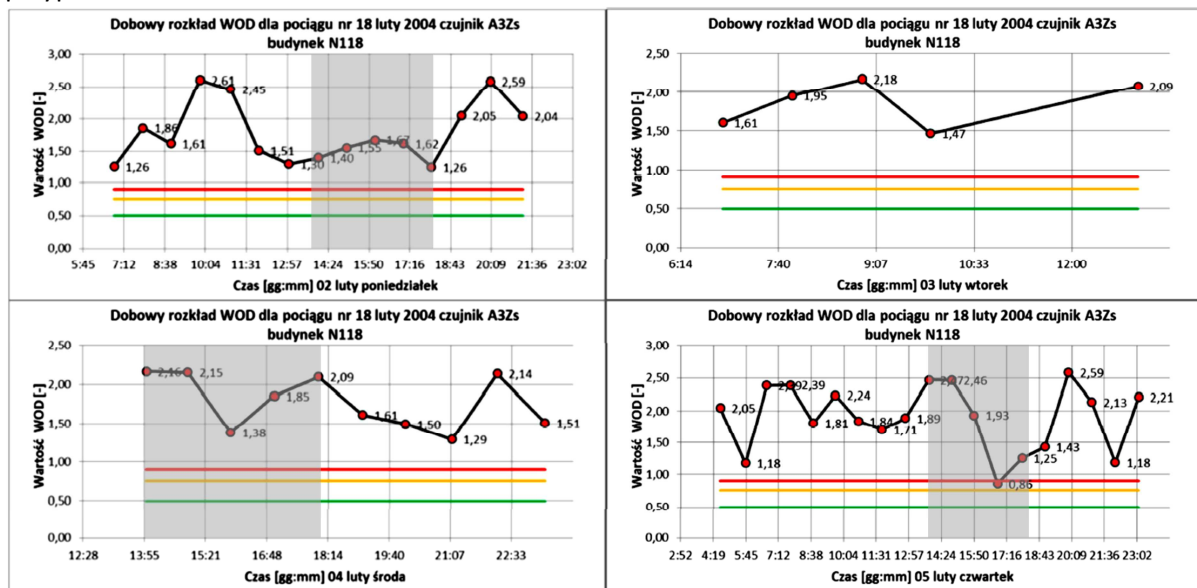
Miesiąc luty 2004 roku

Pociąg nr 18 Budynek N118



Rys. 4.2.9. Miesięczny rozkład wartości WODL w przypadku pociągu nr 18

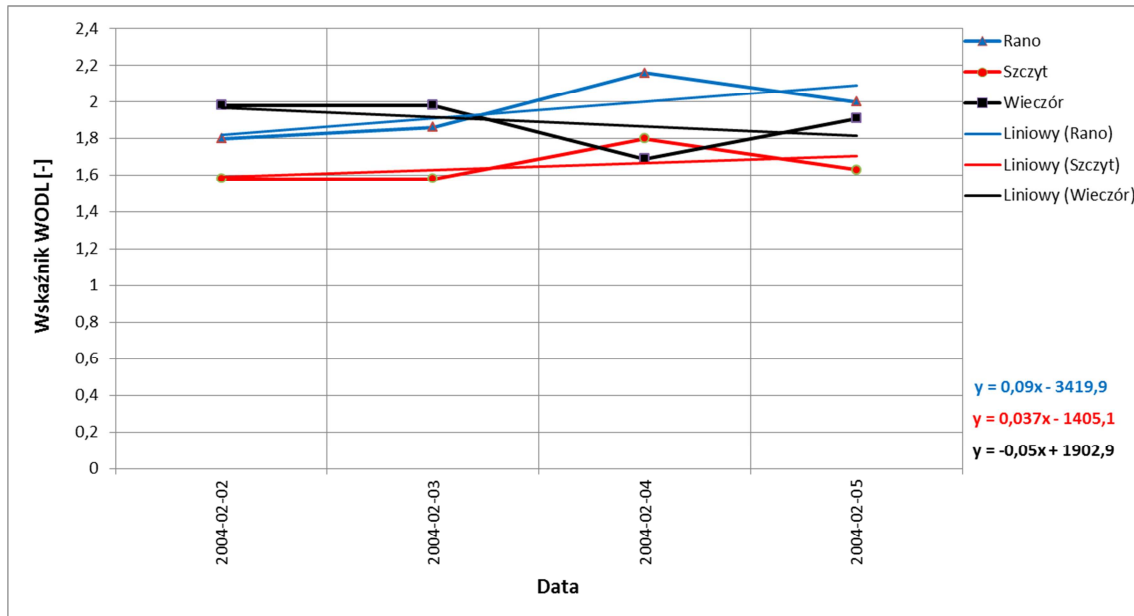
Poniżej przedstawiono dane dotyczące dobowych rozkładów poniedziałek-piątek w miesiącu lutym w przypadku składu nr 18.



Rys.4.2.10. Dobowy rozkład wartości wskaźnika WODL dla pociągu nr 18 z zaznaczeniem szczytu popołudniowego

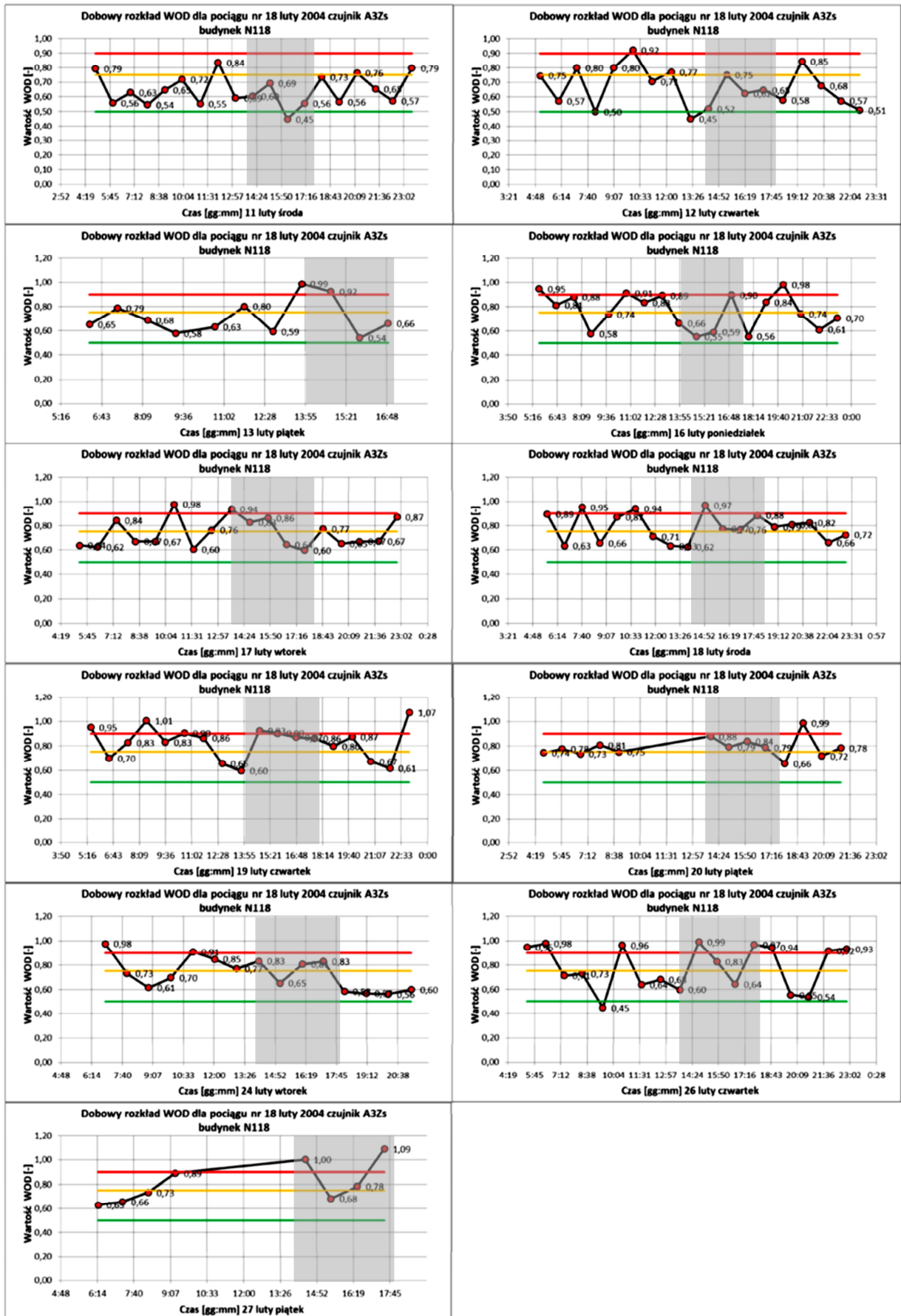
Tab. 4.2.4. Uśrednione wartości wskaźnika WODL w przypadku poszczególnych dni z rozróżnieniem na pory dnia (rano, godziny szczytu 14:00 – 17:00 i godziny wieczorne) – skład nr 18, luty – przed przetaczaniem

Pociąg nr 18					
Lp.	Data	Liczba przejazdów	Średni WODL		
			Rano	Szczyt	Wieczór
1	2004-02-02	15	1,80	1,58	1,98
2	2004-02-03	5	1,86	-	-
3	2004-02-04	10	2,16	1,80	1,69
4	2004-02-05	19	2,00	1,63	1,91
Wartość średnia			1,96	1,67	1,86
Odchylenie standardowe			0,1603	0,1153	0,1513
Wartość maksymalna			2,16	1,80	1,98
Wartość minimalna			1,80	1,58	1,69



Rys. 4.2.11. Graficzna prezentacja wyników z tabeli 4.2.3 wartości WODL w przypadku pociągu nr 18 z uwzględnieniem trendu liniowego dla każdej obserwowanej pory dnia

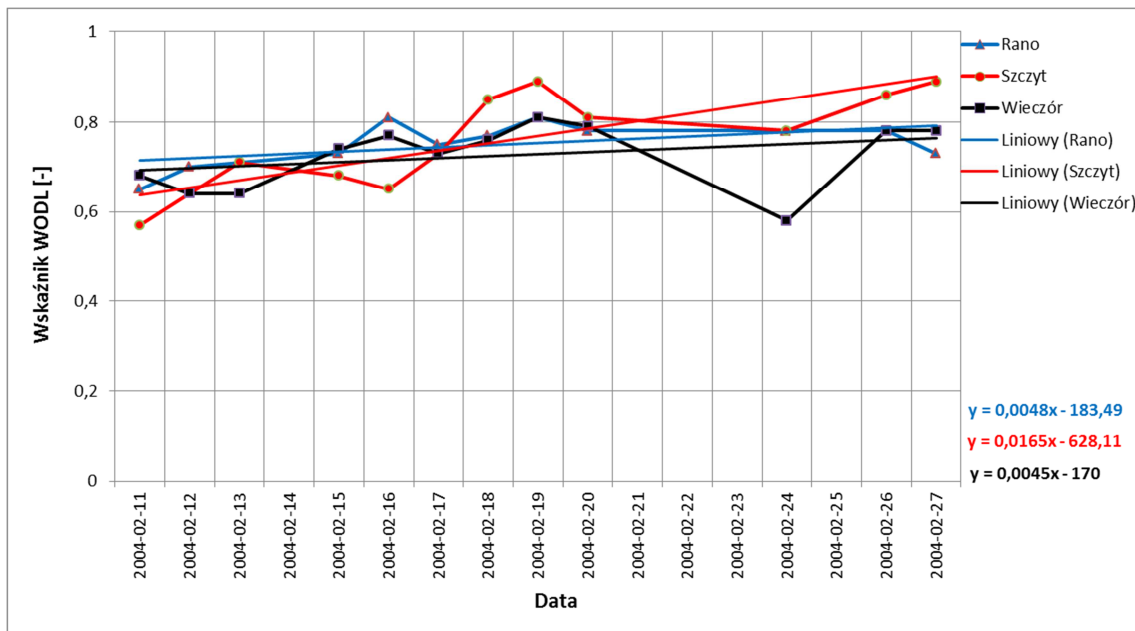
Pomiędzy 6 lutego, a 10 lutego nastąpiło przetaczanie kół pociągu. Skutkowało ono zaobserwowaniem wyraźnych zmian w wartości WODL, co zaprezentowano na kolejnych wykresach.



Rys.4.2.1.12. Dobowy rozkład wartości wskaźnika WODL w przypadku pociągu nr 18 z zaznaczeniem szczytu popołudniowego

Tab. 4.2.5. Uśrednione wartości wskaźnika WODL dla poszczególnych dni z rozróżnieniem na pory dnia (rano, godziny szczytu 14:00 – 18:00 i godziny wieczorne) – skład nr 18, luty

Pociąg nr 18					
Lp.	Data	Liczba przejazd	Średni WODL		
			Rano	Szczyt	Wieczór
5	2004-02-11	19	0,65	0,57	0,68
6	2004-02-12	18	0,70	0,64	0,64
7	2004-02-13	11	0,71	0,71	0,64
8	2004-02-15	18	0,73	0,68	0,74
9	2004-02-16	18	0,81	0,65	0,77
10	2004-02-17	18	0,75	0,73	0,73
11	2004-02-18	18	0,77	0,85	0,76
12	2004-02-19	18	0,81	0,89	0,81
13	2004-02-20	13	0,78	0,81	0,79
14	2004-02-24	15	0,78	0,78	0,58
15	2004-02-26	18	0,78	0,86	0,78
16	2004-02-27	8	0,73	0,89	0,78
Wartość średnia			0,75	0,76	0,73
Odchylenie standardowe			0,0479	0,1074	0,0729
Wartość maksymalna			0,81	0,89	0,81
Wartość minimalna			0,65	0,57	0,58



Rys. 4.2.13. Graficzna prezentacja wyników z tabeli 4.2.3 wartości WODL w przypadku pociągu nr 18 z uwzględnieniem trendu liniowego dla każdej obserwowanej pory dnia - stan po przetoczeniu kół

Przed przetaczaniem jak też po jego wykonaniu wartości średnie są największe (nieznacznie) dla godzin szczytu przy jedocześnie najwyższej wartości odchylenia standardowego.

Pewne różnice w wartości WODL w godzinach szczytu mogą być spowodowane nieznacznymi

zmianami w wypełnieniu pociągów pasażerami (stopień tego wypełnienia jest trudny do oszacowania).

Poniżej przedstawiono zbiorcze wyniki obliczeń rozrzutu dobowego wartości WODL dla pociągu nr 18 dla dwóch kolejnych miesięcy stycznia i lutego 2004 roku. W tym czasie nastąpiło przetaczanie pociągu, niestety brak jest danych dotyczących wartości bicia promieniowego kół z tego okresu. Rozrzut określony jest jako:

$$\frac{X_{\max} - X_{\text{śr}}}{X_{\text{śr}}} \cdot 100 \% \quad (4.2.1)$$

Gdzie:

X_{\max} – to maksymalna wartość RMS przyspieszenia drgań stropu w danym dniu

$X_{\text{śr}}$ – wartość średnia RMS przyspieszenia drgań stropu w danym dniu.

W poniższej tabeli zaprezentowano dobowy rozrzut wartości WODL dla składu nr 18. Czerwona kreska w tabeli oznacza moment przetaczania składu, które nastąpiło pomiędzy 5, a 11 lutego.

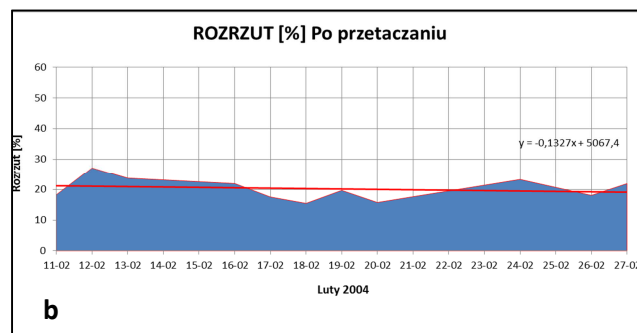
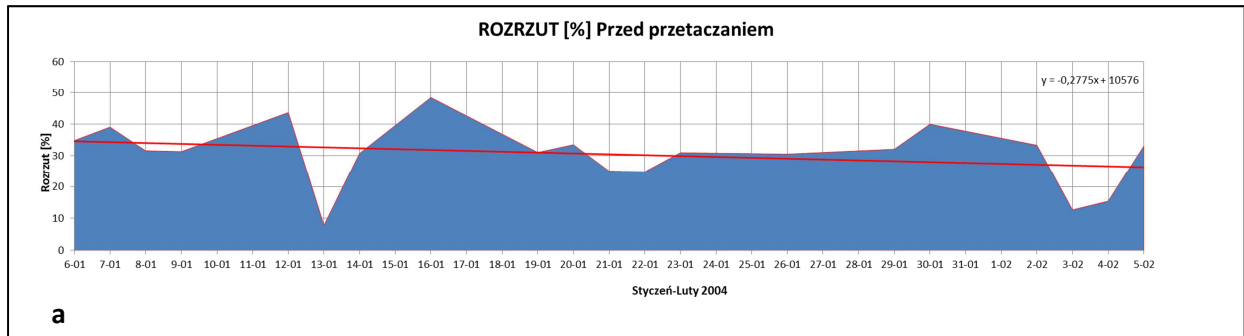
Tab. 4.2.6. Rozrzut wartości WODL dla składu nr 18 wartości przed i po toczeniu

Pociąg nr 18						
Lp.	Data	Liczba przejazdów	WODL MAX	f [Hz]	ŚREDNIA	ROZRZUT [%]
1	2004-01-06	12	0,028	40	0,021	35
2	2004-01-07	19	0,025	40	0,018	39
3	2004-01-08	19	0,025	40	0,019	32
4	2004-01-09	19	0,027	40	0,021	31
5	2004-01-12	34	0,030	40	0,021	44
6	2004-01-13	13	0,023	40	0,021	8
7	2004-01-14	18	0,030	40	0,023	31
8	2004-01-16	18	0,029	40	0,019	48
9	2004-01-19	19	0,025	40	0,019	31
10	2004-01-20	19	0,029	40	0,022	33
11	2004-01-21	18	0,027	40	0,022	25
12	2004-01-22	18	0,027	40	0,021	25

13	2004-01-23	19	0,027	40	0,021	31
14	2004-01-26	15	0,028	40	0,021	30
15	2004-01-29	19	0,030	40	0,023	32
16	2004-01-30	18	0,033	40	0,023	40
17	2004-02-02	15	0,033	40	0,024	33
18	2004-02-03	5	0,027	40	0,024	13
19	2004-02-04	10	0,027	40	0,023	15
20	2004-02-05	19	0,032	40	0,024	33
21	2004-02-11	19	0,011	50	0,009	18
22	2004-02-12	18	0,012	40	0,009	27
23	2004-02-13	11	0,012	40	0,010	24
24	2004-02-16	18	0,012	40	0,010	22
25	2004-02-17	18	0,012	40	0,010	18
26	2004-02-18	18	0,013	50	0,011	15
27	2004-02-19	18	0,013	40	0,011	20
28	2004-02-20	13	0,013	50	0,011	16
29	2004-02-24	15	0,012	40	0,010	23
30	2004-02-26	18	0,012	40	0,010	18
31	2004-02-27	8	0,014	40	0,011	22

Wartości zestawione w tabeli 4.2.6 wskazują jednoznacznie, iż, dominująca częstotliwość środkowa pasma to 40 Hz i w przypadku okresu przed przetaczaniem jest ona jedyną występującą. Nieznacznie ulega to zmianie w przypadku okresu po przetaczaniu – trzykrotnie uwidoczniła się częstotliwość środkowa pasma 50 Hz (tercja nr 17). Co istotne, maksymalny rozrzut wartości RMS max względem średniej obniżył się z prawie 50% (rozrzut dobowy 48,40% maksymalnie), do prawie 30% (27,16% maksymalnie). Poniżej te same dane (z tabeli 4.2.6) podano w sposób graficzny na rys.4.2.4.

Rozważając z kolei osobno okres do przetoczenia i okres po przetaczaniu – wykresy przedstawiają się następująco:



Rys.4.2.14. Rozrzut w procentach wartości RMS dla dwóch okresów osobno: wykres a (górny) – przed przetaczaniem. Wykres b (dolny) sytuacja po przetaczaniu

Nachylenie wyznaczonej linii trendu dla wszystkich trzech zaprezentowanych sytuacji, zmienia się na poszczególnych wykresach – takie wnioski należy wysunąć analizując kolejne wykresy.

Tab. 4.2.7. Funkcja trendu długookresowego dla składu nr 18 przed i po toczeniu

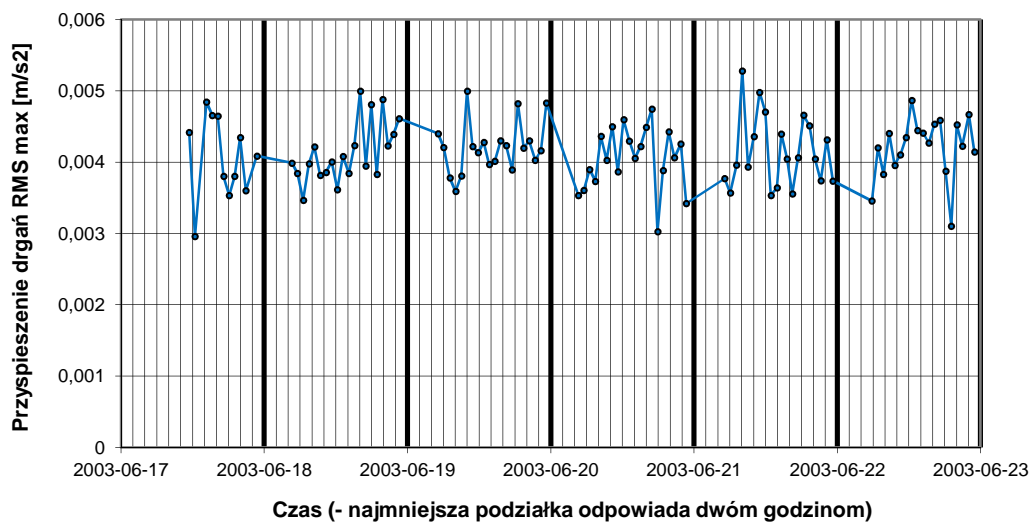
Lp.	Czas	Równanie	Przyrost WOD/dzień [%]
1	całość styczeń-luty	$y = -0,3284x + 12512$	3,3
2	przed przetaczaniem	$y = -0,2775x + 10576$	2,8
3	po przetaczaniu	$y = -0,1327x + 5067,4$	1,3

Przyrost trendu dla rozrzutu danych jest ujemny i przyjmuje wartość w zakresie od 1,3% dla sytuacji po przetaczaniu pociągu (jest najbardziej stabilny) do 2,8% dla okresu przed przetaczaniem. Na skutek dużej różnicy współczynnika B z równania prostej (dla funkcji trendu) można zaobserwować dla całego badanego okresu czasu ujemny przyrost (spadek).

4.2.1.1. Zmiana poziomu wymuszanych drgań na przykładzie dwóch różnych składów pociągów tego samego typu - METROPOLIS

Maksymalne wartości RMS, otrzymane dla poszczególnych przebiegów czasowych (RMSmax), odpowiadały najczęściej pasmu tercjowemu o częstotliwości środkowej $f_1 = 40$ Hz (rzadziej 50 Hz). Na rys. 4.2.15 i 4.2.16 przedstawiono dobowe rozkłady tych wartości RMSmax (dla kilku wybranych dni) w jednym z badanych budynków podczas przejazdów pociągów nr 17 i 21. Są to pociągi tego samego typu, różniące się jedynie stanem kół. Stąd pociąg nr 17 wywołuje drgania o mniejszej intensywności niż skład nr 21.

Traktując wartości RMSmax jako zmienną losową X , w tabeli 4.2.8 podano charakterystyki rozkładu dobowego tych wartości dla tych samych dni, które uwzględniono na rys. 4.2.15 i 4.2.16.



Rys.4.2.15. Wybrane dobowe rozkłady wartości RMSmax w budynku N118 podczas przejazdów pociągu 17



Rys. 4.2.16. Wybrane dobowe rozkłady wartości RMSmax w budynku N118 podczas przejazdów pociągu nr 21

Tab. 4.2.8. Charakterystyki rozkładu dobowego wartości RMSmax w budynku N118 podczas przejazdów pociągów 17 i 21

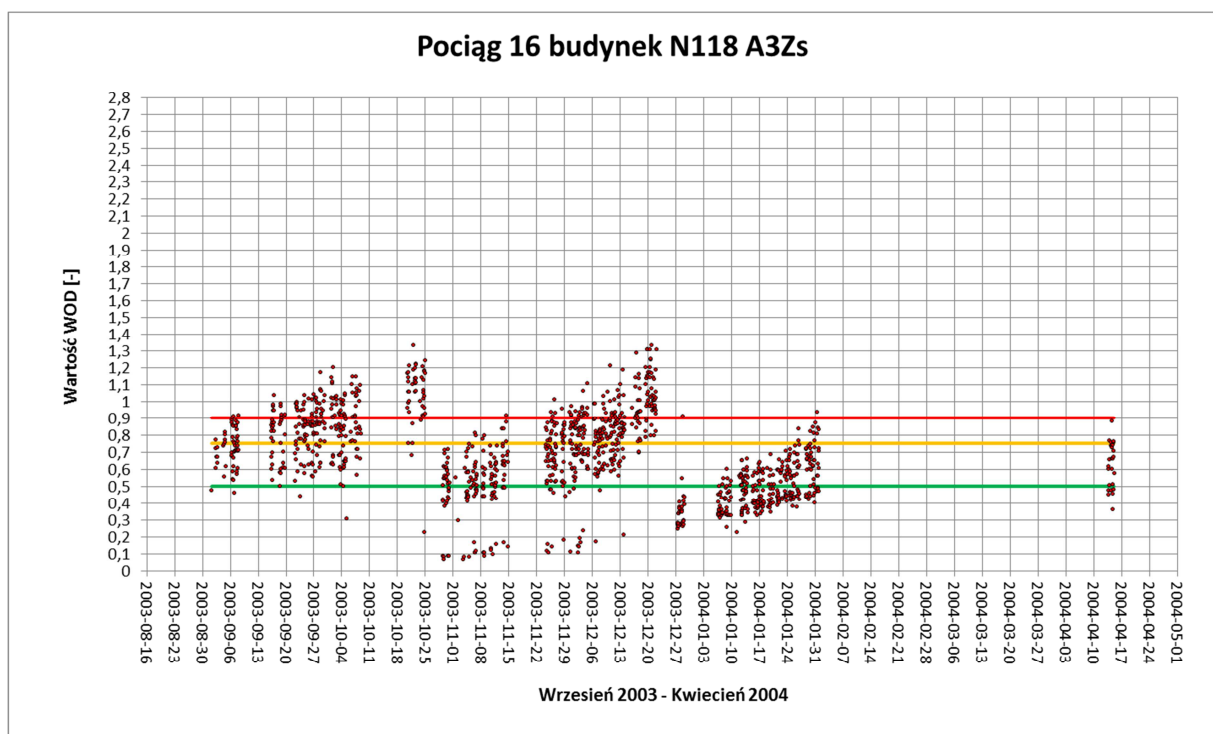
Pociąg	Data	Liczba przejazdów	Wartość maksymalna X_{\max} [cm/s ²]	Częstotliwość	Wartość średnia	Rozrzut [%]
				średkowa		
				$f_i(X_{\max})$	X_{sr}	
				[Hz]	[cm/s ²]	
17	17.06	11	0,48	40	0,41	19,20%
	18.06	20	0,50	40	0,41	21,00%
	19.06	20	0,50	40	0,42	18,70%
	20.06	20	0,47	40	0,41	17,10%
	21.06	20	0,53	40	0,41	27,50%
	22.06	19	0,49	40	0,42	15,70%
21	25.06	14	1,10	40	0,96	14,60%
	26.06	20	1,18	40	0,92	28,30%
	27.06	20	1,03	40	0,90	14,70%
	28.06	19	1,21	40	0,97	24,20%

Niezależnie od faktu, że pociągi jeżdżą obok budynku N118 praktycznie ze stałą prędkością, wynoszącą $60 \text{ km/h} \pm 3\%$, to w ciągu doby poszczególne przejazdy tego samego pociągu różnią się między sobą pod względem intensywności wzbudzanych drgań. Jedną z przyczyn tego zróżnicowania jest zmieniający się w ciągu doby stopień obciążenia (napętnienia pasażerami) pociągów.

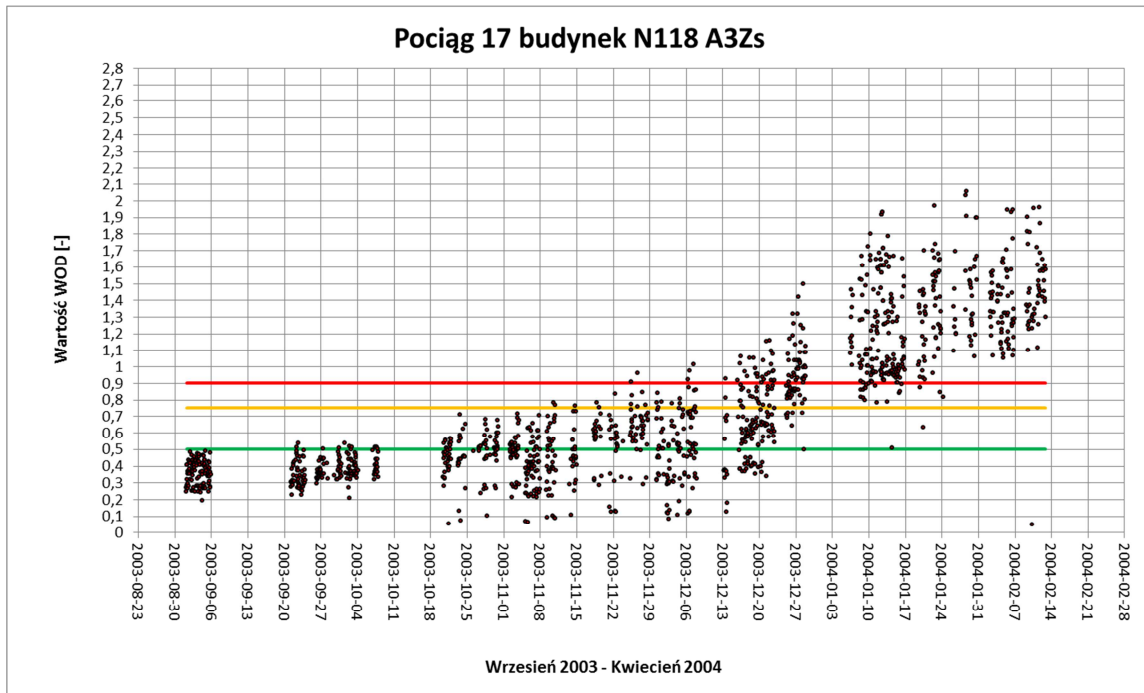
Różnice pomiędzy maksymalną a średnią wartością RMSmax wynosiły w ciągu doby od ok. 15 do 28%. Ten sam przedział odchylenia wartości maksymalnej od wartości średniej wystąpił dla obu pociągów, a więc niezależnie od tego czy dany pociąg wzbudzał mniej czy też bardziej intensywne drgania. Podane wartości odchylenia mogą być traktowane jako oszacowanie maksymalnej różnicy pomiędzy RMSmax uzyskanym z pomiarów doraźnych, a maksymalną wartością RMSmax, jaka potencjalnie może wystąpić w cyklu dobowym.

4.2.2. Długookresowy (wielotygodniowy) rozkład drgań

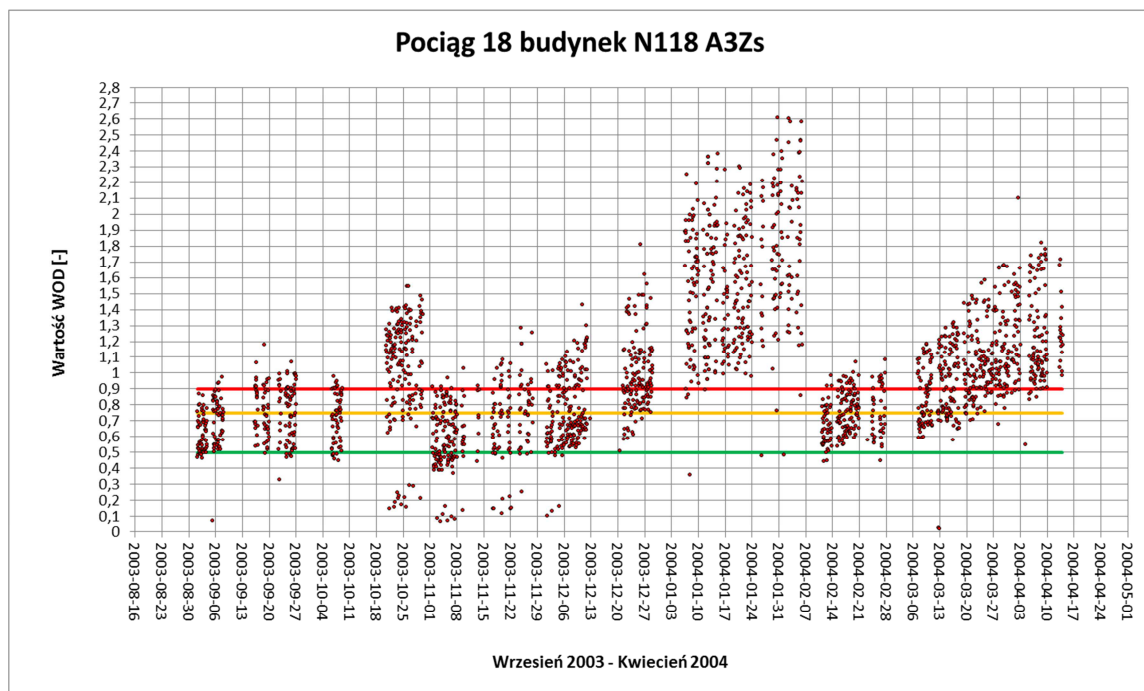
Na wstępie niniejszego rozdziału zaprezentowano przykładowe wyniki z systemu ciągłego monitoringu drgań Metra Warszawskiego dla wybranych pociągów typu Metropolis (pominięto dane odnoszące się do pociągów produkcji rosyjskiej). Prezentowane wyniki były rejestrowane w okresie 8 miesięcy (od września 2003 do kwietnia 2004) oraz bardziej aktualne z okresu od 2008 (bez uwzględnienia 2009 – brak danych w systemie ciągłego monitorowania drgań) do maja 2011 dla wszystkich składów. Tego typu wykresy pozwalają na analizę trendów w dłuższym okresie czasu.



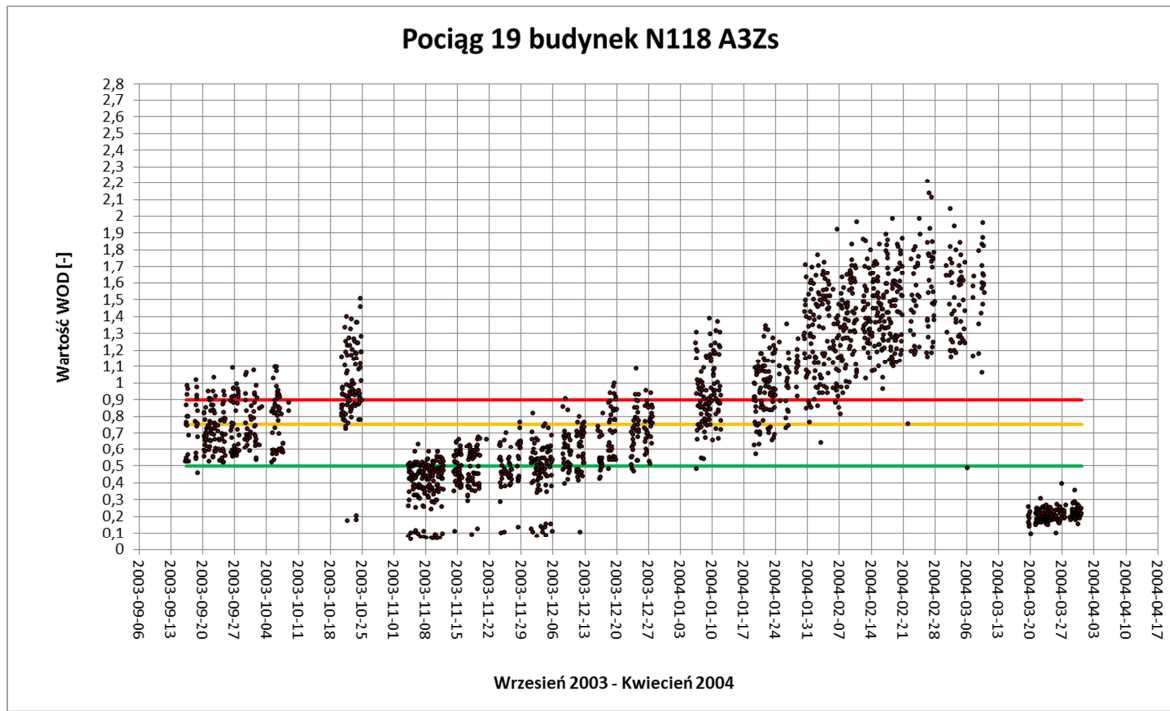
Rys. 4.2.17. Długookresowy rozkład wartości WODL dla składu pociągu nr 16



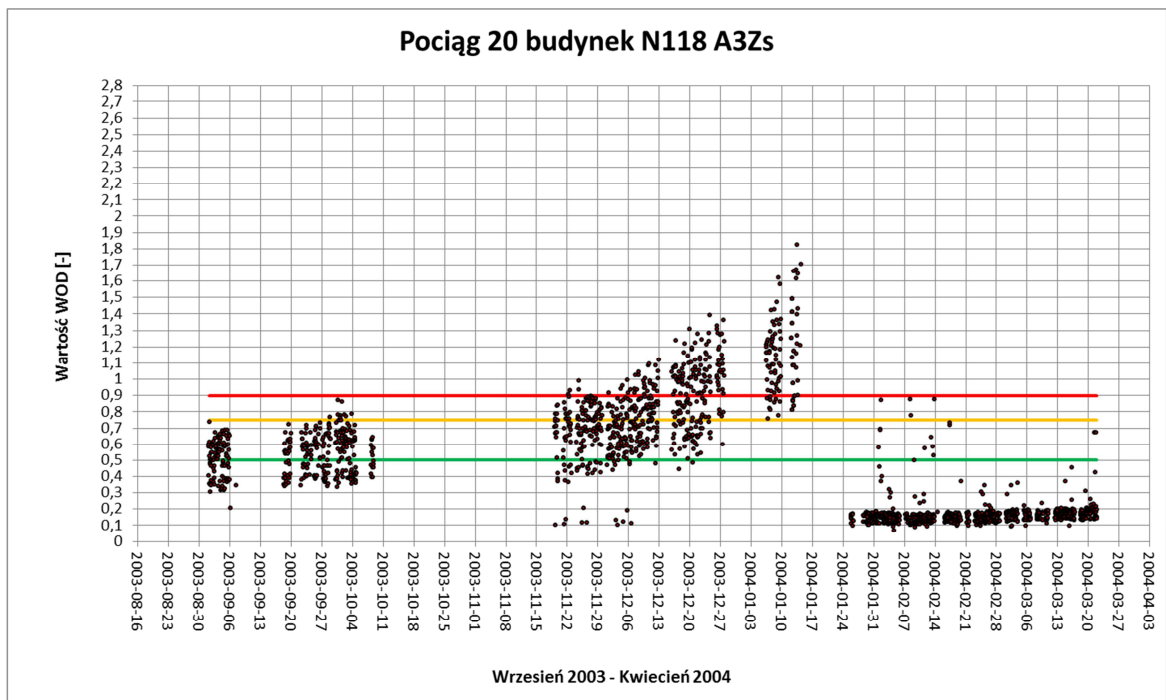
Rys. 4.2.18. Długookresowy rozkład wartości WODL dla składu pociągu nr 17



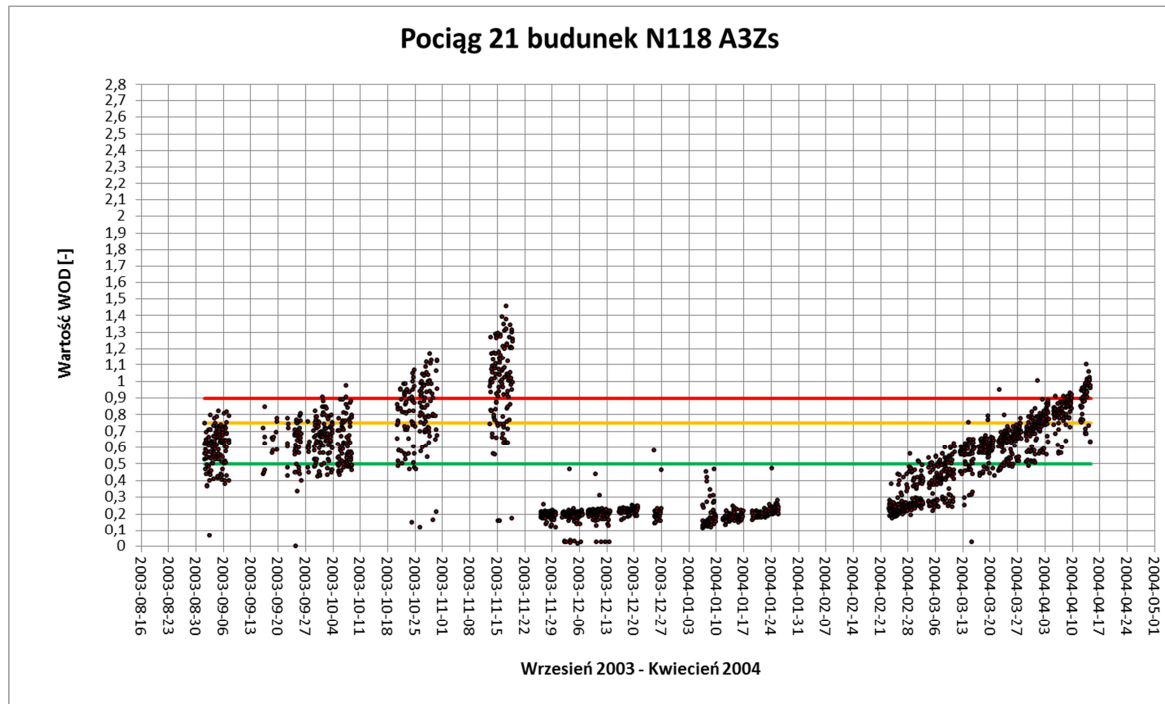
Rys. 4.2.19. Długookresowy rozkład wartości WODL dla składu pociągu nr 18



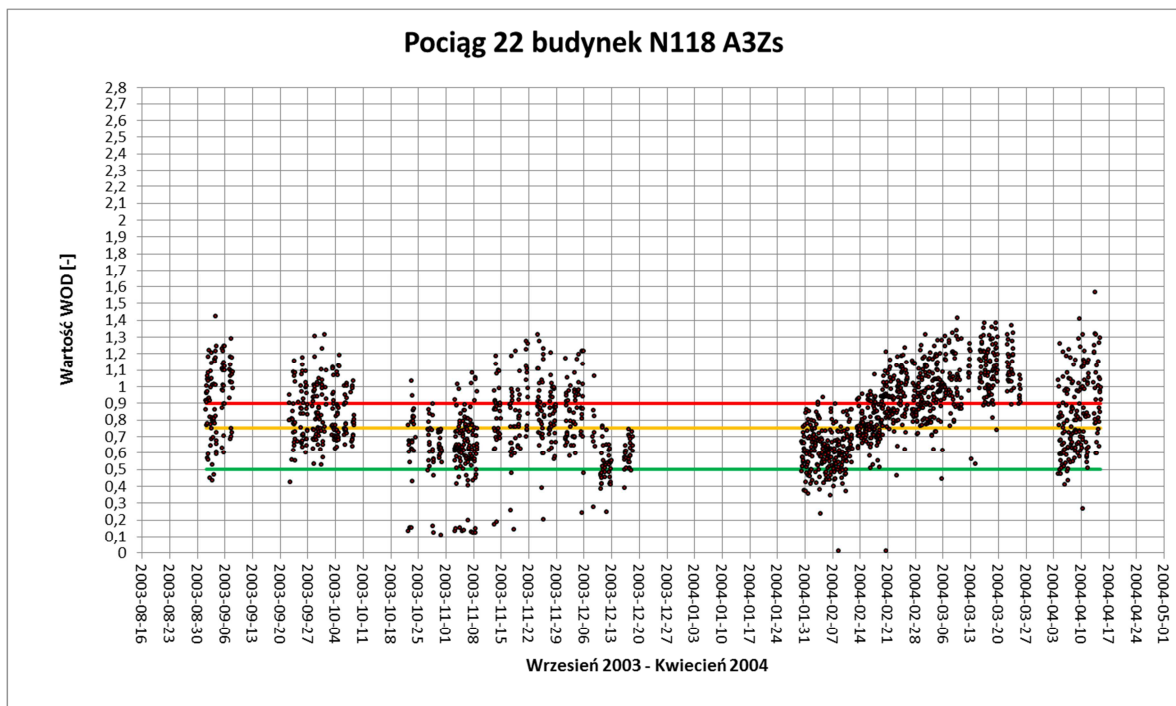
Rys. 4.2.20. Długookresowy rozkład wartości WODL dla składu pociągu nr 19



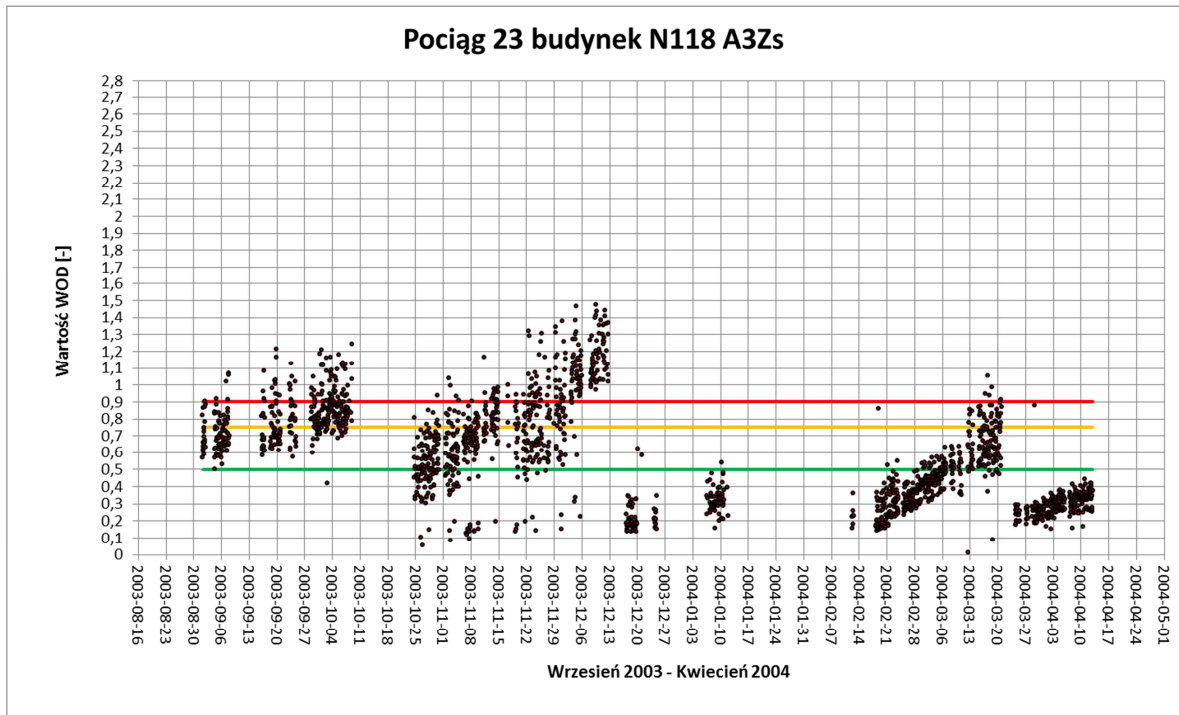
Rys. 4.2.21. Długookresowy rozkład wartości WODL dla składu pociągu nr 20



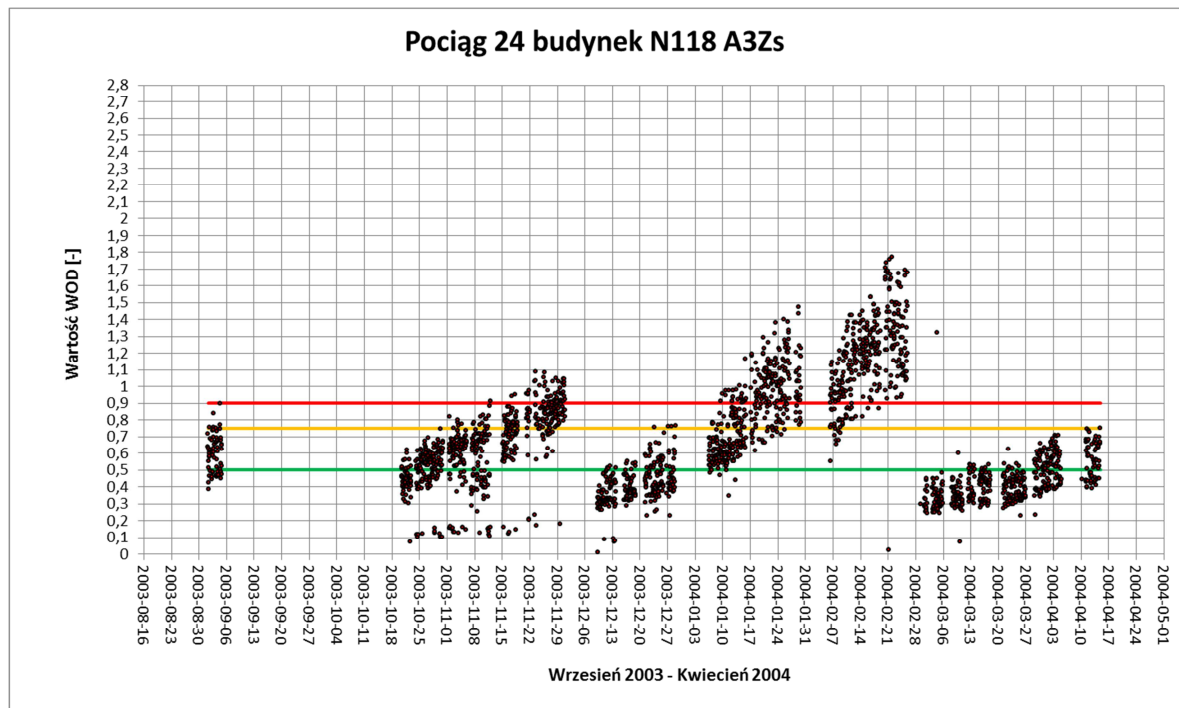
Rys. 4.2.22. Długookresowy rozkład wartości WODL dla składu pociągu nr 21



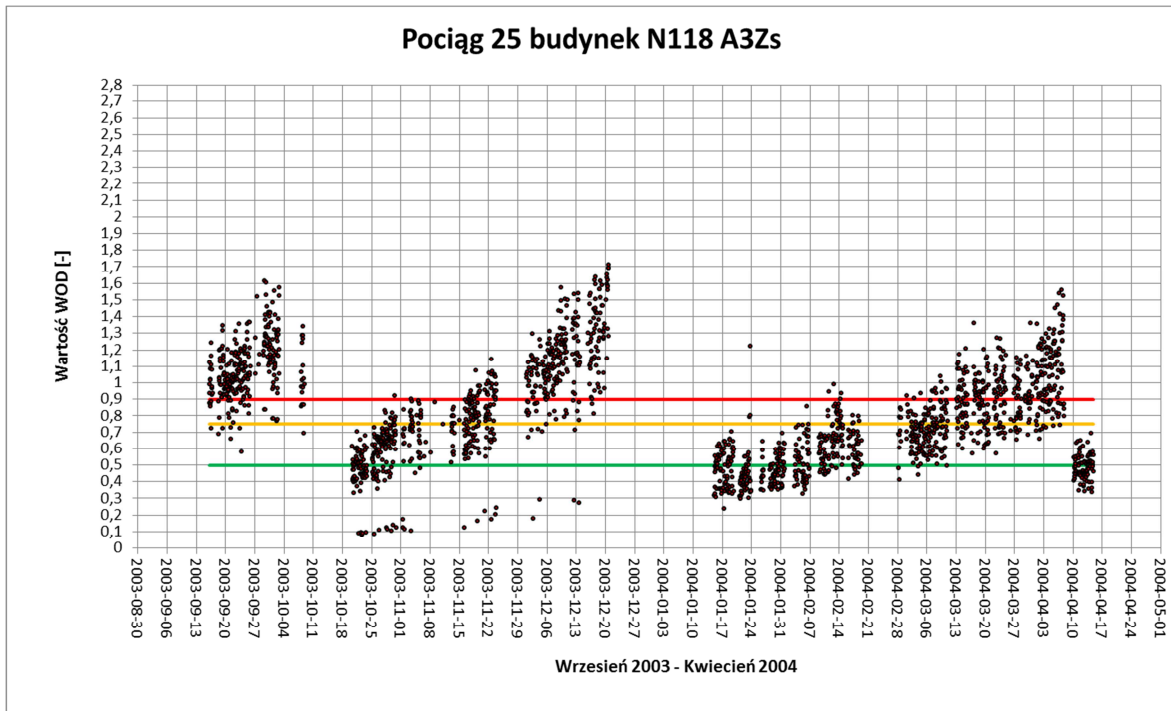
Rys. 4.2.23. Długookresowy rozkład wartości WODL dla składu pociągu nr 22



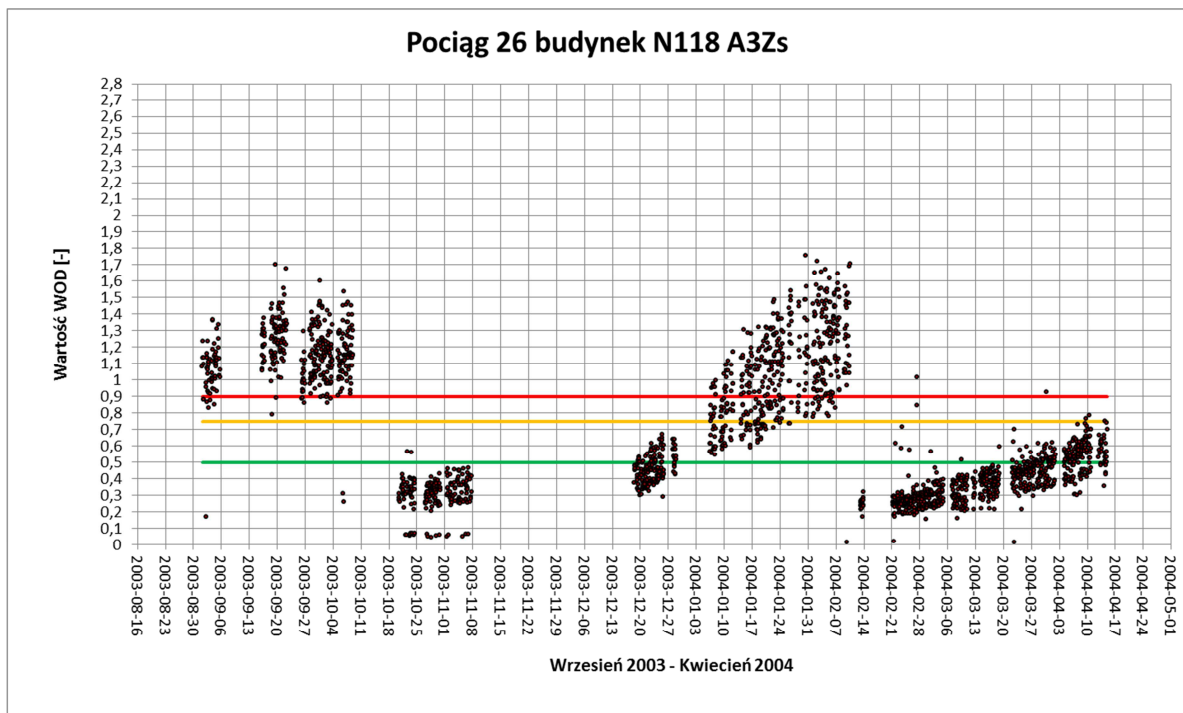
Rys. 4.2.24. Długookresowy rozkład wartości WODL dla składu pociągu nr 23



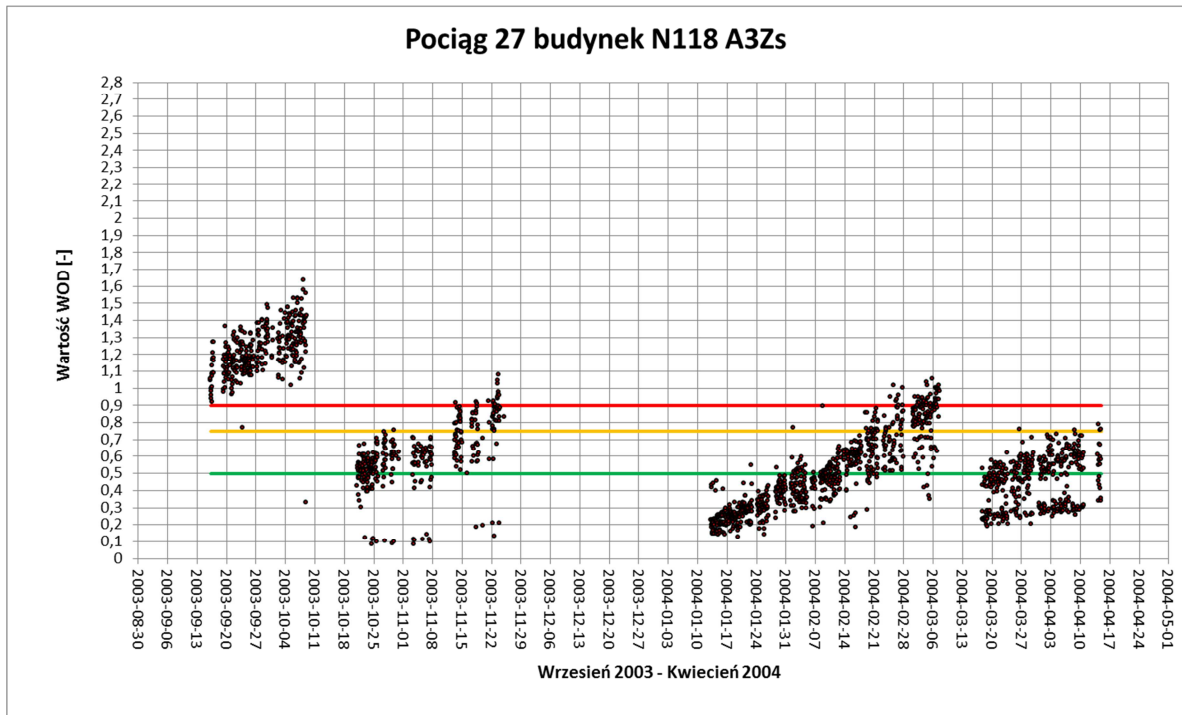
Rys. 4.2.25. Długookresowy rozkład wartości WODL dla składu pociągu nr 24



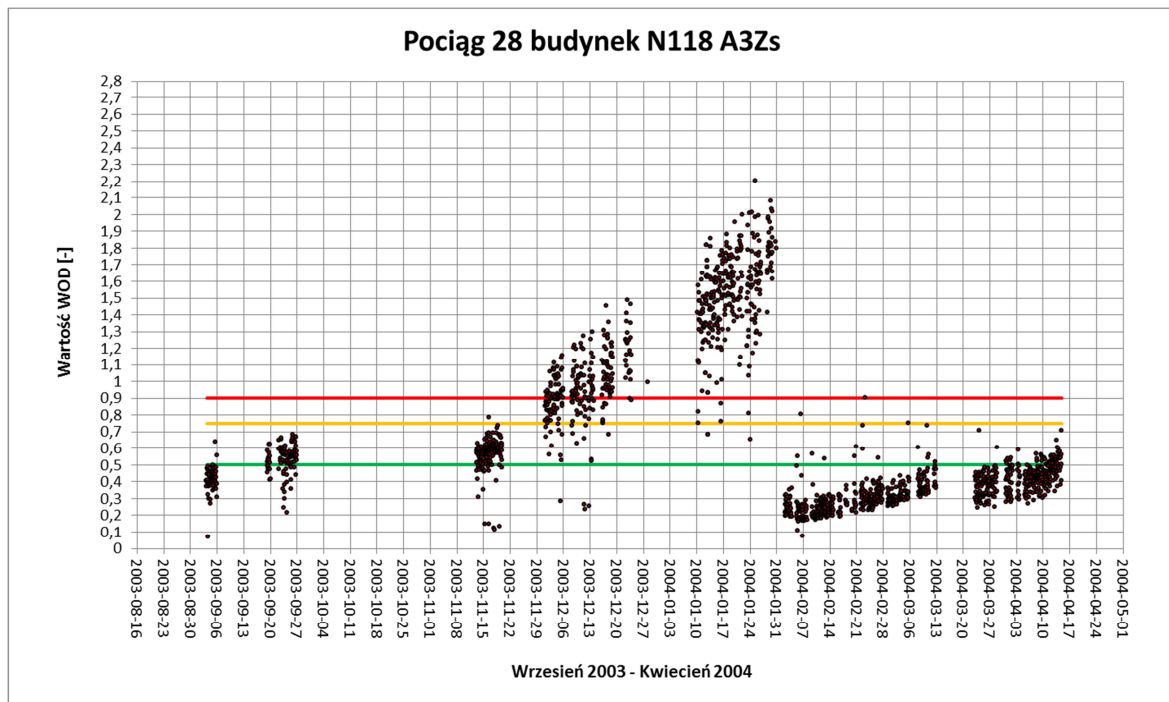
Rys. 4.2.26. Długookresowy rozkład wartości WODL dla składu nr 25



Rys. 4.2.27. Długookresowy rozkład wartości WODL dla składu pociągu nr 26



Rys. 4.2.28. Długookresowy rozkład wartości WODL dla składu pociągu nr 27

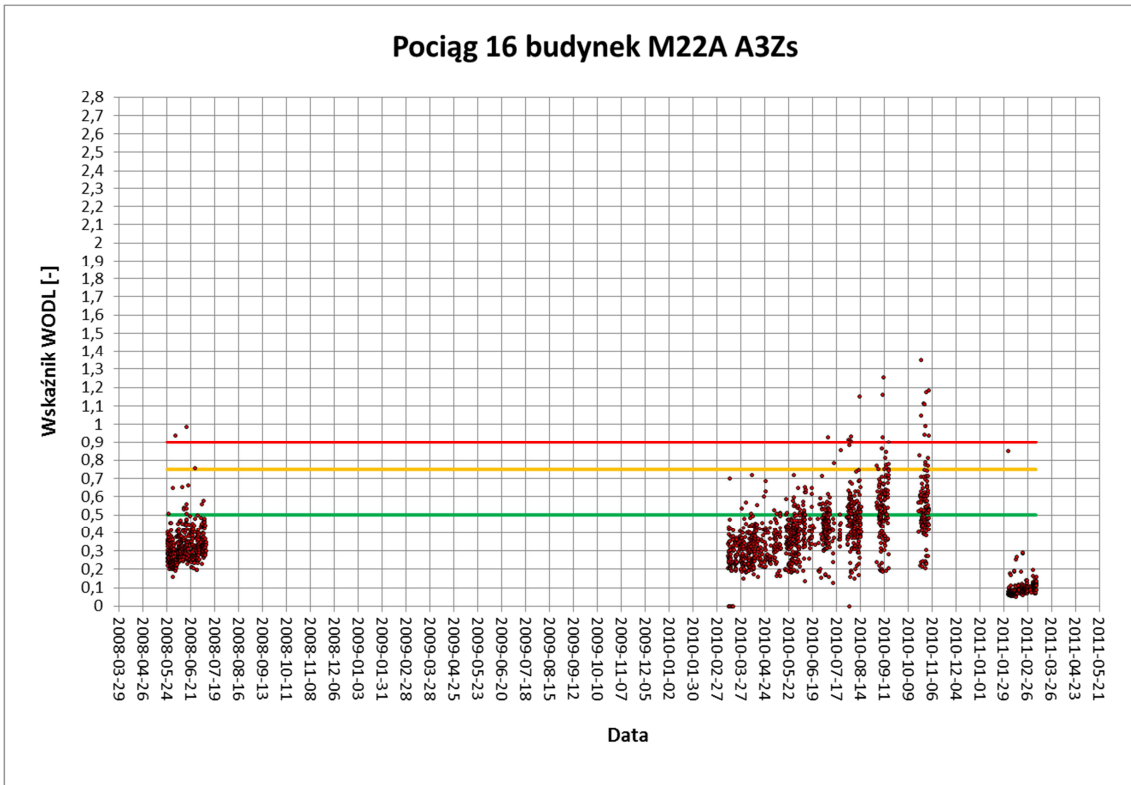


Rys. 4.2.29. Długookresowy rozkład wartości WODL dla składu pociągu nr 28

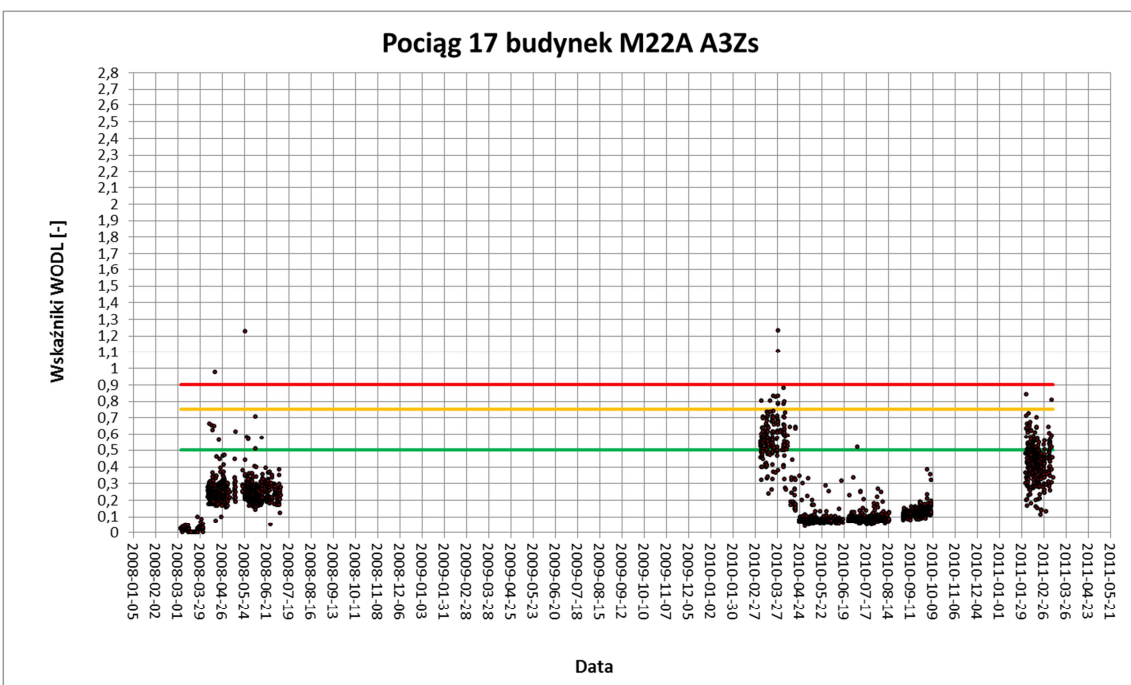
Analizując powyższe wykresy trendów można zaobserwować pewne prawidłowości. Mianowicie, im dłużej pociąg pozostaje w eksploatacji (można domniemywać, że w tym czasie wartość bicia promieniowego wzrasta – [por. Rozdział 3 str. 43]), tym większe są różnice w wartości wskaźnika WODL dla poszczególnych dni. Jeśli zaś pociąg był poddany reprofiliacji kół, wartości dobowe współczynnika WODL są bardziej skupione na wykresie (tzw. zwężona część „lejka”). Jest to pewna prawidłowość, występująca niezależnie od numeru składu pociągu. Może ona być spowodowana stopniem wypełnienia pasażerami w ciągu doby (podatność na zmiany wzrasta wraz ze wzrostem wartości bicia promieniowego). Można domniemywać, że w momencie kiedy wartości WODL miały spory rozrzut i wartości były wysokie- jeśli następował gwałtowny spadek wartości – to oznaczał on przetaczanie pociągu (bark danych dotyczących toczenia z tego okresu).

Charakterystyczne jest również to, że jeśli pociąg wykazywał wysokie wartości WODL, to ich rozrzut w krótkim okresie czasu (dobowym) – również wzrastał. Jak wynika z zamieszczonych rysunków, wartość WODL mogła się zmieniać nawet o ponad 1.

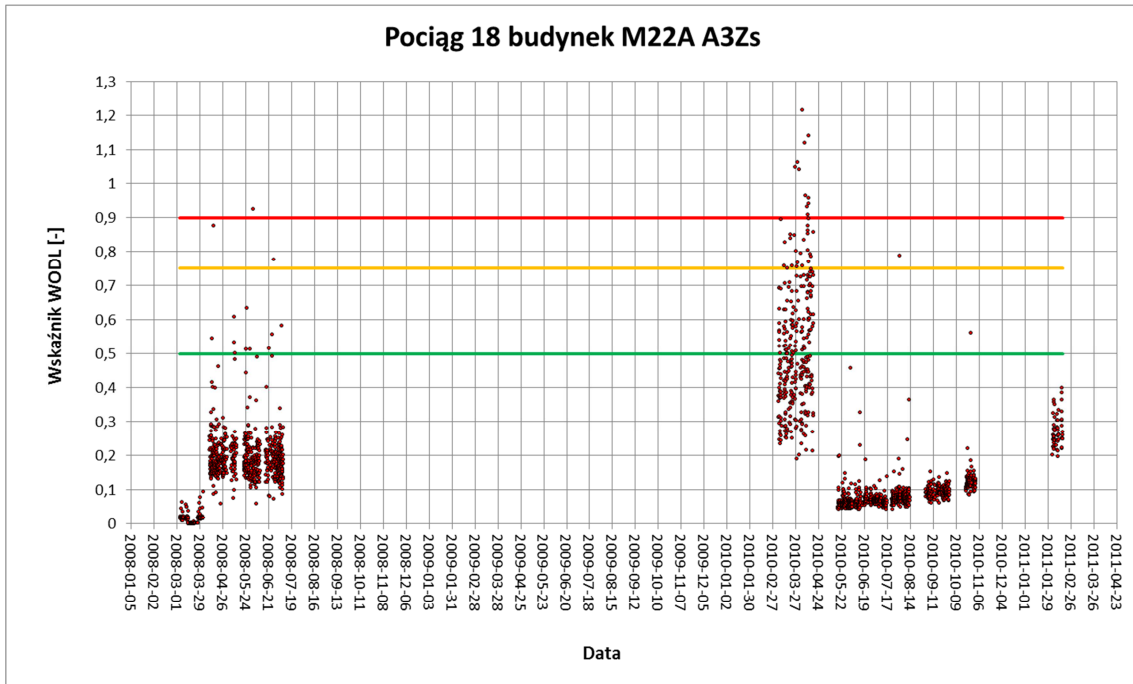
Poniżej, na rys. od 4.2.30 do 4.2.42, przedstawiono wyniki z innego przekroju pomiarowego M22A dla wcześniej zaprezentowanych składów pociągów metra w okresie od marca 2008 do kwietnia 2011.



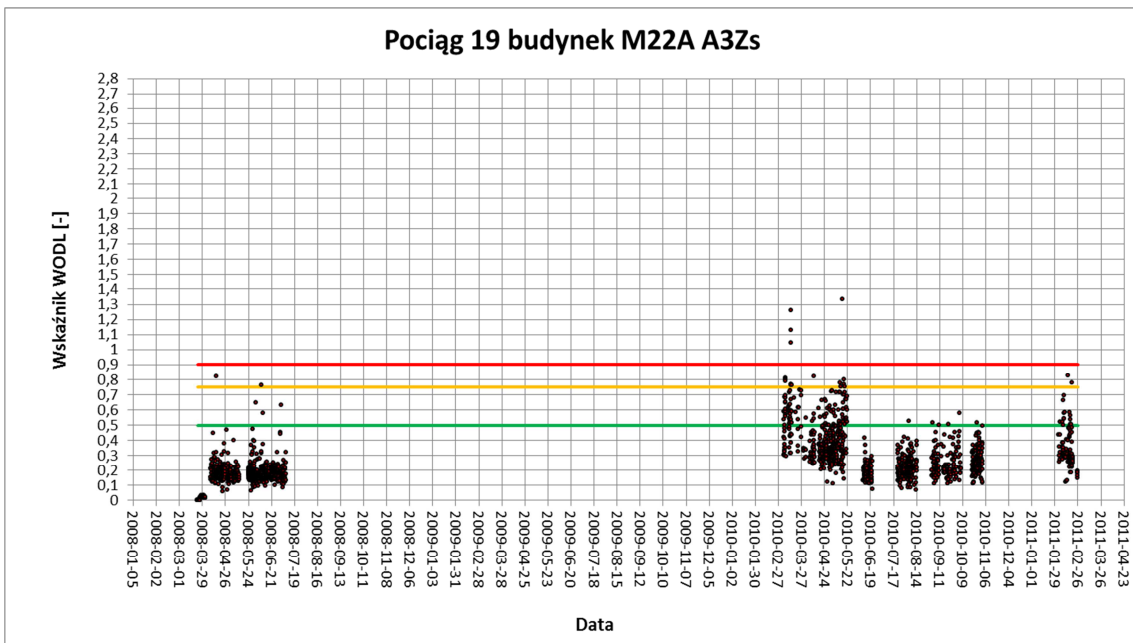
Rys. 4.2.30. Długookresowy rozkład wartości WODL dla składu pociągu nr 16



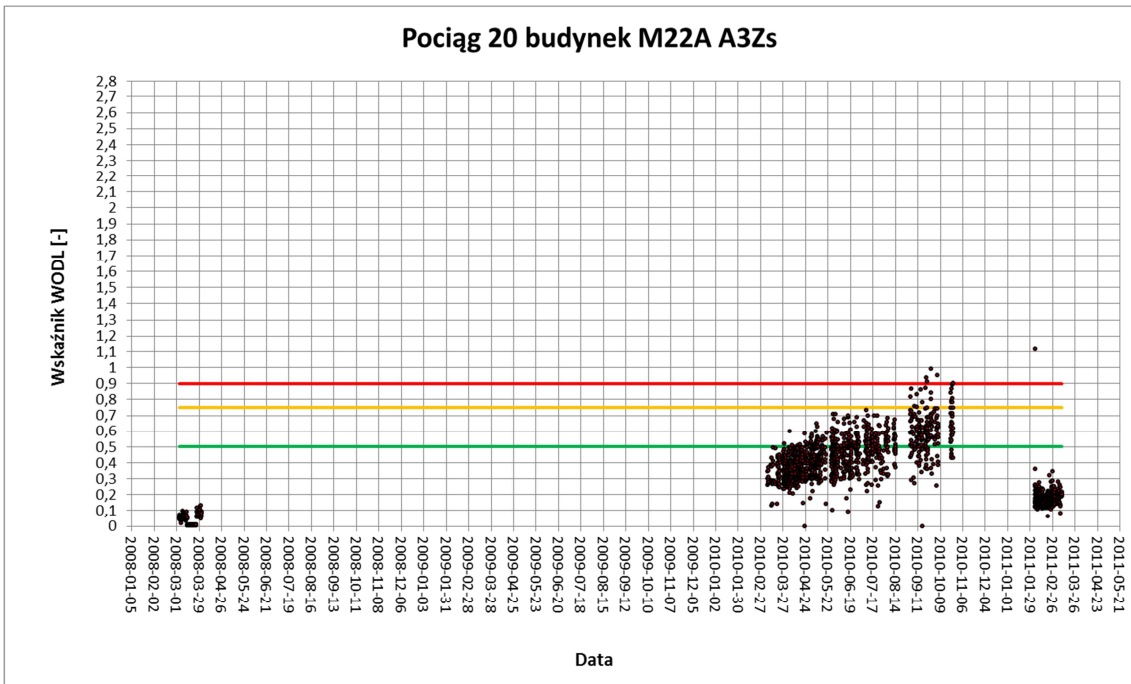
Rys. 4.2.31. Długookresowy rozkład wartości WODL dla składu pociągu nr 17



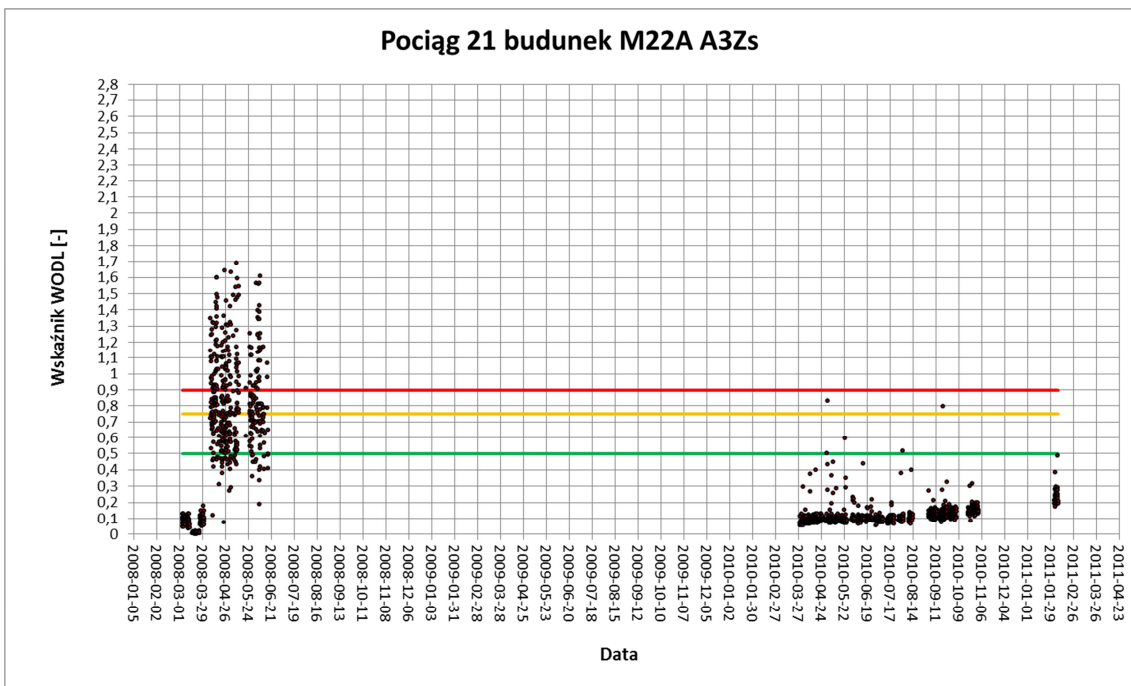
Rys. 4.2.32. Długookresowy rozkład wartości WODL dla składu pociągu nr 18



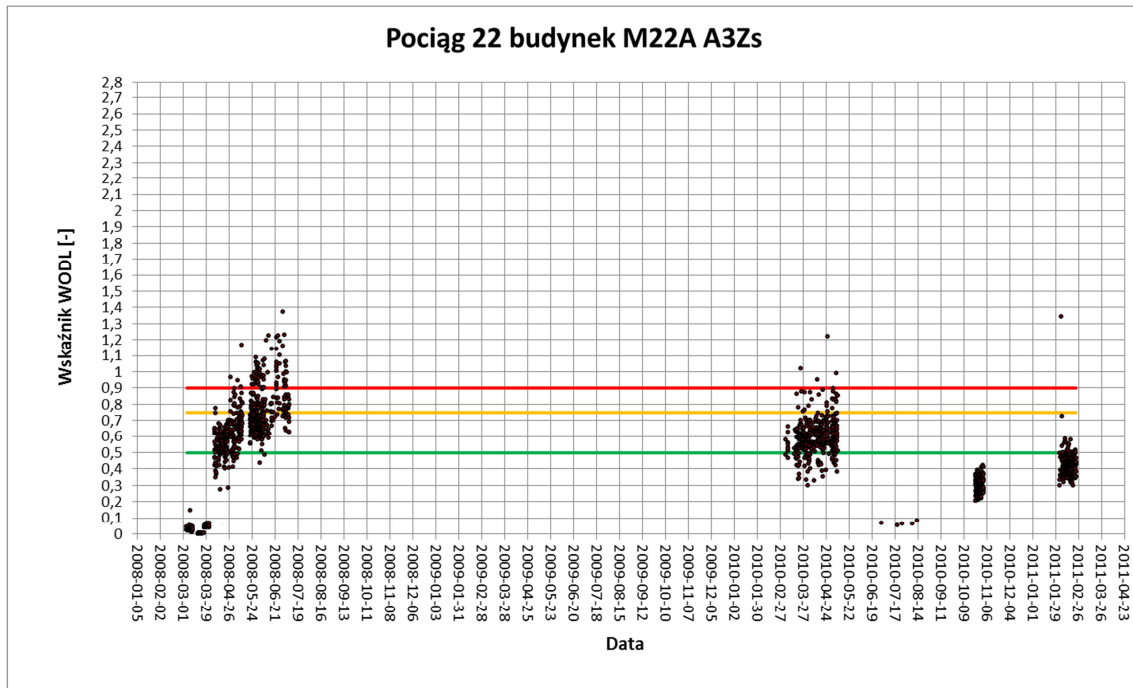
Rys. 4.2.33. Długookresowy rozkład wartości WODL dla składu pociągu nr 19



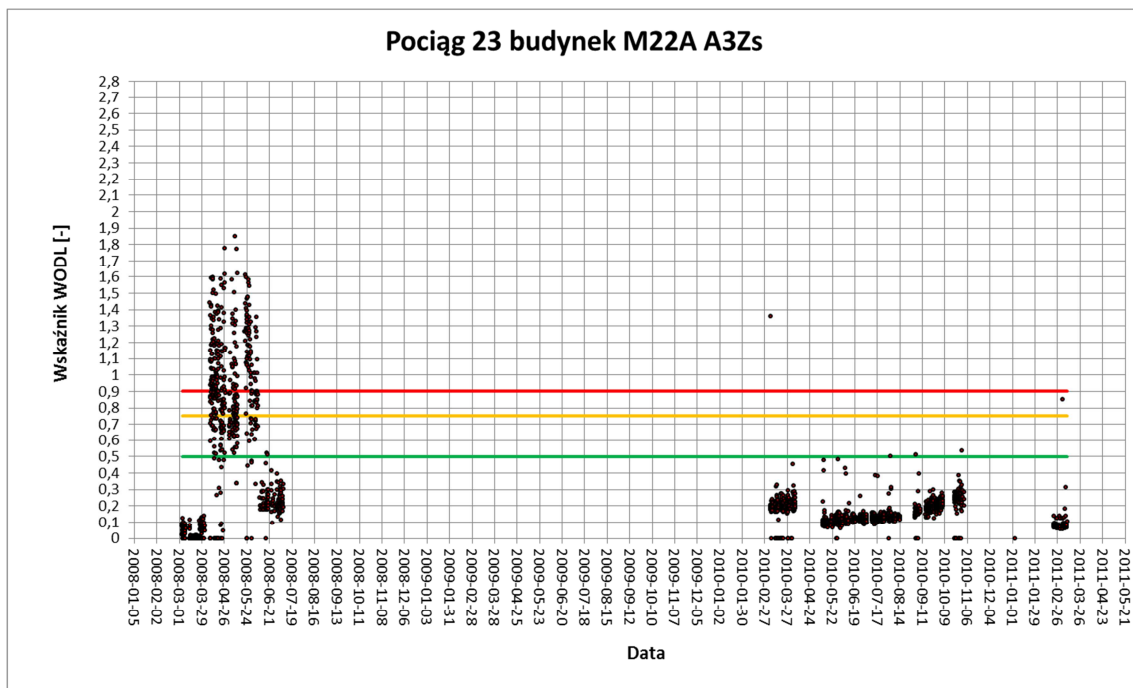
Rys. 4.2.34. Długookresowy rozkład wartości WODL dla składu pociągu nr 20



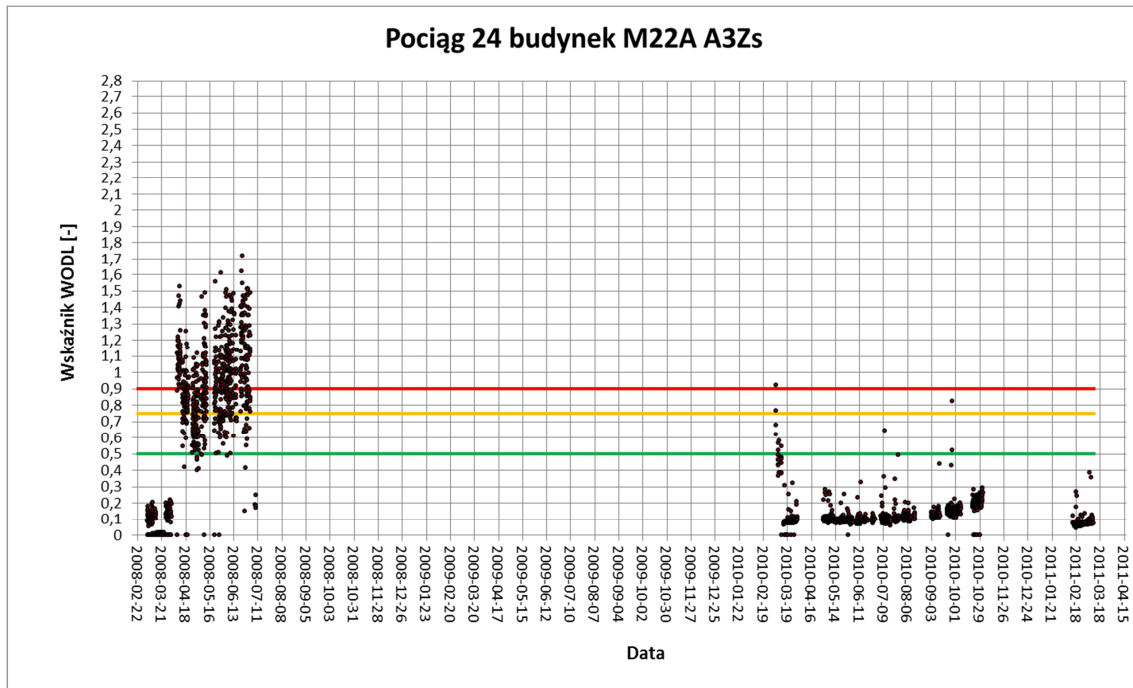
Rys. 4.2.35. Długookresowy rozkład wartości WODL dla składu pociągu nr 21



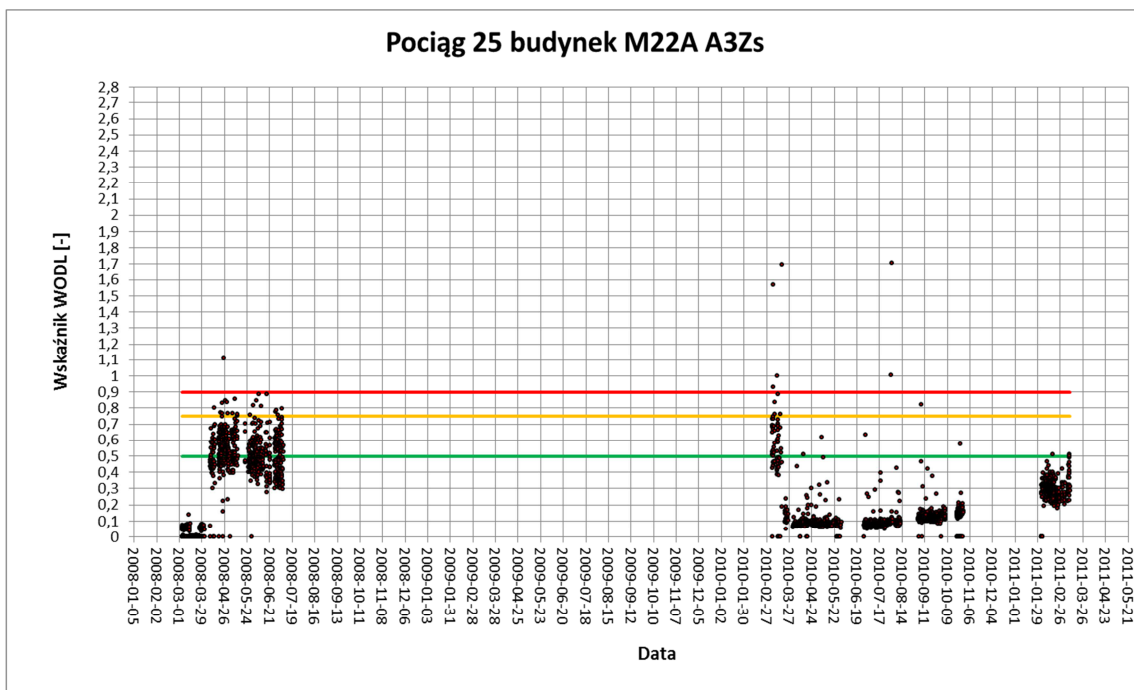
Rys. 4.2.36. Długookresowy rozkład wartości WODL dla składu pociągu nr 22



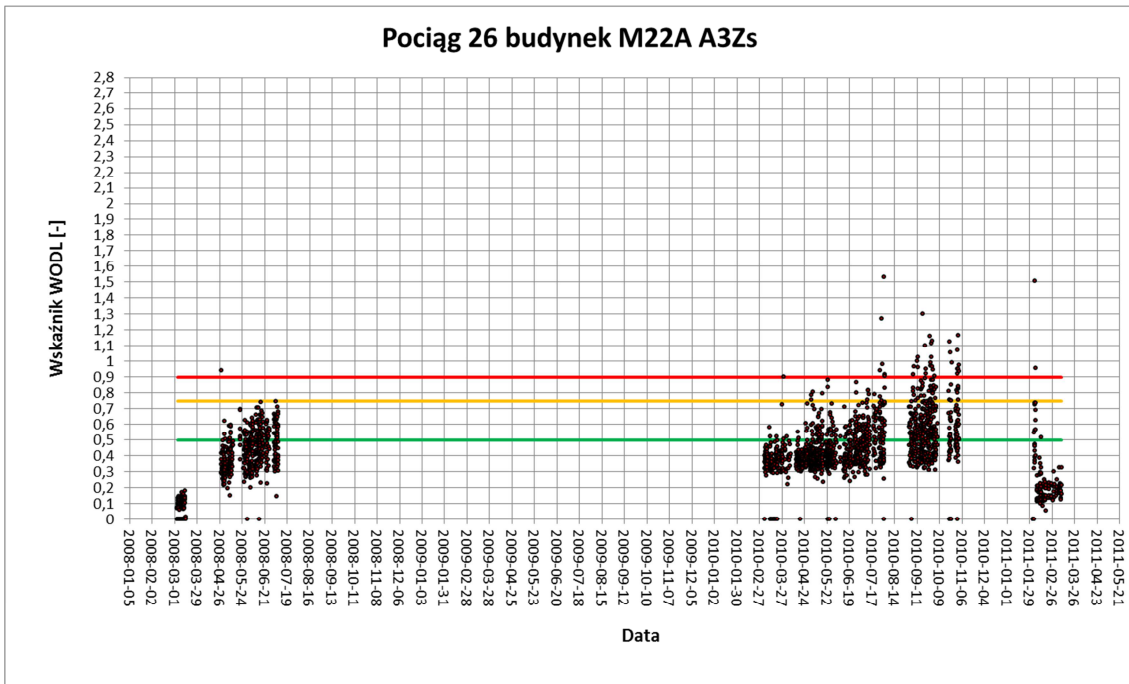
Rys. 4.2.37. Długookresowy rozkład wartości WODL dla składu pociągu nr 23



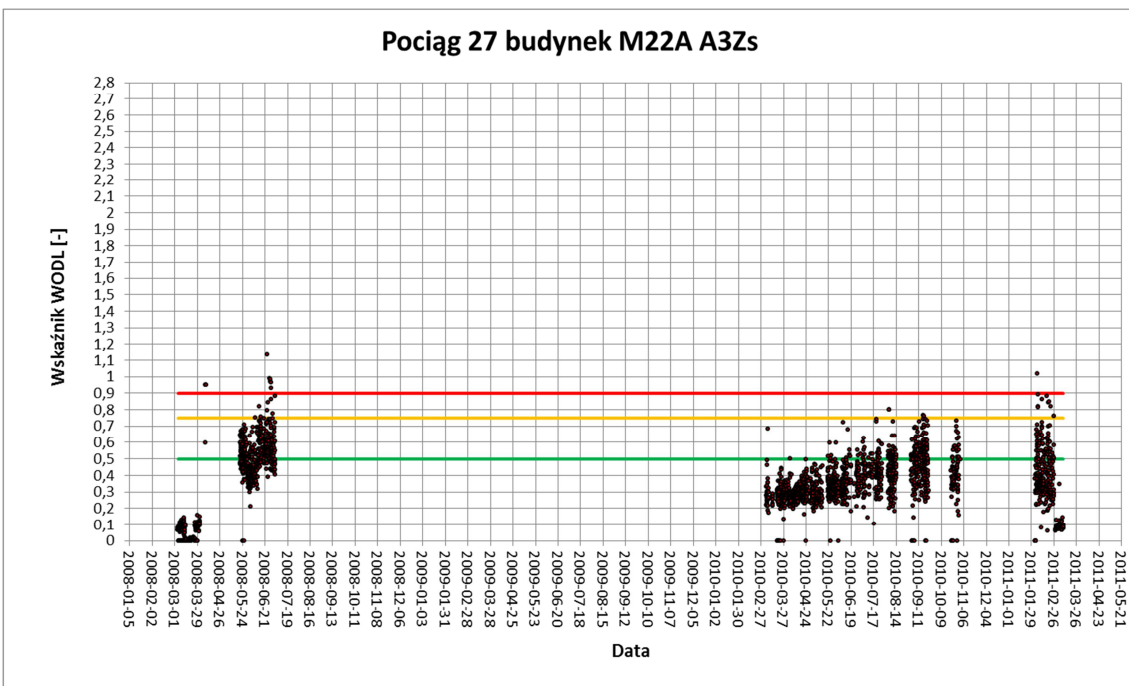
Rys. 4.2.38. Długookresowy rozkład wartości WODL dla składu pociągu nr 24



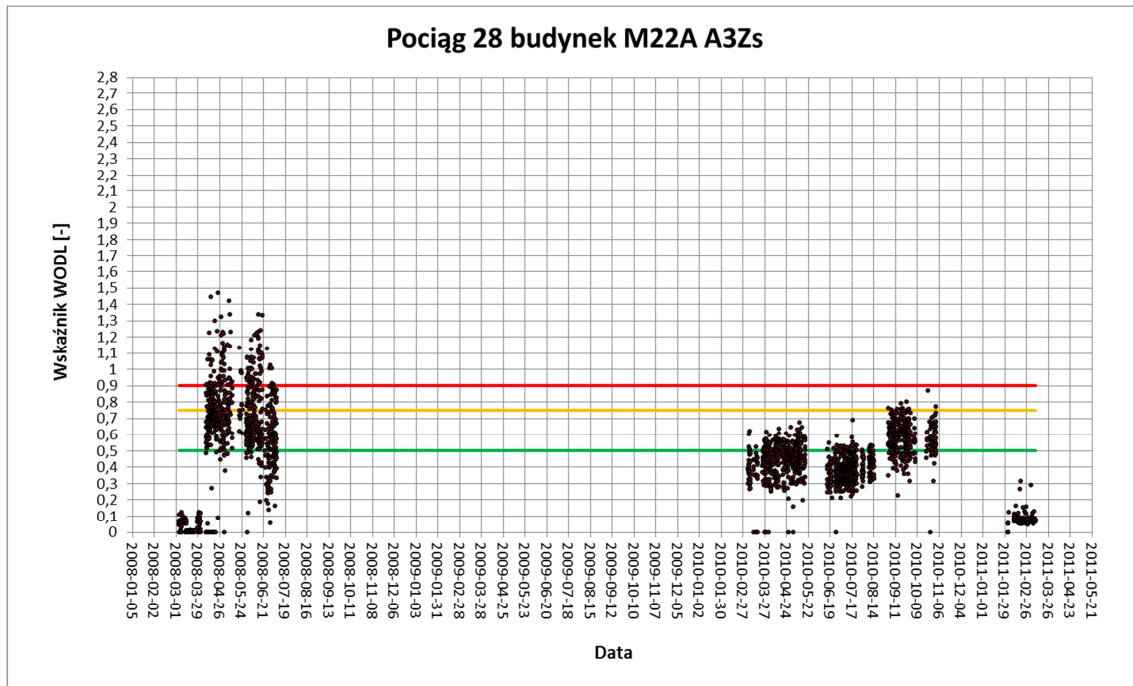
Rys. 4.2.39. Długookresowy rozkład wartości WODL dla składu pociągu nr 25



Rys. 4.2.40. Długookresowy rozkład wartości WODL dla składu pociągu nr 26



Rys. 4.2.41 Długookresowy rozkład wartości WODL dla składu pociągu nr 27



Rys. 4.2.42. Długookresowy rozkład wartości WODL dla składu pociągu nr 28

Na podstawie dostępnych danych, dla badanych składów pociągów metra obliczono wartości funkcji trendu dla okresów pomiędzy przetaczaniami kół. Dane te zaprezentowano w postaci tabeli (Tab. 4.2.9.).

Dane te poddano analizie, obliczając kolejno wartość średnią, odchylenie standardowe wartości średniej oraz wartość maksymalną i minimalną dla uzyskanych współczynników równania trendu (Tab. 4.2.10):

$$y = Ax + B \quad (4.2.2)$$

Tab. 4.2.9. Równania funkcji trendu dla badanych składów pociągów. Kolorem czerwonym oznaczono trendy z okresu eksploatacji 2003-2004. Kolorem czarnym oznaczono trendy z okresu 2008-2011

Pociąg nr	Równanie trendu	Pociąg nr	Równanie trendu
16	$y = 0,0063x - 236,26$	23	$y = 0,0052x - 197,85$
	$y = 0,0104x - 394,65$		$y = 0,0127x - 481,94$
	$y = 0,0081x - 309,07$		$y = 0,015x - 570,45$
	$y = 0,0015x - 59,072$		$y = 0,0059x - 225,16$
	$y = 0,0013x - 51,271$		$y = 0,0159x - 626,52$
			$y = 0,0008x - 30,521$
17	$y = 0,0075x - 282,74$	24	$y = 0,0107x - 406,18$
	$y = 0,0021x - 83,361$		$y = 0,0133x - 503,76$
	$y = 0,0012x - 47,828$		$y = 0,0057x - 216,61$
	$y = 0,0098x - 386,02$		
18	$y = 0,0074x - 281,09$		$y = 0,0005x - 20,786$
	$y = 0,0143x - 540,17$	25	$y = 0,0137x - 520,18$
	$y = 0,0102x - 387,2$		$y = 0,0077x - 290,72$
	$y = 0,0014x - 55,053$		$y = 0,0045x - 178,38$
	$y = 0,0007x - 26,928$		$y = 0,0006x - 26,128$
19	$y = 0,0085x - 321,07$	26	$y = 0,0175x - 664,81$
	$y = 0,0106x - 401,8$		$y = 0,006x - 229,04$
	$y = 0,0012x - 45,78$		$y = 0,0036x - 142,71$
	$y = -0,0017x + 69,773$		$y = 0,0011x - 45,1$
	$y = 0,0006x - 24,274$		
20	$y = 0,0013x - 48,377$	27	$y = 0,0109x - 409,93$
	$y = 0,0112x - 425,52$		$y = 0,0091x - 345,14$
	$y = 0,0003x - 10,71$		$y = 0,0122x - 464,69$
	$y = 0,0013x - 51,963$		$y = 0,006x - 226,88$
	$y = 0,0053x - 208,95$		
	$y = 0,0002x - 9,4099$		
21	$y = 0,0051x - 192,98$	28	$y = 0,0151x - 573,12$
	$y = 0,0044x - 165,95$		$y = 0,0045x - 170,98$
	$y = 0,0091x - 358,39$		
	$y = 0,0004x - 14,052$		
22	$y = 0,0115x - 435,5$		
	$y = 0,0085x - 337,56$		
	$y = 0,0013x - 50,335$		

Tab. 4.2.10. Statystyczna analiza funkcji wszystkich trendów dla poszczególnych okresów czasu

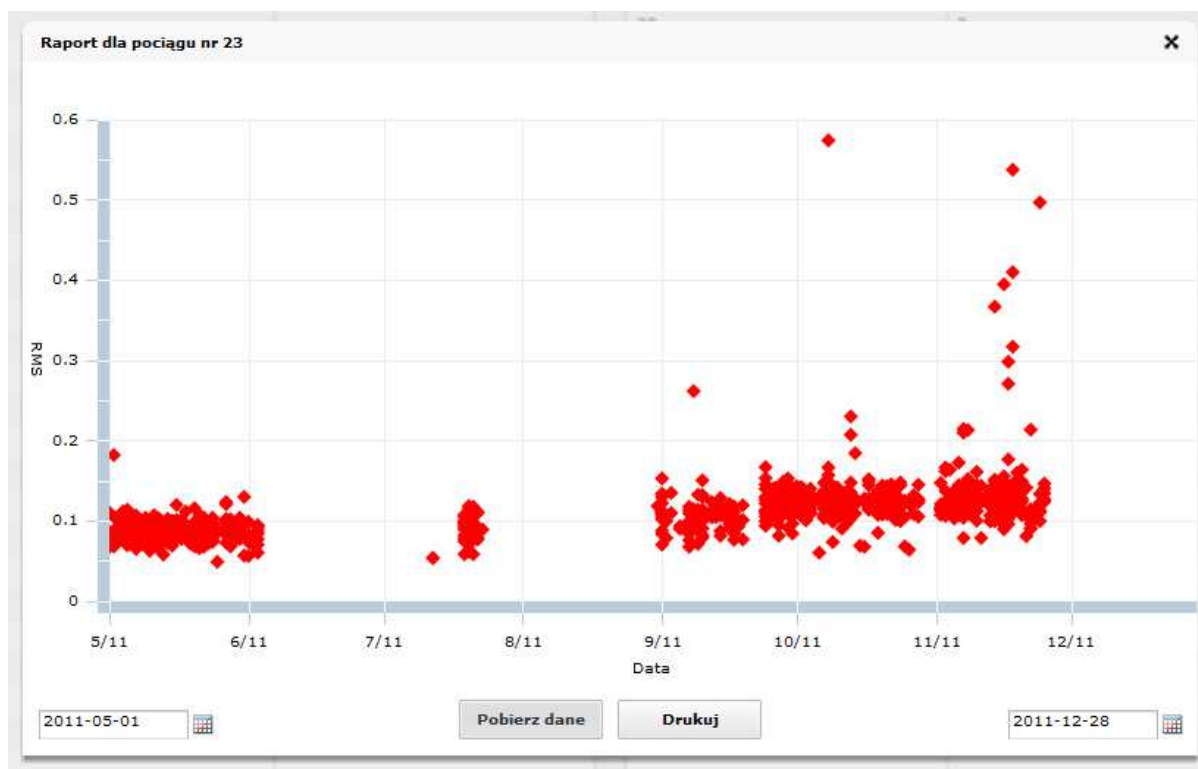
Okres obserwacji	2003-2004		2008-2011	
	A	B	A	B
Wartość średnia	0,0088	341,58	0,0031	122,92
Odchylenie standardowe	0,0038	155,71	0,0039	155,11
Wartość maksymalna	0,0151	664,81	0,0159	626,52
Wartość minimalna	0,0003	10,71	0,0002	9,41

Na podstawie zaprezentowanych danych można stwierdzić, że w okresie od 2003 do 2004 wartość średnia współczynnika A była prawie trzykrotnie wyższa niż w okresie 2008-2011, co oznacza, że w pierwszym okresie drgania wzrastały w czasie około trzykrotnie szybciej, przy podobnym odchyleniu standardowym w obu okresach i przy podobnym zakresie wartości (od 0,0003 do 0,0151 w pierwszym okresie oraz od 0,0002 do 0,0159 w drugim).

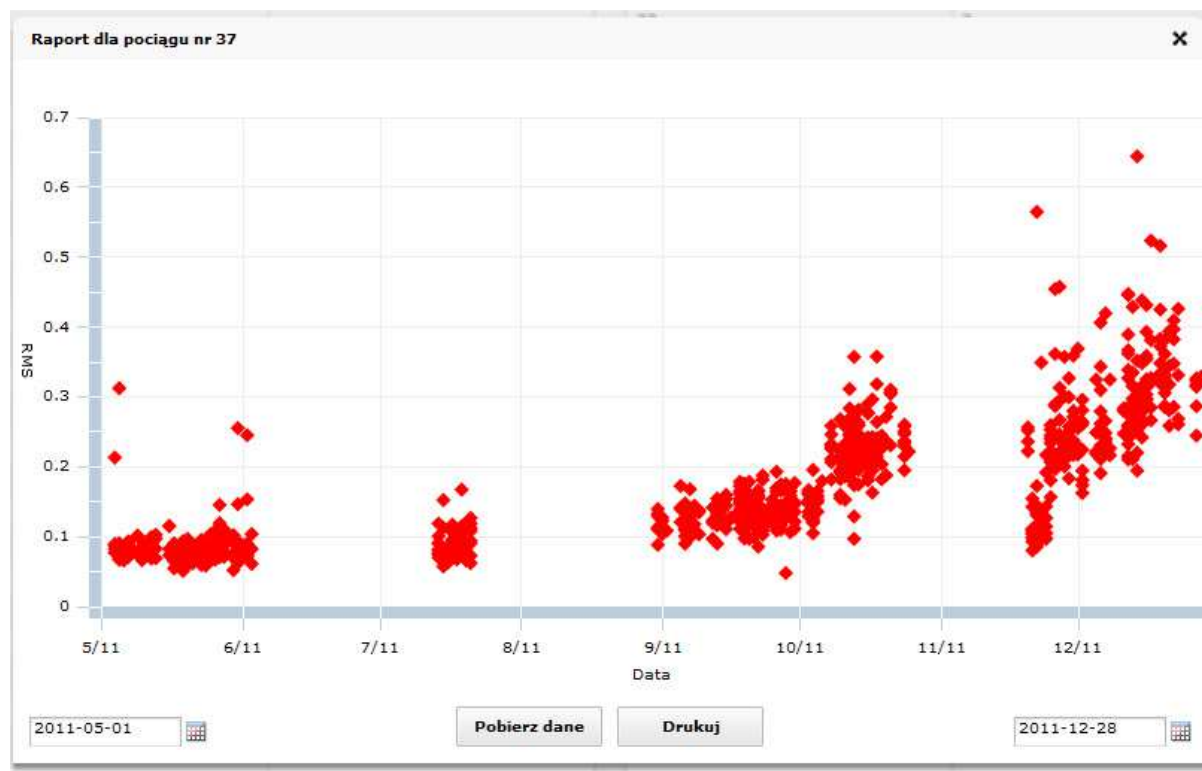
Niższa wartość współczynnika B dotycząca okresu 2008 – 2011 jest odzwierciedleniem średniego poziomu drgań mierzonego na stropie. Średni poziom drgań dla analizowanego okresu był niższy niż w okresie 2003-2004.

System ciągłego monitoringu drgań metra warszawskiego działał z przerwami od 2003 roku. Wyraźna zmiana w jego wykorzystaniu jest zauważalna na podstawie analizowanych danych od roku 2009. Z informacji uzyskanych od osób obsługujących system monitoringu wynika, że uległa zmianie też procedura szlifowania kół w poszczególnych składach. Obecnie jeśli pociąg jest wycofywany do reprofilacji kół, to szlifowane są wszystkie koła a nie tylko te, które są na osi gdzie w pomiarach bicia promieniowego wykazano największe odchylenia. Taka procedura przyczyniła się do zdecydowanej poprawy w zakresie ochrony przed drganiami ludzi w budynkach (konstrukcja budynku nie jest narażona – drgania nie są odczuwalne). Zaprezentowano to na rysunkach z lat 2008 – 2011. Co istotne, dane z roku 2008 pokazują znaczne poziomy wskaźnika WODL. Charakter przedstawionych danych w kolejnych latach zdecydowanie jednak odbiega od tego trendu i nastąpiła zamiana na korzyść. Zmiana ta była wynikiem baczniejszego śledzenia zmian trendów w eksploatowanych składach.

Użyteczność przedstawionych tu analiz zweryfikowano pozytywnie przez użytkowników w Metrze Warszawskim, gdyż obecnie wizualna analiza trendów jest zaimplementowana do nowej wersji systemu monitoringu (wersja graficzna) i pozwala osobie obsługującej system tworzyć na potrzeby poprawnej eksploatacji właśnie takie wykresy. Poniżej zaprezentowano wykres jaki jest obecnie dostępny z panelu obsługi. Obserwacja trendów jest bardzo istotna z punktu widzenia kosztów eksploatacji, gdyż jak każdy poprawnie działający system monitoringu, pozwala z pewnym wyprzedzeniem zaplanować konieczny remont (w tym przypadku reprofilacja kół), jednocześnie oszczędzając na wydatkach na niepotrzebne przypadkowe remonty (często wykonywane bez wyraźnej potrzeby – a jedynie zgodne z istniejącym harmonogramem).



Rys. 4.2.43. Długookresowy rozkład wartości WODL dla składu pociągu nr 23 – wykres z systemu monitorowania drgań



Rys. 4.2.44. Długookresowy rozkład wartości WODL dla składu pociągu nr 37 – wykres z systemu monitorowania drgań

4.2.2.1. Analiza trendu wielotygodniowego

W dalszej części pracy zaprezentowano wyniki analiz, uzyskane z systemu ciągłego monitoringu drgań na podstawie danych z przejazdów pociągów metra w latach 2003 – 2004. Dane te nie były jednak kompletne – nie były dostępne ani przebiegi czasowe, ani wyniki analiz dla danych dotyczących pociągów produkcji rosyjskiej.

Wyniki dotyczą jednego z dwóch istniejących w owym czasie przekrojów pomiarowych - N118.

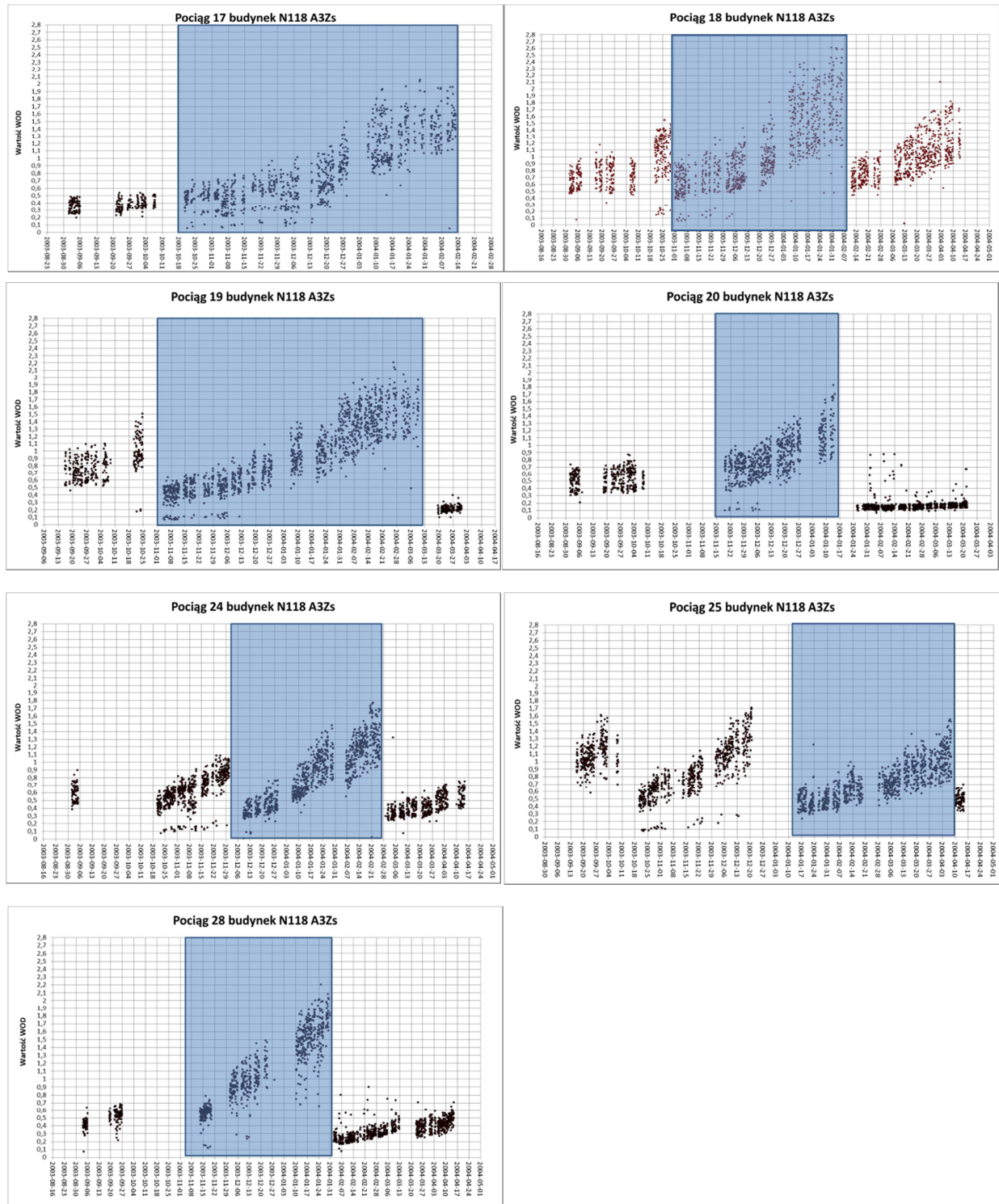
W kolejnej części niniejszego rozdziału analizie poddano wartości współczynnika WODL w funkcji czasu na przestrzeni kolejnych ośmiu miesięcy (dla wybranych pociągów). Selekcja pociągów do analiz podyktowana była odpowiednio długim czasem pomiędzy toczniami. W sytuacji gdy ten czas był stosunkowo krótki, pociąg nie nadawał się do analizy długookresowej (ze względu na fakt, iż trend był trudny do oszacowania). Ostatecznie, do bardziej szczegółowych analiz wybrano następujące pociągi typu Metropolis o numerach: 17, 18, 19, 20, 24, 25 i 28.

Dla każdego z zaprezentowanych składów na wykresie obejmującym osiem miesięcy zaprezentowano analizowany odcinek czasowy, następnie wykonano analizę trendów dla wartości maksymalnych i średnich współczynnika WODL.

Aby uzyskać wskaźnik, użyteczny przy projektowaniu ze względu na oszacowanie rzeczywistych maksymalnych wpływów dynamicznych, należało określić obwiednie wartości WODL. Co bardzo istotne, jest to maksymalna osiągnięta w pomiarach czyli doświadczalnie (nie obliczeniowo!) wartość, która wyznacza odpowiednio rzeczywistą granicę oddziaływań dynamicznych na stropie mierzonego budynku. Może ona zostać wykorzystana w przyszłości jako pewnego rodzaju wskaźnik, który został wyznaczony na podstawie pomiarów i może zostać użyty w wyznaczaniu maksymalnych możliwych oddziaływań dynamicznych na stropy budynków, co odpowiada drganiom odczuwalnym przez ludzi w budynkach. Wyznaczenie tegoż wskaźnika jest o tyle istotne, że obecnie obserwuje się pewien trend w projektowaniu, który ma na celu oszacowanie przyszłych niekorzystnych wpływów dynamicznych od poszczególnych źródeł emitujących drgania – w przypadku projektowania budynków w strefie oddziaływań dynamicznych.

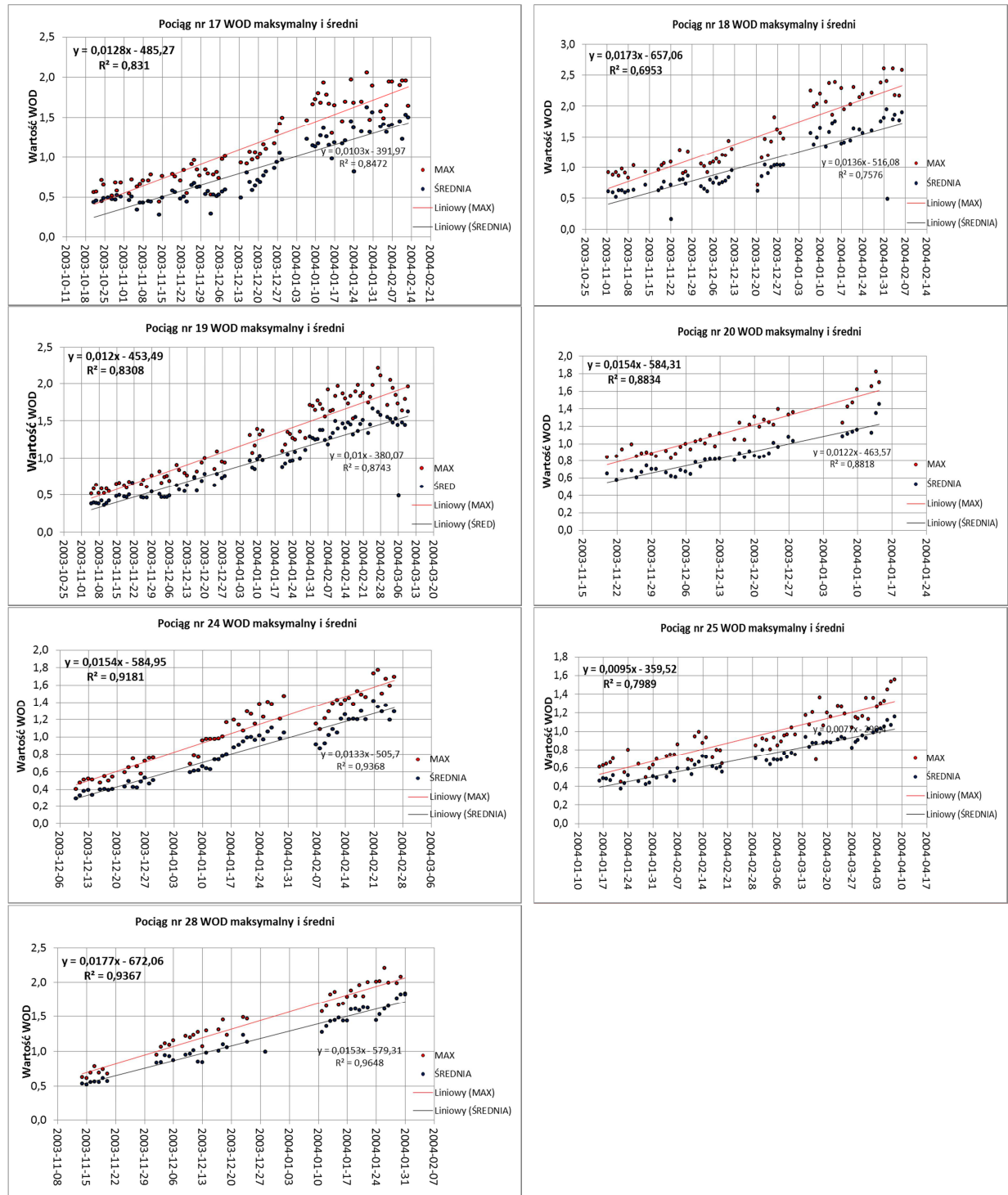
Co istotnie, dane te są wynikiem pomiarów doświadczanych, a nie symulacji – czyli są to wartości rzeczywiste nie wynikające z obliczeń na modelach (które zawsze są tylko pewnym przybliżeniem) – jak ma to miejsce w przypadku obliczeń metodą symulacji komputerowej.

Poniżej zaprezentowano okresy czasu dla poszczególnych składów, z których wybrano dane do dalszych analiz. Są to okresy pomiędzy przetaczaniem składów, kiedy wzrasta współczynnik WODL.



Rys. 4.2.45. Wybór odcinka czasowego do analizy trendów występujących podczas przejazdów wybranych składów pociągów metra

W kolejnym etapie dla każdego dnia, policzono wartość maksymalną współczynnika WODL i wartość średnią – pojedynczy punkt reprezentuje wartość max WODL dla dnia bądź wartość średnią WODL dla dnia. Wyniki zaprezentowano na poniższych grafach:



Rys. 4.2.46. Wykresy linii trendu dla wartości obwiedni max WODL wraz z wartością funkcji, a także wartość współczynnika determinacji R²*

Tab. 4.2.11. Zbiorcze wyniki dla obwiedni max WODL – dla wybranych składów pociągów metra

Lp.	Pociąg	Równanie	R ²	Przyrost WOD/tydzień [%]
1	17	$y = 0,0128x$	0,8310	1,3
2	18	$y = 0,0173x$	0,6953	1,7
3	19	$y = 0,012x$	0,8308	1,2
4	20	$y = 0,0154x$	0,8834	1,5
5	24	$y = 0,0154x$	0,9181	1,5
6	25	$y = 0,0095x$	0,7989	0,9
7	28	$y = 0,0177x$	0,9367	1,8

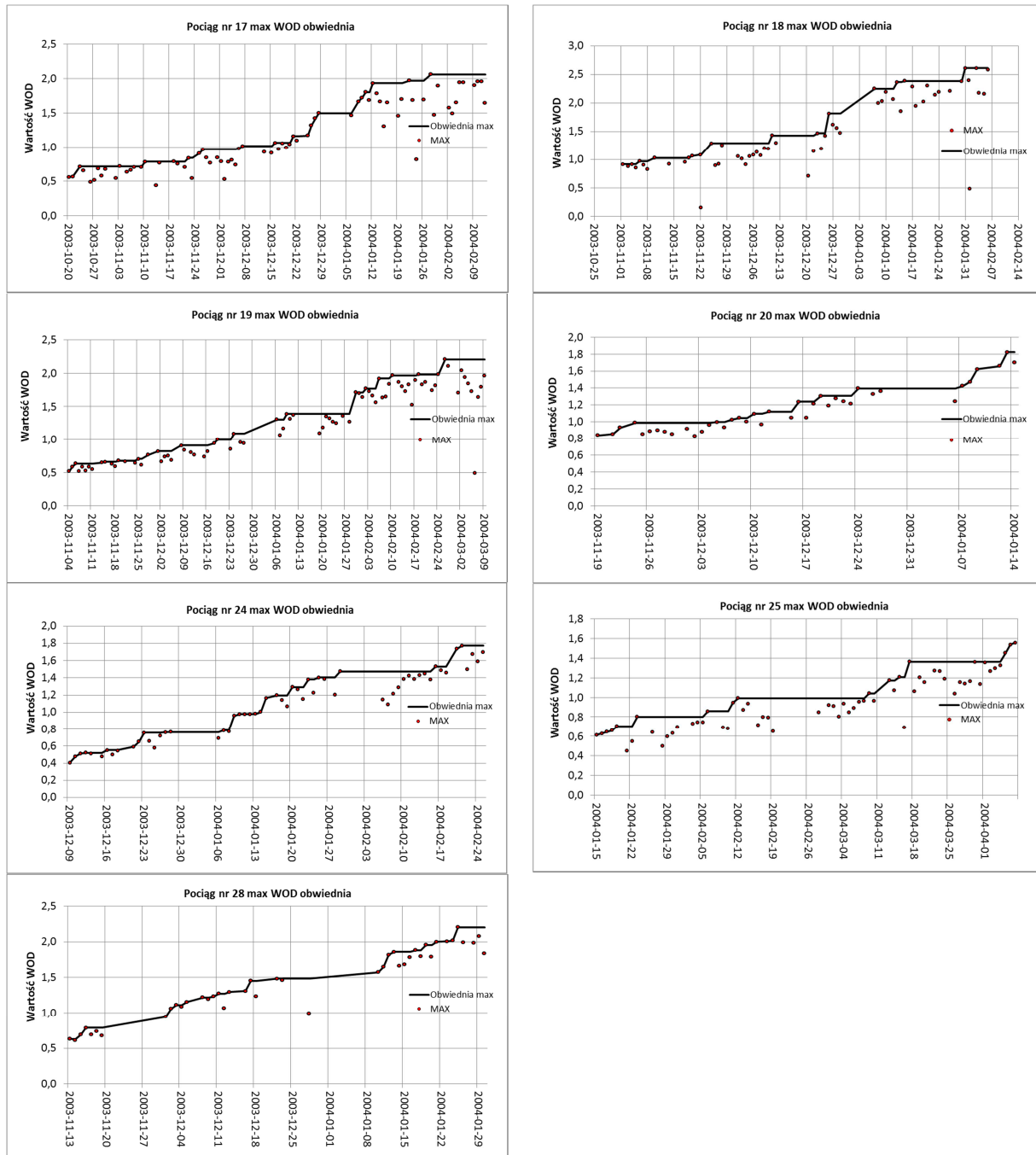
Przyrost WODL w ciągu tygodnia waha się w zakresie od około 0,9% do 1,8% zaś współczynnik determinacji R² mieści się w zakresie od 69,5% do 93,7%. Wniosek jest taki, że dopasowanie linii trendu nie jest zbyt korzystne szczególnie, dla składu nr 18, 25, 17 i 19.

Chcąc wyznaczyć pewne wskaźniki diagnostyczne, które mogłyby znaleźć zastosowanie w obliczeniach konstrukcyjnych dla projektowanych budynków w sąsiedztwie linii metra, należy podjąć próbę zawężenia zbioru danych tak, aby nie stracić najbardziej istotnych z punktu widzenia diagnostyki wartości.

Rozwiązaniem zaistniałego problemu wydaje się wyznaczenie obwiedni wartości maksymalnych WODL.

4.2.2.2 Obwiednia wartości maksymalnej WODL.

Poniżej zaprezentowano wyniki w postaci obwiedni wartości maksymalnych wskaźnika WODL. Z uwagi na dość duży rozrzut danych, a także chęć wyznaczenia pewnej wartości granicznej dla najbardziej niekorzystnej sytuacji, obliczenie obwiedni wartości maksymalnej WODL wydaje się celowe i właściwe. Analiza ta może zostać w przyszłości wykorzystana do prognozowania możliwych maksymalnych wpływów dynamicznych na ludzi przebywających w budynkach w sąsiedztwie linii metra.



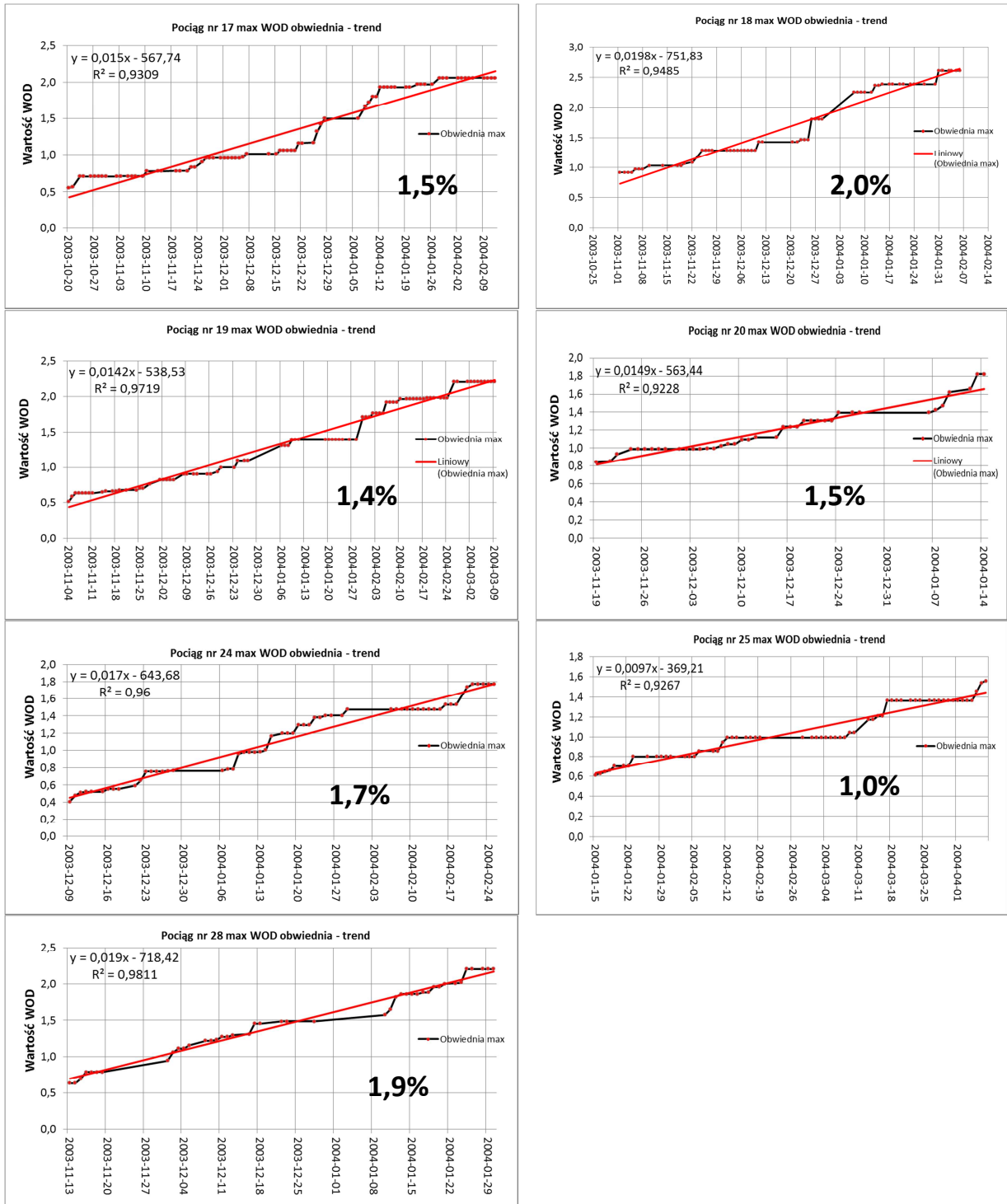
Rys. 4.2.47. Wykresy obwiedni wartości maksymalnych WODL w trendzie rosnącym

Co istotne, powyższe wykresy pokazują obwiednię wartości WODL ale w trendzie rosnącym. Jeśli więc nawet w kolejnych dniach wystąpiły niższe wartości wskaźnika WODL, to zostały one pominięte w wykresie trendu i dopiero kolejna wartość o ile była wyższa od poprzedniej – podnosiła wartość WODL na zaprezentowanych wykresach.

Wnioskując na podstawie zobrazowanych analiz można stwierdzić, że w rzeczywistości współczynnik WODL nie przekracza wartości 3 (maksymalnie dla składu 18 – osiąga wartość 2,6.).

Na poniższych rysunkach zaprezentowano trend dla przedstawionej powyżej obwiedni rosnących

wartości MAX WODL (rys. 4.2.48).



Rys. 4.2.48. Wykresy obwiedni wartości maksymalnych WODL w trendzie rosnącym wraz z linią trendu

*-**Współczynnik determinacji R^2** – jedna z podstawowych miar jakości dopasowania modelu.

Współczynnik ten informuje o tym, jaka część zmienności zmiennej objaśnianej została wyjaśniona przez model. Jest on więc miarą stopnia, w jakim model wyjaśnia kształtowanie się zmiennej objaśnianej. Można również powiedzieć, że współczynnik determinacji opisuje tę część zmienności objaśnianej, która wynika z jej zależności od uwzględnionych w modelu zmiennych objaśniających. Współczynnik determinacji przyjmuje wartości z przedziału [0;1] jeśli w modelu występuje wyraz wolny, a do estymacji parametrów wykorzystano metodę najmniejszych kwadratów. Jego wartości najczęściej są wyrażane w procentach. Dopasowanie modelu jest tym lepsze, im wartość R^2 jest bliższa jedności. Wyraża się on wzorem:

$$R^2 = \frac{\sum_{t=1}^n (\hat{y}_t - \bar{y})^2}{\sum_{t=1}^n (y_t - \bar{y})^2}, \quad (4.2.3)$$

gdzie:

y_t - rzeczywista wartość zmiennej Y w momencie t,

\hat{y}_t - wartość teoretyczna zmiennej objaśnianej (na podstawie modelu),

\bar{y} - średnia arytmetyczna empirycznych wartości zmiennej objaśnianej.

Tab. 4.2.12. Zbiorcze wyniki dla obwodni max WODL – dla wybranych składów pociągów metra

Lp.	Pociąg	Równanie	R^2	Przyrost WOD/tydzień [%]
1	17	$y = 0,0150x$	0,9309	1,5
2	18	$y = 0,0198x$	0,9485	2,0
3	19	$y = 0,0142x$	0,9719	1,4
4	20	$y = 0,0149x$	0,9228	1,5
5	24	$y = 0,0170x$	0,9600	1,7
6	25	$y = 0,0097x$	0,9267	1,0
7	28	$y = 0,0190x$	0,9811	1,9

Tygodniowe przyrosty WODL wahają się w zakresie od 1% do 2% zaś współczynnik determinacji R^2 mieści się w zakresie od 92,3% do 98,1% czyli dopasowanie linii trendu jest poprawne.

Reasumując, można przyjąć dla najbardziej niekorzystnej sytuacji, która może w przyszłości wystąpić w czasie eksploatacji pociągów metra w Warszawie, przyrost WODL przyjmuje wartość 2% (patrz rys. 4.2.48 – dla składu nr 18 oraz Tabela 4.2.12), zaś wskaźnik WODL wartość 2,6 (patrz rys. 4.2.47 – pociąg nr 18).

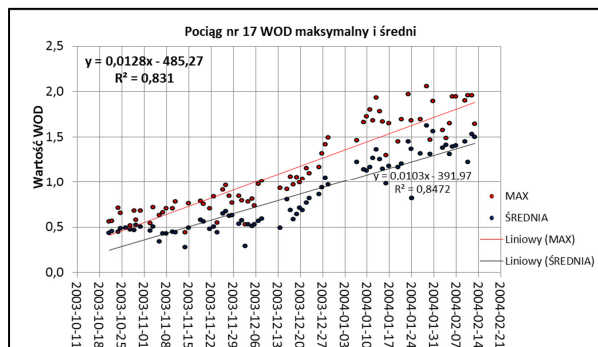
Dodatkowo na rysunkach przedstawiono linię trendu dla wartości obwiedni max WODL wraz z wartością funkcji, a także wartość współczynnika determinacji R^2 .

Na każdym wykresie w procentach przedstawiono przyrost WODL obliczonej linii trendu w ciągu tygodnia (delta WOD/tydzień).

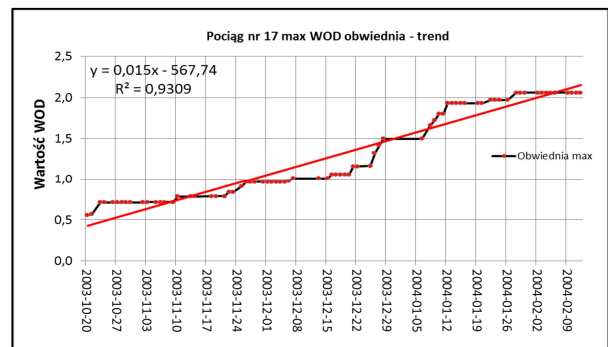
Opisane tu dane przedstawiono zbiorczo (Tabela 4.2.13) dla wszystkich badanych składów wraz z porównaniem dla wartości z obwiedni WODL max (WODL Maksymalny Obwiednia) i wartości WODL max (WODL Maksymalny) poniżej w postaci tabelarycznej:

Tab. 4.2.13. Porównanie dla wartości z obwiedni WODL max i wartości WODL max.

Lp.	Pociąg	WOD Maksymalny			WOD Maksymalny Obwiednia		
		Równanie	R^2	Kąt [%]	Równanie	R^2	Kąt [%]
1	17	$y = 0,0128x$	0,8310	1,3	$y = 0,0150x$	0,9309	1,5
2	18	$y = 0,0173x$	0,6953	1,7	$y = 0,0198x$	0,9485	2,0
3	19	$y = 0,012x$	0,8308	1,2	$y = 0,0142x$	0,9719	1,4
4	20	$y = 0,0154x$	0,8834	1,5	$y = 0,0149x$	0,9228	1,5
5	24	$y = 0,0154x$	0,9181	1,5	$y = 0,0170x$	0,9600	1,7
6	25	$y = 0,0095x$	0,7989	0,9	$y = 0,0097x$	0,9267	1,0
7	28	$y = 0,0177x$	0,9367	1,8	$y = 0,0190x$	0,9811	1,9



a



b

Rys. 4.2.49. Porównanie analizy wartości maksymalnej WODL (a) i wartości obwiedni maksymalnej WODL (b) dla tego samego składu – pociąg nr 17

Jak można zauważyć, analizując powyższą tabelę porównawczą (Tabela 4.2.13) – o ile wartości przyrostów wskaźnika WODL są dość podobne, o tyle wartość współczynnika determinacji (R^2) różni się znacznie. Spowodowane jest to dużym rozrzutem danych. Analizując wartość obwiedni maksymalnej wartości WODL – można stwierdzić, że dopasowanie modelu jest znacznie bliższe jedności (100%).

5.0. WNIOSKI

Na podstawie wykonanych analiz wpływu drgań na budynki można sformułować następujące wnioski:

1. Niezależnie od faktu, że pociągi jeżdżą obok budynku N118 praktycznie ze stałą prędkością, wynoszącą $60 \text{ km/h} \pm 3\%$, to w ciągu doby poszczególne przejazdy tego samego pociągu różnią się między sobą pod względem intensywności wzbudzanych drgań. Różnice pomiędzy maksymalną a średnią wartością MAX (maksymalna wartość przyspieszenia drgań określona dla każdego przebiegu czasowego) wynosiły w ciągu doby dla czujnika A1Z (pionowego) od 12% do 66%, zaś dla czujnika A2X (poziomego) od 14% do 44%. Jedną z przyczyn występowania tych różnic, mogą być zachodzące w ciągu doby zmiany napełnienia pociągów pasażerami. Podane wartości odchylenia mogą być traktowane jako oszacowanie maksymalnej różnicy pomiędzy wartościami (MAX) uzyskanymi z pomiarów doraźnych, a wartościami maksymalnymi, jakie potencjalnie mogą wystąpić w cyklu dobowym.
2. Na podstawie zaprezentowanych w rozdziale 4.1 wykresów można zaobserwować pewną prawidłowość, która jest uwidoczniła dla wszystkich trzech wzajemnie prostopadłych kierunków rejestrowanych drgań: przyrost rejestrowanej maksymalnej wartości przyspieszenia drgań na fundamencie budynku nie jest proporcjonalny do przyrostu maksymalnej wartości przyspieszenia drgań rejestrowanej na podtorzu tunelu metra. Im wyższy przyrost poziomu drgań w tunelu tym przyrost maksymalnej wartości przyspieszenia drgań na fundamencie jest mniejszy. W przypadku analizowanego przekroju pomiarowego podtorze tunelu – budynek, redukcja maksymalnej wartości przyspieszenia drgań jest prawie 10-krotna natomiast przesunięcie w dziedzinie częstotliwości jest bardzo niewielkie.
3. Badając spektra odpowiedzi, można zauważyć, że przejazdy tego samego składu pociągu, poruszającego się z praktycznie tą samą prędkością (około 60 km/h) mogą wywoływać różną, co do wielkości odpowiedzi budynku najprawdopodobniej w zależności od stopnia wypełnienia (obciążenia) wagonów pasażerami.
4. Przejazdy różnych pociągów tego samego typu dają różną wartość odpowiedzi dynamicznej budynku nie tylko w cyklu dobowym ale także w dłuższych okresach czasu co związane jest ze zmianami stanu kół (zmianą kształtu kół, np. owalizacją) w wyniku długotrwałej eksploatacji.

Kolejne wnioski dotyczą analizy wpływu drgań na ludzi w budynku:

5. Różnice pomiędzy maksymalną a średnią wartością RMSmax wynosiły w ciągu doby od ok. 15 do 28 %. Ten sam przedział odchylenia wartości maksymalnej od wartości średniej wystąpił dla obu badanych składów pociągów, a więc niezależnie od tego czy dany pociąg wzbudzał mniej czy też bardziej intensywne drgania. Podane wartości odchylenia mogą być traktowane jako oszacowanie maksymalnej różnicy pomiędzy RMSmax uzyskanym z pomiarów doraźnych, a maksymalną wartością RMSmax, jaka potencjalnie może wystąpić w cyklu dobowym.
6. Im dłużej pociąg pozostaje w eksploatacji (można domniemywać, że w tym czasie wartość bicia promieniowego wzrasta), tym większe są różnice w wartości wskaźnika WODL dla poszczególnych dni. Jeśli zaś pociąg poddano reprofilacji kół, wartości dobowe współczynnika WOD są bardziej skupione na wykresie (tzw. zwężona część „lejka”). Jest to pewna prawidłowość, występująca niezależnie od składu pociągu. Może ona być spowodowana stopniem wypełnienia pasażerami w ciągu doby (podatność na zmiany wzrasta wraz z

rosnącą wartości bicia promieniowego). Można domniemywać, że w momencie kiedy wartości WODL miały spory rozrzut i wartości były wysokie- jeśli następował gwałtowny spadek wartości – to oznaczał on przetaczanie pociągu (bark danych dotyczących toczenia z tego okresu).

Na podstawie przedstawionych wniosków można stwierdzić, że dwa główne czynniki powodujące zmiany w poziomie rejestrowanych drgań to:

- Stopień wypełnienia składów pasażerami
- Stan kół poszczególnych składów pociągów.

Pierwszy z wymienionych parametrów odpowiada głównie za zmiany w krótkim okresie czasu (zmiany dobowe), drugi zaś z zmiany w dłuższym okresie czasu (zmiany długookresowe). W niniejszej pracy dało się wykazać, że przy złym stanie kół (duże bicie promieniowe), zmiany dobowe maksymalnej wartości przyspieszenia drgań rejestrowane są z znacznie szerszym zakresem niż dla pociągu, po przetoczeniu kół (obserwacja dotyczy składów Metropolis).

Przedstawione w niniejszej pracy wyniki analiz nie tylko potwierdziły słuszność sformułowanej na wstępie tezy, że *„Zmienne w czasie warunki eksploatacyjne metra mają istotny wpływ na poziom drgań emitowanych do środowiska”*, ale pozwoliły także dokonać ilościowego oszacowania tego zjawiska. Oszacowania te mogą posłużyć z jednej strony do interpretacji doraźnych (krótkoterminowych, kilkugodzinnych) pomiarów drgań a z drugiej dają podstawy do prognozowania wynikających z uwarunkowań eksploatacyjnych zmian wpływu drgań na budynki i na ludzi w budynkach w okresach długoterminowych.

Jako niewątpliwy wkład przedstawionych tu analiz należy odnotować fakt, że obecnie wizualna analiza trendów jest zaimplementowana do nowej wersji systemu monitoringu w metrze warszawskim i pozwala osobie odpowiedzialnej tworzyć na potrzeby poprawnej eksploatacji właśnie takie wykresy. Obserwacja trendów jest bardzo istotna z punktu widzenia kosztów eksploatacji, gdyż jak każdy poprawnie działający system monitoringu, pozwala z pewnym wyprzedzeniem zaplanować konieczny remont (w tym przypadku reprofilacja kół), jednocześnie oszczędzając na wydatkach na niepotrzebne przypadkowe remonty (często wykonywane bez wyraźnej potrzeby – a podyktowane harmonogramem prac).

W praktyce wykorzystano też przedstawione w niniejszej pracy rozważania dotyczące oceny wpływu drgań na ludzi wykonanej na podstawie pomiarów drgań dolnej powierzchni stropu piwnicy. Ze względów praktycznych czujnik jest umieszczony na stropie piwnicy ale dzięki odpowiednim badaniom kalibracyjnym – pokazuje on wartości takie jak gdyby był umieszczony w pomieszczeniu na podłodze parteru. Dobór miejsca (parter) jest podyktowany faktem, iż zazwyczaj drgania pochodzące od komunikacji podziemnej, generują większe wartości na najniższej kondygnacji, w przeciwieństwie do komunikacji naziemnej (wieloletnie badania prof. K. Stypuły) [por. Stypuła (2001) – Rozdz. 5.3].

Kierunki dalszych badań

Konieczne jest kontynuowane podjętych prac nad analizą danych z systemu ciągłego monitorowania drgań Metra Warszawskiego, co pozwoli na dokładniejsze poznanie zjawiska przenoszenia się drgań z tunelu na budynek. Zbudowanie w przyszłości modelu propagacji drgań i jego weryfikacja z wykorzystaniem danych pozyskanych z systemu monitorowania może doprowadzić do uzyskania zweryfikowanych pomiarowo a więc wiarygodnych modeli przenoszenia drgań z tunelu na budynek.

Z uwagi na brak danych pomiarowych dotyczących stanu kół, w niniejszej pracy nie udało się określić ilościowej zależności pomiędzy stanem kół pociągów (charakteryzowanego np. biciem promieniowym kół) a poziomem generowanych przez te pociągi drgań, a co za tym idzie poziomem wpływu tych drgań na budynki i na ludzi w budynkach. Takie dane powinno się uwzględnić w dalszych kierunkach badań.

6.0. LITREATURA

- Assessing Vibration: (2006) A technical guideline, Department of Environmental and Conservation NSV, DEC 2006/43, February 2006.
- Balendra T., Koch C G., Ho Y.C. (1991) *Dynamic response of building due to trains in underground tunnels*. Earthquake eng. and structural dynamics, vol. 20, 1991, s. 275-291.
- Beauchamp K.G. (1978) *Przetwarzanie sygnałów metodami analogowym i cyfrowym*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne. Warszawa 1978.
- Ciesielski R. i in. (1988), *Komentarz do normy PN-85/B-02170 „Ocena szkodliwości drgań przekazywanych przez podłoże na budynki”*. COBPBO-Warszawa, Warszawa, 1988.
- Ciesielski R., Blarowski A., (1986) *O wpływach parasejsmicznych wywołanych eksploatacją metra*. Metro a środowisko przyrodnicze. Generalna Dyrekcja Budowy Metra, Warszawa 1986, s. 112-129.
- Ciesielski R., Kawecki J., Maciąg E., Stypuła K. (1993) : *Ocena diagnostyczna skutków wpływów drgań na budynki i ludzi w budynkach*. Inż. i Budownictwo, nr 9/93, s.390-394.
- Ciesielski R., Kawecki J., Maciąg E. (1993) : *Ocena wpływu wibracji na budowle i ludzi w budynkach (Diagnostyka dynamiczna)*. Instytut Techniki Budowlanej, Warszawa 1993.
- Ciesielski R., Kawecki J., Stypuła K., (1994) *Prognozowanie wpływów dynamicznych od przyszłej eksploatacji metra na projektowane budynki*. Inż. i Budownictwo, nr 1-2/94, s. 38-41.
- Ciesielski R., Maciąg E. (1990) , *Drgania drogowe i ich wpływ na budynki*. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1990.
- Ciesielski R., Stypuła K., (2003) *Percepcja drgań przez ludzi znajdujących się w budynkach miejskich*, Mat. XLIX Konf. Naukowej KILiW PAN i KN PZITB „Krynica 2003”, t. I, Krynica 2003, s. 19-35.
- Ciesielski R., Stypuła K., (1994) *Some results of dynamic investigations of vibrations caused by the underground (New Metro in Warsaw)*. Wave Propagation and Reduction of Vibrations, Workshop Wave'94. Ruhr – University Bochum, 1994.
- Ciesielski R., Stypuła K., (1995) *Wyniki pomiarów drgań generowanych próbnymi przejazdami na I odcinku metra w Warszawie*. Inż. i Budownictwo nr 9/95, s. 455-460.
- Ciesielski R., Stypuła K., (1998) *Zabezpieczenie budynków przed wpływami parasejsmicznymi generowanymi komunikacją podziemną (metro)*. IV Konferencja nauk.-techn. REW-INŻ.'98. Kraków 1998. Materiały t. II, s. 427-436.
- Ciesielski R., Stypuła K., (1994(2)) *Znaczenie i sposób badania tła dynamicznego dla oceny skutków parasejsmicznych na przykładzie linii metra w ulicy Marszałkowskiej w Warszawie*. Mat. VII Symp. Wpływy Sejsmiczne i Parasejsmiczne na Budowle, Kraków 1994, s. 133-139.
- Ciesielski R. (1961): *Ujęcie obliczeniowe oraz ocena wpływu drgań i wstrząsów ze źródeł zewnętrznych na niektóre typy budowli*. Politechnika Krakowska, Zeszyt Naukowy nr 1. Kraków 1961.
- Ciesielski R. (1973): *Ocena szkodliwości wpływów dynamicznych w budownictwie*. Arkady, Warszawa 1973.
- Ciurej H., Kawecki J., Stecz P. (2003) *Obliczenia równoległe w kształtowaniu modelu SSN do wyznaczania spektrów odpowiedzi drgań komunikacyjnych*. 2 nd International Conference on New Trends in Statics and Dynamics of Buildings. Conference Proceedings. October 16-17, 2003 Bratislava. ISBN 80-227-1958-7
Bratislava, Slovak University of Technology, 2003 , pp. 133-136
- Degrande G., Schilemans L., (1998) *Free Field Vibrations During the Passage of a HST*. Noise and

- Vibration Engineering. Proc. ISMA 23, 1998, P. SAS ED., vol. III, s. 1563-1570.
- Degrande G., Chattejee P., Jacobs S., Charlier J., Bouvet P., Brassens D., (2002) *CONVURT PROJECT – Experimental results of free field and structural vibrations due to underground railway traffic*. Leuven 2002.
- Engel Z., (1993) *Ochrona środowiska przed drganiami i hałasem*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1993.
- Estorff O., Antes H., (2011) *Dynamic response of tunnel structures*. Structural Dynamics, Kraetzig et al. (eds), Balkema, Rotterdam 1990, s. 803-810.
- Galant F., Heinemeyer, Feldmann M., Lentzen S., *Assessment of floor vibration using the OS-RMS₉₀ method*, EURODDYN 2011, Leuven, Belgia.
- Gupta S., Liu W., Degrande G., Hunt H. E. M., Clouteau D., (2007) *A comparison of two numerical models for the prediction of vibrations from underground railway traffic*, Dynamics and Earthquake Engineering, 27 (7) 2007, s. 608-624.
- Gupta S., Liu W., Degrande G., Lombaert G., (2008) *Predition of vibrations induced by underground railway traffic in Beijing*, Journal of Sound and Vibration, 310, 2008, s. 361-370.
- Heckl M., (1987) *Suppressing vibrations from metro trains*. I Railway Gazette International, January 1987, s. 40-42.
- Kawecki J., Masłowski R., (1981) *Obliczanie budowli na wpływy sejsmiczne z uwzględnieniem spektrum odpowiedzi*. Inżynieria i Budownictwo nr 4/81, s. 147-151.
- Kawecki J., Stecz P., Stypuła K., (2011) *O konieczności wykonywania obliczeń symulacyjnych wibroizolacji w torze tramwajowym*, Czasopismo Techniczne, Seria: Budownictwo, z.3-B, Kraków 2011, s. 163-173.
- Kawecki J., Stypuła K., (2008) *Błędy w prognozowaniu i diagnostyce wpływów dynamicznych na budynki*, Czasopismo Techniczne, Seria: Mechanika, z. 1-M, 2008, s. 127-136.
- Kawecki J., Stypuła K., (2007) *Metodyka pomiarowo-interpretacyjna wyznaczania modelu budynku przydatnego w ocenie wpływu drgań parasejsmicznych na ludzi*, Czasopismo Techniczne, seria: Budownictwo, z.2-B, 2007, s. 39-49.
- Kawecki J., Stypuła K., (2008) *Minimalizacja wpływów dynamicznych komunikacji szynowej na budynki i ludzi w budynkach*, Problemy Naukowo-Badawcze Budownictwa, t. VI: Badawczo-Projektowe Zagadnienia w Budownictwie, Wyd. Politechniki Białostockiej, PAN Komitet Inżynierii Lądowej i Wodnej, Białystok 2008, s. 65-74.
- Kawecki J., Stypuła K., (2013) *Zapewnienie komfortu wibracyjnego ludziom w budynkach narażonych na oddziaływania komunikacyjne*. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 2013.
- Kawecki J., Stecz P., Stypuła K. (2003) *Influence of scabbing for acceleration response spectrum of traffic vibrations*. Proceedings of the 2nd International Conference on Dynamics of Civil Engineering and Transport Structures and Wind Engineering "Dyn-Wind 2003", Tale, Slovak Republic 2003, s. 234-237
- Kawecki J., Stecz P., Stypuła K., (2003(2)) *Influence of chosen traffic-road parameters on the shape of the acceleration response spectrum of transport vibration*. Proceedings of the 2nd International Conference on Dynamics of Civil Engineering and Transport Structures and Wind Engineering "Dyn-Wind 2003", Slovak Republic 2003, s. 238-241
- Maciąg E., Tataro T., Abratański A., Chełmecki J. (2004): „*Pomiary dynamiczne w związku z rekalicacją torów pomiarowych systemu monitoringu drgań w tunelach metra i budynkach Al. Niepodległości 118 i 186*”, X Sympozjum: Wpływy Sejsmiczne i Parasejsmiczne na Budowle,

Kraków 14-15 grudnia 2004. Instytut Mechaniki Budowli Politechniki Krakowskiej.

Ma M., Liu W. N., Markine V., Liu W. F., Sun X. J. (2011) , *Measurement of vibrations induced by road traffic and subway trains in laboratory*. EUROODYN 2011, Leuven, Belgia.

Makovička D., (1984) *Dynamicke ucinky pojezdu vlaku metra na obvodovu konstrukciji tunelu*. Inženýrske Stavby 10/1984, s. 508-511.

Makovička D., (1987) *Elastic bearing of building structure over the underground tube*. Int. Conf. on Traffic effects on structure and environment, Czechoslovakia, The High Tatras, 1987, 323-328.

Makovička D., Kral J., (1990) *Dynamicke zatizenizakladovych konstrukciji nove budovanych hotelu v Praze pusobene prvozem metra*. Pozemni Stavby 12/1990, s. 493-498.

Makovička D., (1986) *Použití dynamických filtru pro snížení přenosu vibrací základovou pudou do budov*. Pozemni Stavby 12/1986, s. 561-565.

Makovička D., (1986(2)) *Pružné založení budovy nad tubusem metra*. Pozemni Stavby 12/1986 s. 556-559.

Makovička D., (1989) *Seizmické účinky rážení a provozu metra na okolní konstrukce*. Inženýrske Stavby 5/1989, s. 228-234.

Makovička D., (1991) *Zatížení stavebních konstrukcí seizmickými účinky podpovrchové a povrchové dopravy*. Inženýrske Stavby 9/1991, s. 320-322.

Melke J., (1998) *Noise and vibration from underground railway lines: Proposals for prediction procedure*. Journal of Sound and Vibration 120 (2), 1998 s. 391-406.

Muller G., Fruhe G., Hackenberg M., (2011) *Fundamental solutions in elastodynamics coupled with FEM applied to the dynamic tunnel-soil-building interaction*. EUROODYN 2011, Leuven, Belgia.

Murray T., Davis B., (2011) *Evaluation of Problem Floors Because of Human Induced Vibrations*. EUROODYN 2011, Leuven, Belgia.

Nigham N. C., Jennings P.C., (1969) *Calculation of response spectra from strong – motion earthquake records*. Bull. Seism. Soc. Am. No 2, 59, 1969, s. 909-922.

Piechnik S. (1978)– „Wytrzymałość materiałów dla wydziałów budowlanych”. Wydawnictwo PWN. Warszawa 1978.

PN-85/B-02170 (1985): Ocena wpływu drgań przekazywanych przez podłoże na budynki.

PN-88/B-02171 (1988): Ocena wpływu drgań na ludzi w budynkach.

Rossmann J. i inn., (1962) *Studia i Projekty Metra w Warszawie 1928 – 1958*, Wydawnictwo „ARKADY” Warszawa 1962

Rucker W. F., Said S., (1994) *Einwirkung von U-Bahnerschütterungen auf Gebäude; Anregung, Ausbreitung und Abschirmung. Erschütterungsausbreitung Erschütterungsreduzierung/ Wave Propagation and Reduction of Vibrations*, Chou and Schmidt (eds.), Berg-Verlag, Bochum 1994, s. 59-78.

Stecz P., (2006) *Aparatura pomiarowa w badaniach wpływów parasejsmicznych na budynki i ludzi w nich przebywających*. XI Sympozjum "Wpływy Sejsmiczne i Parasejsmiczne na Budowle", Kraków, 16-17 listopada 2006

Stecz P., (2005) *Zmiany spektrum odpowiedzi w przypadku drgań wywołanych eksploatacją metra*. Zesz. Nauk. Polít. Śląsk. VI Konferencja Naukowa Doktorantów Wydziałów Budownictwa, Nr 1695, Budownictwo z. 104. Gliwice 2005 s. 291-298

Stecz P., Stypuła K. (2012) *Wybrane wyniki badań przenoszenia drgań z tunelu metra na konstrukcję*

- budynku*. Materiały VII Seminarium: Wpływ Hałasu i Drgań Wywołanych Eksploatacją Transportu Szynowego na Budynki i Ludzi w Budynkach - Diagnostyka i zapobieganie - "WIBROSZYN 2012", Kraków 2012, s. 107-120
- Stecz P., Stypuła K., (2004) *Analiza wpływu na budynek drgań poziomych wywołanych w ciągu doby przejazdami pociągów metra*. Czasopismo Techniczne PK 2004, Budownictwo, z.11 Kraków 2004, s. 139-146.
- Stecz P., Stypuła K., (2003) *Dobowy rozkład wpływu na ludzi drgań wywołanych przejazdami pociągów metra - wyniki stałego monitoringu*. X Sympozjum Wpływy Sejsmiczne i Parasejsmiczne na Budowle. Kraków, 2003. s. 171-176.
- Stecz P., Stypuła K., (2011) *Efekty monitoringu drgań komunikacyjnych na przykładzie warszawskiego metra*. Materiały VI Seminarium: wpływ hałasu i drgań wywołanych eksploatacją transportu szynowego na budynki i ludzi w budynkach - diagnostyka i zapobieganie - „WIBROSZYN – 2011” - Kraków 2011 s. 29-40.
- Stecz P., Stypuła K., (2011(2)) *Efekty monitoringu drgań komunikacyjnych na przykładzie warszawskiego metra*. The effects of monitoring of communication vibrations on the example of Warsaw underground. Drogi. Budownictwo infrastrukturalne, nr 3/2011 s. 59-63
- Stecz P., Stypuła K., (2005) *Influence of metro passages velocity on selected building vibrations in the neighborhood of metro tunnel*. 4th International Conference on New Trends in Statics and Dynamics of Buildings. October 20 - 21, 2005 Bratislava 2005, s. 175-176
- Stecz P., Stypuła K., (2010) *Przykłady pomiarów drgań komunikacyjnych w budynkach wykonanych przez akredytowane laboratorium*. V Seminarium „Wpływ hałasu i drgań wywołanych eksploatacją miejskiego transportu szynowego na budynki i ludzi w budynkach - diagnostyka i zapobieganie - „WIBROSZYN – 2010”, Kraków 2010, s. 62-76.
- Stecz P., Stypuła K., (2009) *Some results of vibration monitoring in Warsaw metro*. EVACES'09. Experimental Vibration Analysis for Civil Engineering Structures. Proceedings of the International Conference on Experimental Vibration Analysis for Civil Engineering Structures Wrocław, 2009, s. 281-282.
- Stecz P., Stypuła K., (2004(2)) *Time distribution of vibration amplitudes of the building caused by metro train passages*. 3rd International Conference on New Trends in Statics and Dynamics of Buildings. Conference Proceedings, Bratislava, 2004, s. 163-166.
- Stecz P., Stypuła K., (2009) *Zasady i zasady wykonywania pomiarów drgań budynków pochodzenia komunikacyjnego w celach diagnostycznych i projektowych*. Materiały IV Seminarium: Wpływ hałasu i drgań wywołanych eksploatacją transportu szynowego na budynki i ludzi w budynkach - diagnostyka i zapobieganie - "WIBROSZYN-2009", Kraków 2009 s. 23-31
- Stypuła K. (2001) *Drgania mechaniczne wywołane eksploatacją metra płytkiego i ich wpływ na budynki*, i Zeszyty Naukowe Politechniki Krakowskiej, Inżynieria Lądowa nr 72, Kraków 2001.
- Stypuła K. (2003): „Przypadki przekazywania się z podłoża na budynki drgań od komunikacji miejskiej”. X Sympozjum: Wpływy Sejsmiczne i Parasejsmiczne na Budowle, Kraków 27-28 listopada 2003 r. Instytut Mechaniki Budowli Politechniki Krakowskiej.
- Stypuła K., *Doświadczenia Metra Warszawskiego. Problemy dynamiczne w projektowaniu oraz podczas budowy i eksploatacji*, (2003) Budownictwo Górnicze i Tunelowe, vol. 1, 2003, s. 9-10.
- Stypuła K., *Przykłady doświadczalnej weryfikacji prognozowanych wpływów drgań od transportu szynowego na budynki i ludzi w budynkach*, (2008) Materiały III Seminarium „Wpływy hałasu i drgań wywołanych eksploatacją transportu szynowego na budynki i ludzi w budynkach – diagnostyka i zapobieganie.” WIBROSZYN-2008, Kraków 11-12 września 2008, s. 51-60.

Stypuła K., Kozioł K., Stecz P., (2008) *Inwestycje transportu szynowego w Polsce a problemy ochrony środowiska przed wibracjami*. Konferencja Naukowo-Techniczna: Projektowanie, budowa i utrzymanie infrastruktury w transporcie szynowym, Zakopane 2008, s. 276-291

Tatara T., Kuboń P., (2013), *Prognoza poziomu drgań gruntu w związku z planowaną linią tramwajową w Krakowie*. Inżynieria i Budownictwo nr 12/2013.

Ungar E. E., Wittig L. E., Paolillo A. A., (1979) *Propagation of vibrations and noise from New York subway tunnels into nearby buildings*. The Int. Conf. on Noise Control Engineering Inter-Noise'79, Warszawa 1979, s. 919-922.

Zhang N., Xia H., Yang W., Zhao S., (2011) *Prediction and Control of Building Vibration under Metro Excitations*. EURO-DYN 2011, Leuven, Belgia.

Strony internetowe:

www.metro.waw.pl

www.pcb.com

www.lms.be

<http://teac-ipd.com/>

www.ects.pl