



Alicja Kowalska-Koczwara



WPŁYW DRGAŃ
TRANSPORTOWYCH
NA LUDZI PRZEBYWAJĄCYCH
W BUDYNKACH
W ASPEKTCIE WYBRANYCH KRYTERIÓW
EWALUACYJNYCH

Kraków 2019

PRZEWODNICZĄCY KOLEGIUM REDAKCYJNEGO
WYDAWNICTWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

Tadeusz Tatara

PRZEWODNICZĄCY KOLEGIUM REDAKCYJNEGO
WYDAWNICTW NAUKOWYCH

Józef Gawlik

REDAKTOR SERII

Marek Piekarczyk

REDAKTOR NAUKOWY

Janusz Kawecki

RECENZENCI

Robert Jankowski

Tomasz Lipecki

SEKRETARZ SEKCJI

Marta Wlazło

OPRACOWANIE REDAKCYJNE

Aleksandra Urzędowska

SKŁAD, ŁAMANIE I PROJEKT OKŁADKI

Katarzyna Mstowska

© Copyright by Politechnika Krakowska

© Copyright by Alicja Kowalska-Koczwarą

ISBN 978-83-65991-54-6

Wydawnictwo PK, ul. Skarżyńskiego 1, 31-866 Kraków; tel. 12 628 37 25, fax 12 628 37 60

e-mail: wydawnictwo@pk.edu.pl □ www.wydawnictwo.pk.edu.pl

Adres do korespondencji: ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków

Druk i oprawę wykonano w Dziale Poligrafii Politechniki Krakowskiej.

Ark. wyd. 7,0.

SPIS TREŚCI

Ważniejsze oznaczenia	5
Od autorki	7
1. Wprowadzenie	9
1.1. Cel i zakres pracy	9
1.2. Rozwój i stan wiedzy dotyczący rozpatrywanego problemu	15
2. Metodologia prowadzenia badań w zakresie wpływu drgań na ludzi przebywających w budynkach	35
2.1. Metodologia pomiarowa i ogólny opis przeprowadzonych pomiarów	35
2.2. Wybrane metody oceny wpływu drgań na ludzi w budynkach w kontekście europejskich i światowych normatywów	41
2.2.1. Metoda średniokwadratowa <i>RMS</i>	41
2.2.2. Metoda maksymalnej wartości przejściowej <i>MTVV</i>	47
2.2.3. Metoda dawki wibracji <i>VDV</i>	49
2.2.4. Inne metody	57
3. Wpływ oddziaływania wybranych źródeł drgań transportowych na odczuwalność drgań przez ludzi w budynkach	60
3.1. Analiza wyników pomiarów wykonanych w budynku przy ul. Zamoyskiego	61
3.1.1. Wyniki analizy metodami <i>RMS</i> i <i>MTVV</i>	63
3.1.2. Wyniki analizy metodą <i>VDV</i>	66
3.2. Analiza wyników pomiarów wykonanych w budynku przy ul. Targowej 15.....	68
3.2.1. Wyniki analizy metodami <i>RMS</i> i <i>MTVV</i>	70
3.2.2. Wyniki analizy metodą <i>VDV</i>	72
3.3. Analiza wyników pomiarów wykonanych w budynku przy ul. Targowej 76	75

3.3.1. Wyniki analizy metodami <i>RMS</i> i <i>MTVV</i>	77
3.3.2. Wyniki analizy metodą <i>VDV</i>	79
3.4. Analiza wyników pomiarów wykonanych w budynku przy ul. Targowej 84	81
3.4.1. Wyniki analizy metodami <i>RMS</i> i <i>MTVV</i>	83
3.4.2. Wyniki analizy metodą <i>VDV</i>	84
3.5. Zależność między wskaźnikiem <i>WODL</i> a wartością dawki wibracji <i>VDV</i>	86
4. Wpływ długości czasu trwania drgań na ocenę odczuwalności drgań przez ludzi w budynkach	91
4.1. Wpływ typu przejazdu środka transportu na czas trwania pojedynczych zdarzeń	91
4.2. Wpływ czasu rejestracji na wynik oceny wpływu drgań na ludzi w budynkach	97
4.2.1. Czas rejestracji powyżej 7 minut	98
4.2.2. Czas rejestracji powyżej 15 minut	105
4.2.3. Czas rejestracji powyżej 30 minut	113
5. Wpływ wartości współczynnika szczytu na wynik oceny.....	119
5.1. Wibrogramy o wartości współczynnika szczytu mniejszej niż 6....	122
5.2. Wibrogramy o wartości współczynnika szczytu z przedziału od 6 do 9.....	127
5.3. Wibrogramy o wartości współczynnika szczytu większej niż 9.....	131
6. Wpływ miejsca usytuowania czujnika na wynik oceny wpływu drgań na ludzi w budynkach.....	137
6.1. Wyniki eksperymentu czynnego.....	143
6.2. Wyniki eksperymentu biernego.....	150
7. Zakończenie.....	159
7.1. Podsumowanie.....	159
7.2. Nowe elementy pracy i kierunki dalszych badań.....	162
Literatura.....	165
Streszczenie.....	183
Abstract.....	185
Zusammenfassung.....	187

WAŻNIEJSZE OZNACZENIA

- a – przyspieszenie drgań [m/s^2]
- a_w – przyspieszenie drgań ważone [m/s^2]
- a_{RMS} – wartość skuteczna przyspieszeń drgań [m/s^2]
- a_{WRMS} – wartość skuteczna ważonych przyspieszeń drgań [m/s^2]
- a_{WPEAK} – wartość maksymalnej wartości szczytowej ważonych przyspieszeń drgań [m/s^2]
- a_z – wartość średniokwadratowa przyspieszeń drgań równa progowi odczuwalności drgań przez ludzi w kierunku z w tym samym paśmie częstotliwości co a_{RMS}
- CF – współczynnik szczytu (*crest factor*) [-]
- D – współczynnik tłumienia krytycznego [%]
- f – częstotliwość drgań [Hz]
- f_N – częstotliwość Nyquista [Hz]
- f_S – częstotliwość próbkowania sygnału [Hz]
- n – współczynnik korekcyjny [-]
- RMS – wartość średniokwadratowa (*root mean square*) [m/s^2]
- R – wartość średnia [-]
- T – czas trwania drgań [s]
- τ – czas całkowania [s]

- MTVV* – maksymalna przejściowa wartość drgań
(*maximum transient vibration value*) [m/s^2]
- S_{ed} – statystyczną wartość naprężenia ściskającego
- VG* – wielkość wibracji
- VDV* – dawka wibracji (*vibration dose value*) [$\text{m/s}^{1,75}$]
- Wb* – funkcja wagowa na kierunku z wg BS [11]
- Wd* – funkcja wagowa na kierunkach x i y [11]
- Wk* – funkcja wagowa na kierunku z wg ISO [45]
- Wm* – funkcja wagowa kombinowanym wg ISO [46]
- WODL* – wskaźnik odczuwalności drgań przez ludzi [-]

OD AUTORKI

Prowadzenie prac badawczych i analiz naukowych w zakresie wpływu drgań na ludzi przebywających w budynkach i w sposób bierny odbierających drgania zapoczątkowano w Katedrze Statyki i Dynamiki Budowli Politechniki Krakowskiej w latach 70. ubiegłego wieku. Realizacja badań w zakresie objętym niniejszym opracowaniem była możliwa dzięki wieloletniej pomocy i przychylności ze strony władz Politechniki Krakowskiej. Za tę przychylność dziękuję szczególnie prorektorowi ds. nauki prof. dr. hab. inż. Tadeuszowi Tatarze, dyrektorowi Instytutu Mechaniki Budowli prof. dr. hab. inż. Krzysztofowi Stypule, byłemu dyrektorowi Instytutu prof. dr. hab. inż. Januszowi Kaweckiemu. Dziękuję wielu osobom, z którymi współpracowałam, w szczególności Jarosławowi Chełmeckiemu, Filipowi Pachli, Piotrowi Steczowi, Izabeli Drygale, Małgorzacie Fedorczyk-Cisak.

Prace nad zagadnieniami związanymi z wpływem drgań na ludzi przebywających w budynkach rozpoczęłam w 2008 roku. Realizacja badań naukowych z tego zakresu była głównie prowadzona w ramach projektu „Innowacyjne środki i efektywne

metody poprawy bezpieczeństwa i trwałości obiektów budowlanych i infrastruktury transportowej w strategii zrównoważonego rozwoju”; POIG.01.01.02-10-106/09 – 02.11.2010–30.06.2013. Następnie prace badawcze były kontynuowane w ramach Działalności Statutowej (DS) w latach 2013–2018 oraz w ramach ekspertyz naukowych dotyczących metra warszawskiego, przebudowy torowiska tramwajowego w Krakowie, modernizacji drogi ekspresowej S-7 na odcinku od Warszawy do Czosnowa (lata 2008–2017). Efektem tej wieloletniej pracy było 39 publikacji w indeksowanych czasopismach oraz w materiałach konferencji krajowych i zagranicznych. O wdrożeniu tych rezultatów do praktyki świadczy opracowanie znowelizowanej normy PN-B-02171:2017-06.

Dziękuję też mojej najbliższej rodzinie za wyrozumiałość i wsparcie podczas przygotowywania oraz pisania tej pracy.

Alicja Kowalska-Koczwara

1. WPROWADZENIE

1.1. Cel i zakres pracy

Drgania propagujące się poprzez grunt do budynku mogą nie tylko być szkodliwe dla konstrukcji budynku czy też powodować jego przyspieszone zużycie, ale także mogą wpływać na komfort użytkowania pomieszczeń. Mogą być także uciążliwe dla mieszkańców i użytkowników budynków, a w skrajnych przypadkach mogą prowadzić do zaburzeń snu, bólów głowy i stanów nerwowych [3, 21, 28, 37, 78, 85, 86, 90, 109]. Szczególnie drgania z przedziału niskich częstotliwości od 5 do 25 Hz są niepożądane, ponieważ w tym zakresie częstotliwości mieszczą się częstotliwości rezonansowe organów wewnętrznych człowieka [19, 98]. Wpływ drgań na ludzi przebywających w budynkach, pomimo licznych badań prowadzonych w przeszłości i zapisów normowych w tym zakresie, wciąż jest tematem nie do końca rozpoznanym głównie ze względu na subiektywny charakter odbioru drgań przez różnych ludzi. Świadectwem tego są zmiany, jakie zostały wprowadzone na przestrzeni ostatnich kilkunastu lat w zapisach normowych poszczególnych krajów oraz w normach międzynarodowych ISO [45, 46].

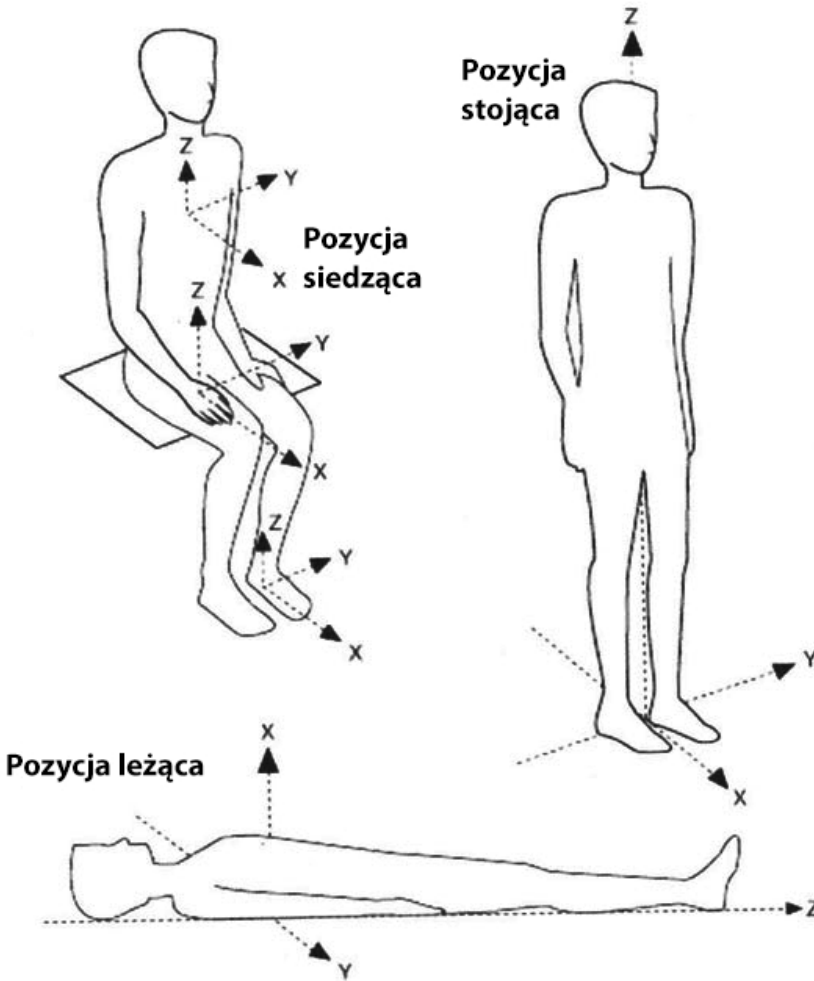
Celem niniejszej pracy jest zbadanie różnych metod oceny wpływu drgań na ludzi przebywających w budynkach pod kątem wybranych zagadnień mogących mieć wpływ na wynik tej oceny. W pracy rozpatrywane są drgania z zewnętrznych źródeł o charakterze parasejsmicznym. Nie analizowano drgań generowanych przez maszyny znajdujące się w pomieszczeniach [6], które generują drgania ciągłe, ale o wyższym zakresie częstotliwości oraz drgań generowanych chodem człowieka [6, 82], które mają większe znaczenie w konstrukcjach wiotkich – typu kładki dla pieszych. Wybrano oddziaływania transportowe ze względu na ich ciągły charakter oraz stosunkowo niski zakres częstotliwości.

Zbadano trzy metody oceny wpływu drgań na ludzi w budynkach, które są obecnie stosowane w literaturze światowej. Analizie poddano tzw. metodę bazową – metodę średniokwadratową *RMS* oraz dwie metody określone w normie ISO [45] jako metody dodatkowe, uzupełniające metodę bazową, tj. metodę dawki wibracji *VDV* oraz metodę maksymalnej przejściowej wartości drgań *MTVV*. Ograniczono się do czterech czynników mogących mieć znaczenie dla wyniku oceny wpływu drgań na ludzi w budynkach. Dwa czynniki związane są z charakterystyką drgań: rodzaj zewnętrznego źródła oraz wartość tzw. współczynnika szczytu. Nie od dziś wiadomo, że rodzaj źródła drgań transportowych ma wpływ na ich odbiór przez człowieka. Drgania generowane przez naziemne źródła są w większym stopniu odczuwalne na wyższych kondygnacjach.

cyjach w przeciwieństwie do drgań generowanych od metra czy kolei podziemnej, których wartość maleje wraz z kolejną kondygnacją naziemną, a największe wartości występują na najniższej kondygnacji [105]. Wśród naziemnych źródeł drgań transportowych należy rozróżnić przejazdy pojazdów po drodze kołowej i szynowej. Charakterystyki tych dwóch źródeł są znacząco różne, przede wszystkim w zakresie częstotliwości propagowanych do budynku. Przejazdy drogą kołową generują drgania w zakresie częstotliwości od 5 do 16 Hz, podczas gdy przejazdy naziemną drogą szynową generują drgania o częstotliwości z przedziału od 20 do 35 Hz. Dwa pozostałe czynniki istotne ze względu na ocenę wpływu drgań na ludzi przebywających w budynkach związane są z metodyką pomiarową: czas trwania drgań oraz wybór miejsca usytuowania czujnika. Wybór czasu trwania drgań determinuje wynik całej oceny i podyktowany jest metodyką analizy sygnału, która jest rozpatrywana w przypadku wpływu drgań na organizm ludzki. W ocenie wpływu drgań na ludzi stosuje się wartość średniokwadratową (w dwóch metodach oceny – *RMS* i *MTVV*), w przeciwieństwie do oceny wpływu drgań na budynki, gdzie parametrem oceny jest wartość maksymalna. Jeśli dłuższy jest zatem czas trwania drgań uwzględniany w analizie, to mniejsza jest wartość średniokwadratowa. Ostatnim wybranym do badań aspektem, który oddziałuje na wynik oceny wpływu drgań na ludzi w budynkach, jest wybór miejsca pomiaru drgań. Wybór tej lokalizacji, niezwykle ważny z punktu wi-

dzenia oceny, często jest źródłem błędów. Warto zauważyć, że wymagania w tym zakresie często są różne. Stąd zbadanie wpływu wyników oceny przy różnych usytuowaniach punktów pomiarowych zaliczone zostało do zagadnień wymagających zbadania.

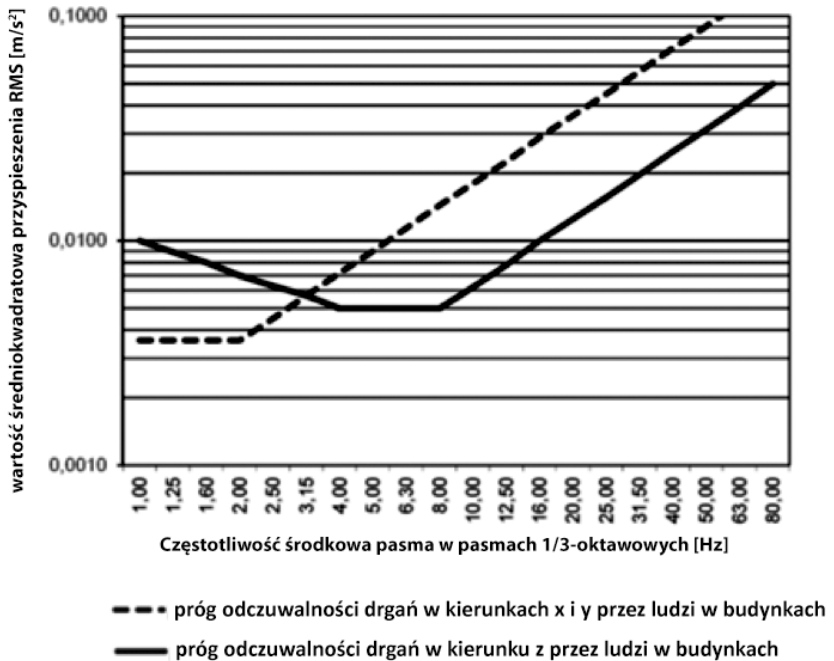
Aspektem łączącym wszystkie metody oceny wpływu drgań na ludzi w budynkach jest odniesienie wyników analiz do ułożenia ciała człowieka znajdującego się w danym pomieszczeniu (Rys. 1.1 za [44]). W ocenie wpływu drgań na ludzi rozpatrywane są trzy pozycje odbioru drgań przez człowieka. W pozycji siedzącej i stojącej człowiek odbiera drgania przez stopy lub powierzchnię siedzenia w taki sposób, że oś z , która biegnie wzdłuż kręgosłupa, jest osią pionową, natomiast osie x (*tył-przód*) i y (*bok do boku*) są osiami poziomymi. W pozycji leżącej cała powierzchnia ciała odbiera drgania w taki sposób, że oś z staje się kierunkiem poziomym, a oś x – pionowym (Rys. 1.1).



Rys. 1.1. Kierunki odbioru drgań przez człowieka [44]

Odczuwalność drgań przez człowieka różni się od kierunku ich działania w taki sposób, że dla częstotliwości poniżej 4 Hz drgania poziome są bardziej odczuwalne niż pionowe, natomiast powyżej tej częstotliwości sytuacja jest przeciwna i to drgania pionowe są bardziej odczuwalne (Rys. 1.2).

Rys. 1.2. Krzywe reprezentujące próg odczuwalności drgań przekazywanych na ludzi w kierunkach x, y i z [44]



Informacje o przeznaczeniu pomieszczenia, pora występowania drgań oraz ich charakter zawarte są w wartości współczynnika korekcyjnego n , przez który należy pomnożyć krzywe progu odczuwalności drgań (Rys. 1.2), aby otrzymać krzywe reprezentujące linie zapewnienia komfortu w danej sytuacji pomiarowej.

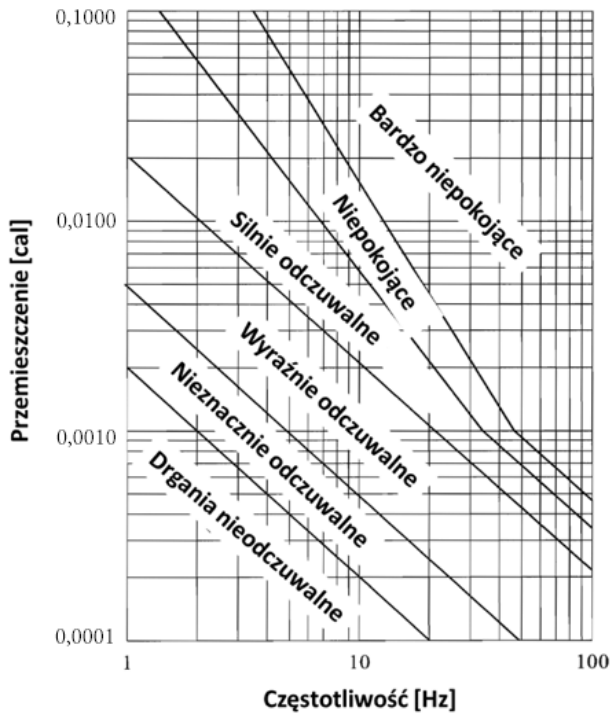
W wyniku analiz przeprowadzonych na wielu obiektach o różnej konstrukcji, lokalizacji czy odległości od źródła drgań, otrzymano informacje, w jakim stopniu poszczególne czynniki wybrane do analizy mogą oddziaływać na wynik oceny wpływu drgań na ludzi, którzy w bierny sposób je odbierają. W niniejszej pracy opisano zbiór dobrych praktyk, który-

mi powinno się kierować w trakcie wykonywania pomiarów. Zbiór ten obejmuje przyjęcie miejsc lokalizacji punktów pomiarowych w budynku, dobór odpowiedniego sprzętu pomiarowego, odpowiednio długi czas rejestracji, określenie zasady analizy sygnału. Trzy metody oceny wybrane do badań zostały przetestowane pod kątem ich praktycznej aplikacji, użyteczności i możliwego zakresu stosowania. Wielu badaczy porównywało wyniki otrzymane za pomocą różnych metod oceny [por. 9, 15, 25, 26, 30, 31, 33, 71, 74, 88, 97, 112]. Badania te dotyczyły głównie drgań ogólnych przeprowadzanych w większości w warunkach laboratoryjnych lub tylko jednego budynku poddanego konkretnemu wymuszeniu. W niniejszej pracy uwzględniono różne typy wymuszeń transportowych, a badania były przeprowadzone na wielu budynkach, co dało możliwość statystycznego ujęcia problemu i wysnucia globalnych wniosków oraz zaproponowania uniwersalnych formuł pomagających w oszacowaniu wstępnym wpływu drgań na ludzi przebywających w budynkach.

1.2. Rozwój i stan wiedzy dotyczący rozpatrywanego problemu

Jedną z najbardziej znanych prac badawczych dotyczących kryteriów wpływu drgań na ludzi przebywających w budynkach jest praca, która powstała w początkach lat 30. XX wieku [99]. Kryteria zaproponowane przez Reihera i Meistersa opiera-

ły się na badaniach doświadczalnych przeprowadzonych na 10 mężczyznach w wieku od 20 do 30 lat poddanych wymuszeniu harmonicznemu przy użyciu stołu wstrząsowego. Uczestnicy testów byli poddawani drganiom w pozycji stojącej przez okres 5 minut. Częstotliwość drgań, podobnie jak amplituda, zmieniały się w poszczególnych eksperymentach: częstotliwość od 5 do 70 Hz, a amplituda od 0,0254 do 1,016 mm. Uczestnicy eksperymentu odpowiadali na pytanie „czy drgania, którym są poddawani” są: nieodczuwalne, lekko odczuwalne, wyraźnie odczuwalne, mocno odczuwalne, przeszkadzające, bardzo przeszkadzające. Wyniki tego eksperymentu doprowadziły do opracowania tzw. skal Reihera–Meistera (Rys. 1.3).



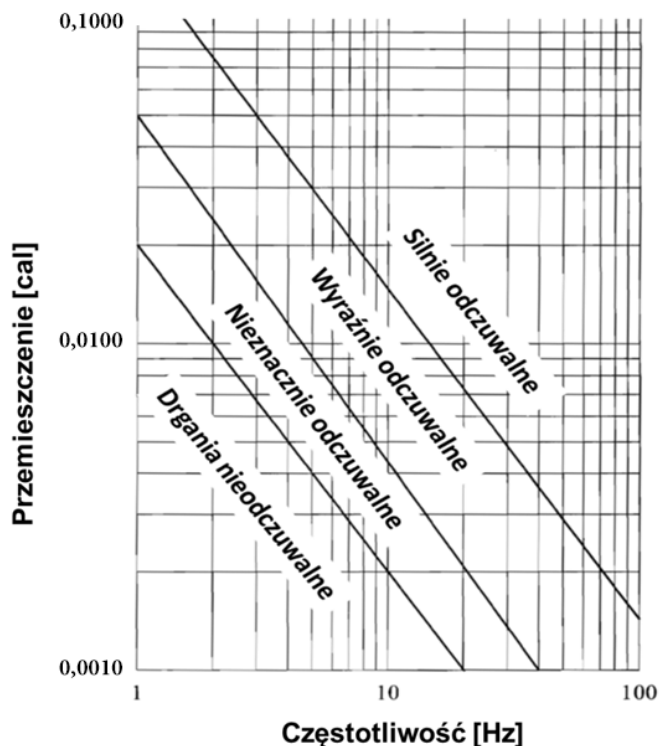
Rys. 1.3. Skale
Reihera–Meistera [99]

W Polsce pionierem w zakresie opracowania wytycznych odnoszących się do wpływu drgań na ludzi przebywających w budynkach, i odbierających w związku z tym drgania w sposób bierny, był prof. Roman Ciesielski, który już w roku 1966 [17] podjął próbę opracowania kryteriów i zasad z tego zakresu w sposób przydatny w budownictwie.

Skale Reihera–Meistera były użyteczne tylko w przypadku drgań ustalonych. Wówczas, znając częstotliwość wymuszenia oraz maksymalną amplitudę przemieszczenia, można wyznaczyć punkt (Rys. 1.3) i w ten sposób oszacować wpływ drgań na ludzi. Niestety drgania propagowane przez grunt do budynku nie mają charakteru ustalonego. Udowodniono [96], że ludzie są mniej wrażliwi na drgania tłumione występujące sporadycznie niż na drgania o ustalonym charakterze o takiej samej wartości maksymalnej amplitudy. Zgodnie z pracą Lenzena [70] jeżeli drgania są tłumione w przeciągu 5 cykli, to człowiek odczuwa początkowy wstrząs. Natomiast jeżeli drgania tłumione trwają 12 cykli i więcej, ich odczuwalność może być porównywalna z drganiami o charakterze ustalonym. W wyniku swoich prac badawczych Lenzen zaproponował znaczącą zmianę skal Reihera–Meistera, przemnażając je o wskaźnik 10 (Rys. 1.4).

Zarówno podstawowe, jak i zmodyfikowane skale Reihera–Meistera były użyteczne w sytuacjach diagnostycznych, natomiast nie można ich wykorzystać przy projektowaniu stropów w budynkach przeznaczonych na stały pobyt ludzi. Lenzen

[70] zauważył, że projektowanie stropów z uwzględnieniem skal Reihera–Meistera bez uwzględnienia właściwości tłumiących tych stropów prowadzi do absurdalnych wartości sztywności.



Rys. 1.4. Zmodyfikowane skale Reihhera-Meistera [70]

Zasugerował on użycie zmodyfikowanych skal Reihhera–Meistera z ograniczeniem sztywności stropów do warunków, w których drgania nie przekroczą poziomu komfortu, a więc ostatniej linii, powyżej której drgania są traktowane jako dokuczliwe. W ten sposób zredukował liczbę poziomów odniesienia do dwóch. Pierwszy poziom to tzw. poziom odczuwalności drgań. Poniżej tego poziomu drgania traktowane są jako

nieodczuwalne. Drugi to poziom komfortu, którego przekroczyć nie można, ponieważ drgania stają się na tyle uciążliwe, że pomieszczenie nie spełnia swojej funkcji użytkowej.

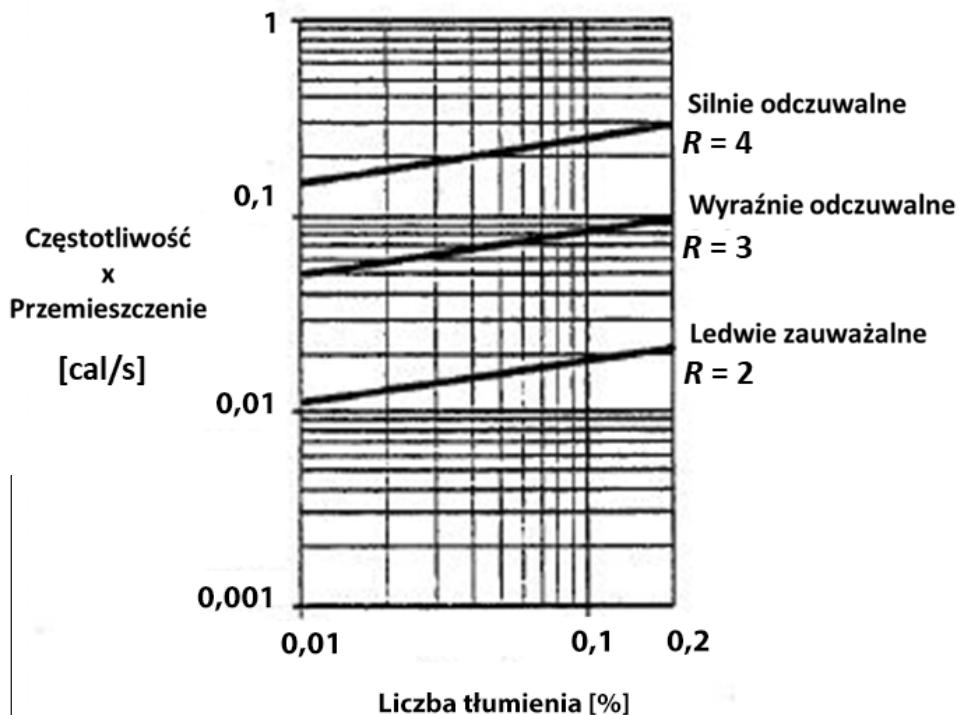
Wiss i Parmelee [114] byli pierwszymi, którzy w sposób doświadczalny zbadali wpływ drgań występujących sporadycznie na ludzi. Ich badania uwzględniały nie tylko częstotliwość i amplitudę drgań, ale także tłumienie. W badaniach brało udział 40 uczestników, którzy podobnie jak w trakcie pomiarów Reihera–Meistera zostali poddani wymuszeniu generowanemu przez stół wstrząsowy. Tym razem były to drgania krótkotrwałe. W kolejnych eksperymentach zmieniały się wartości częstotliwości drgań od 2,5 do 25 Hz, amplitudy drgań od 0,254 do 2,54 mm oraz liczba tłumienia od 1 do 16%. Uczestnicy badań określali odczuwalność drgań w pięciostopniowej skali: od drgań nieodczuwalnych poprzez ledwo odczuwalne, wyraźnie odczuwalne, mocno odczuwalne aż po dotkliwe. Na podstawie badań oraz opracowań statystycznych zaproponowano wzór, za pomocą którego możliwe było wyznaczenie odczuwalności drgań przez ludzi przebywających na konkretnym stopniu poddanym wymuszeniu krótkotrwałemu o znanej częstotliwości i amplitudzie. Wartość średnią reakcji R można wyznaczyć ze wzoru:

$$R = 5,08 \left[\frac{f A_0}{D^{0,217}} \right]^{0,265} \quad (1.1)$$

gdzie:

A_0 – wartość maksymalnej amplitudy przemieszczeń.

Wyznaczona wartość średnia odczuwalności drgań przez ludzi była następnie porównywana ze skalami, które zaproponowali Wiss i Parmelee [114]. W skalach tych występują 4 poziomy wartości średniej R : $R = 1$ drgania nieodczuwalne, $R = 2$ drgania ledwo odczuwalne, $R = 3$ drgania wyraźnie odczuwalne, $R = 4$ drgania silnie odczuwalne (Rys. 1.5).

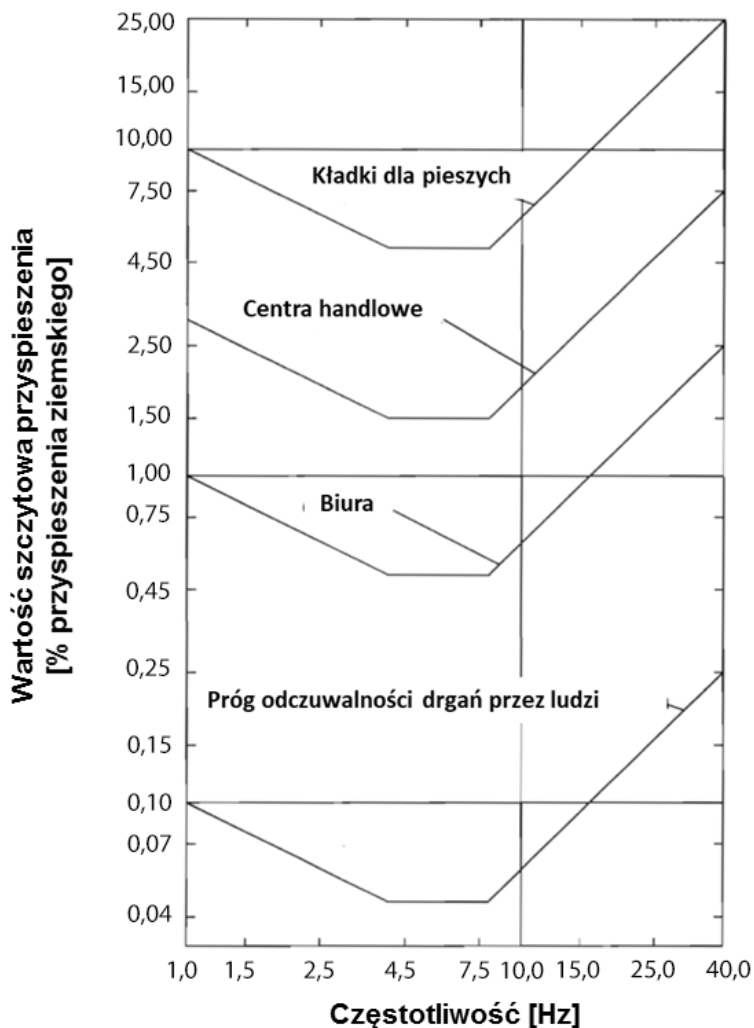


Rys. 1.5. Skale odczuwalności drgań zaproponowane przez Wiss i Parmelee [114]

W 1974 roku pojawiła się pierwsza edycja normy ISO [42], która podsumowała dotychczasowe badania wpływu drgań mechanicznych na ludzi prowadzone do 1974 roku. Zakres zastosowania normy ograniczał się do sytuacji diagnostycznych [20]. Wynikało to z braku jasnych kryteriów projektowych dotyczących różnych typów konstrukcji.

Niedoskonałość wytycznych zawartych w pierwszej edycji normy ISO dotyczącej wpływu drgań na ludzi zauważył Irwin w 1978 roku [50]. Na podstawie pracy Irwina [50] oraz wielu innych, m.in. McCormicka [76], który zaproponował kryteria oceny wpływu drgań na ludzi w budynkach biurowych, Murraya [81], który zaproponował kryteria projektowe dla pomieszczeń biurowych i mieszkalnych, powstała nowa edycja normy ISO [43], opublikowana w roku 1985. Normy napisano w celu ujednoczenia kryteriów oceny wpływu drgań na ludzi z uwzględnieniem rodzaju budowli, częstości występowania drgań, a w przypadku budynków z uwzględnieniem pory nocnej i dziennej. Norma przedstawiała wartości progowe przyspieszeń drgań jako funkcji czasu narażenia na drgania i częstotliwości w odniesieniu do drgań pionowych i poziomych, dla osób w pozycji siedzącej, stojącej i leżącej. Wartości progowe związane z granicą komfortu są w normie [43] przedstawione za pomocą wartości średniokwadratowych (*RMS*) jako wielokrotność krzywej bazowej zwanej progiem odczuwalności drgań przez ludzi. W przypadku pomieszczeń biurowych norma ISO zaleca mnożnik równy 4 dla drgań o charakterze

ciągłym oraz mnożniki od 60 do 180 dla drgań sporadycznych, przy czym wyższą wartość mnożnika można stosować w przypadku drgań zapowiadanych (Rys. 1.6).



Rys. 1.6. Wartości progowe wpływu drgań na ludzi wzdłuż osi z odnoszące się do miejsc ich przebywania [43]

W 1989 roku opublikowano natomiast normę ISO dotyczącą wpływu drgań na ludzi w budynkach [44], która stanowiła uzupełnienie normy [43]. Precyzowała ona wartości progowe zapewnienia komfortu w odniesieniu do takich pomieszczeń jak sale operacyjne, sale chorych, warsztaty pracy i oczywiście pomieszczenia biurowe czy mieszkalne. W międzyczasie, na bazie normy [43] i w wyniku prac prowadzonych w Instytucie Mechaniki Budowli Politechniki Krakowskiej pod kierownictwem Romana Ciesielskiego, w roku 1988 opublikowano w Polsce normę [94], która podobnie jak norma [44] odnosiła się do wpływu drgań na ludzi przebywających w budynkach.

Druga edycja normy ISO [44] okazała się być bardzo użyteczna, a zawarte w niej wytyczne do dziś stanowią podstawę wielu normatywów krajowych. Nie oznacza to jednak, że prace badawcze związane z odczuwalnością drgań przez ludzi przebywających w budynkach ustały. Od końca lat 80. ubiegłego wieku pojawiło się kilka nowych trendów w tej dziedzinie.

Zakres częstotliwości, w którym wpływ drgań na ludzi jest rozpatrywany w normatywach międzynarodowych i krajowych obejmuje przedział od 1 do 80 Hz. Jednakże budowa coraz wyższych budynków, a przede wszystkim coraz smuklejszych, o relatywnie małych wymiarach w rzucie i dużej wysokości, tzw. budynków „ołówkowych”, wymusiła konieczność rozpatrywania wpływu drgania częstotliwości poniżej 1 Hz. I tak w normie japońskiej [2] rozpatrywany jest wpływ drgań na ludzi w przedziale od 0,1 do 6 Hz. Już w latach 80. XX w.

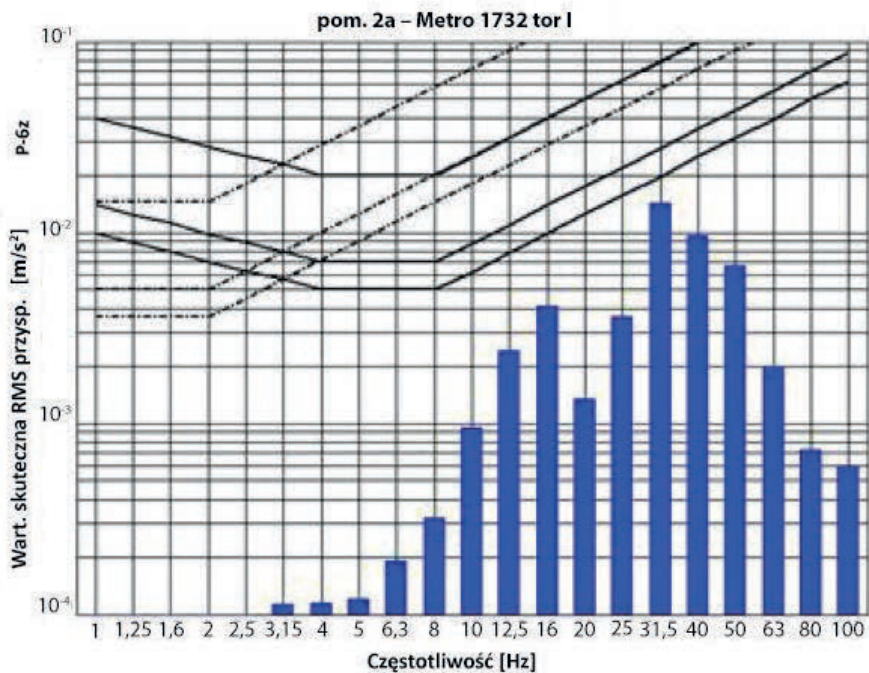
powstała także norma ISO [47] odnosząca się do zakresu niższych częstotliwości z przedziału od 0,1 do 1 Hz. Porównanie zapisów normowych zawartych w [2, 47] w stosunku do wytycznych zawartych w [44] zostało zaprezentowane w formie wykresu w [57].

Ważnym aspektem badawczym, który pojawił się w ostatnich kilkunastu latach, jest czas narażenia człowieka na drgania. Zauważono bowiem, że nie tylko intensywność drgań, ale także sumaryczny czas narażenia może mieć wpływ na ich odczuwalność przez ludzi. Metoda *RMS* zawarta w normach [43, 44, 94] tylko częściowo, poprzez współczynnik n , uwzględnia czas narażenia na drgania poprzez rozgraniczenie typu drgań na występujące sporadycznie (nie częściej niż 10 razy na dobę) oraz drgania o charakterze ciągłym lub drgania krótkotrwałe, ale występujące częściej niż 10 razy na dobę. Współczynnik n dla drgań ciągłych i krótkotrwałych występujących częściej niż 10 razy w ciągu doby ma wartość znacząco wyższą od analogicznych dla drgań występujących sporadycznie. Oznacza to, że próg komfortu dla drgań ciągłych znajduje się niżej niż dla drgań o charakterze sporadycznym. Poprzez współczynnik n nie można jednak w pełni oddać rzeczywistego czasu narażenia na drgania. Dlatego już od lat 80. trwały prace badawcze nad metodą oceny, która uwzględniałaby czas narażenia na drgania. Do rozwoju metody zwanej dawką wibracji przyczynili się głównie Griffin i Howarth [30–32, 35–39]. Dawka wibracji, *VDV*, nie ma interpretacji fizycznej jak

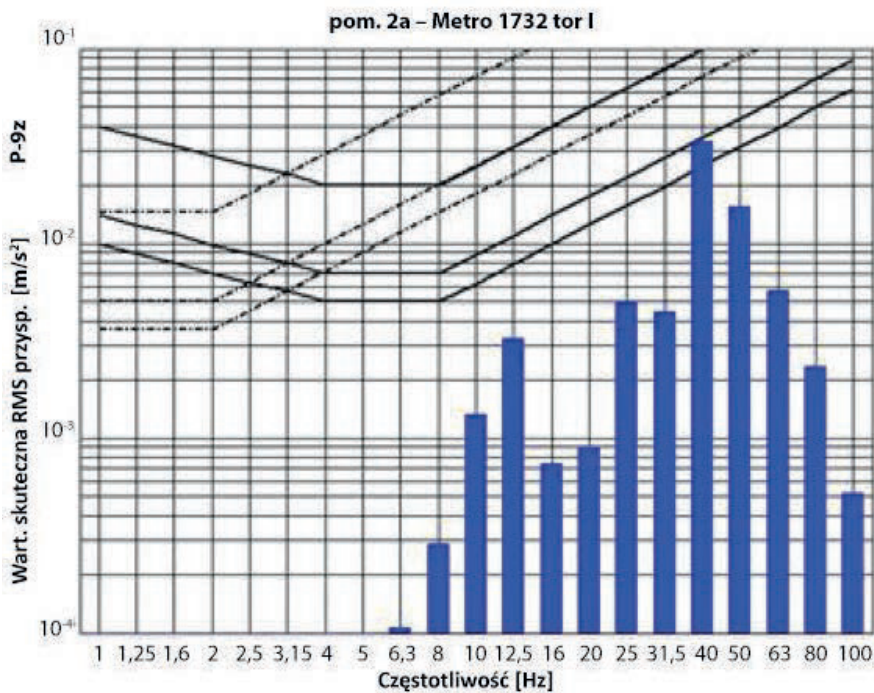
metoda *RMS*. Metoda *RMS* umożliwia bowiem ocenę energii drgań [31]. Metoda *VDV* opisuje wartość ekspozycji na drgania i przez to podobna jest do metody badania poziomu ekspozycji na dźwięk, czyli energii dźwięku. Metodę dawki wibracji *VDV* wprowadzono najpierw do normy brytyjskiej z 1992 roku [10], gdzie zalecono jej stosowanie na równi z metodą *RMS*. Następnie została ujęta w wytycznych znowelizowanej w 1997 roku normy ISO [45], gdzie traktowana jest jako metoda dodatkowa uzupełniająca ocenę przeprowadzaną przy pomocy metody *RMS*, szczególnie w przypadku przebiegów drgań o charakterze impulsowym lub przebiegów, w których wartość tzw. współczynnika szczytu jest wyższa od wartości 9. W roku 2008 znowelizowano normę brytyjską [11]. W niej dawka wibracji *VDV* uznana została za jedyną metodę, która powinna być stosowana do oceny wpływu drgań na ludzi w budynkach. W normie [11] podano także sposoby przejścia z wartości otrzymanych przy pomocy metody *RMS* na wartości metodą *VDV*. W polskiej normie, którą znowelizowano w 2017 roku [95], wprowadzono metodę dawki wibracji, którą zalecono jako metodę służącą do szybkiej diagnostyki określania prawdopodobieństwa pojawienia się skarg ze strony użytkowników budynków. Obszerniej metoda dawki wibracji została opisana w rozdziale 2 niniejszej pracy.

Kolejnym dość istotnym aspektem odnoszącym się od odczuwalności drgań przez ludzi przebywających w budynkach

jest wpływ rodzaju źródła drgań na ich percepcję przez człowieka. W pracy [60] zbadano wpływ drgań pochodzących od ruchu tramwajowego i od przejazdów pociągów metra. Pomiarzy przeprowadzono w budynku czterokondygnacyjnym o konstrukcji tradycyjnej murowanej, znajdującym się w odległości 25 m od osi tunelu metra i w odległości 9 m od toru tramwajowego. W wyniku analiz przeprowadzonych zgodnie z procedurą *RMS* zawartą w [94] uzyskano bardzo ciekawe rezultaty pomiarów. Drgania wywołane przejazdami tramwajów były najbardziej odczuwalne na kondygnacji najwyższej. Wpływ drgań generowanych przejazdami pociągów metra przedstawiał się odmiennie, tzn. drgania były odczuwalne najbardziej na najniższej kondygnacji i to w stopniu, który powodował przekroczenie progu ich odczuwalności (Rys. 1.7 i Rys. 1.8 za [60]). Linie ciągłe zamieszczone się na Rys. 1.7 i Rys. 1.8 związane są z odczuwalnością drgań w kierunku z , natomiast linie przerywane z odczuwalnością drgań w kierunkach x i y . Najniżej położone odpowiadają progowi odczuwalności drgań przez ludzi. Kolejne, równoległe do najniżej położonych, odpowiadają górnej granicy zapewnienia komfortu wibracyjnego w różnych warunkach przebywania ludzi. Szczegółowo opisano je w rozdziale 2.

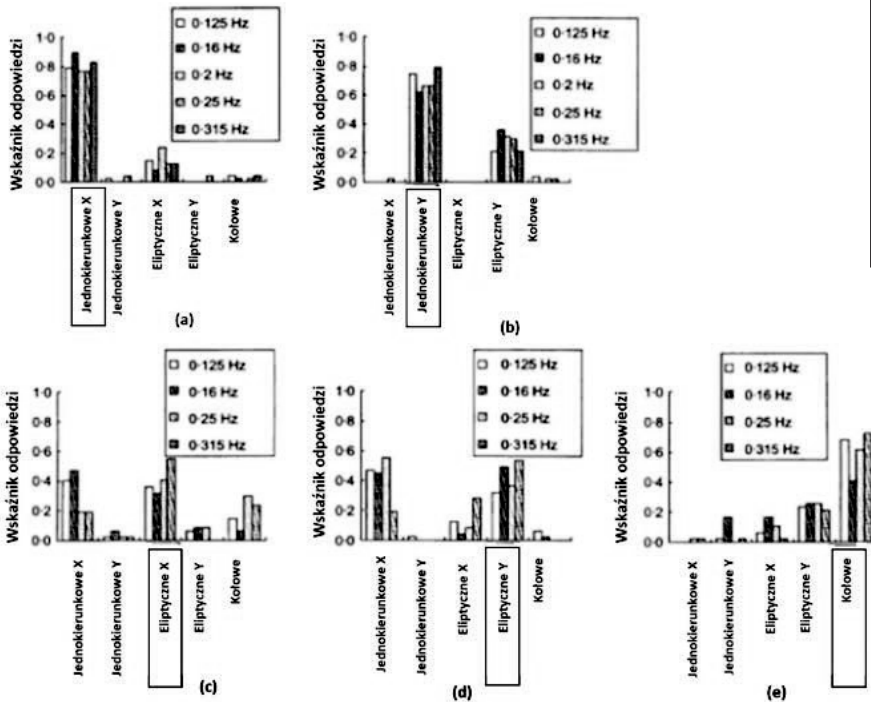


Rys. 1.7. Analiza wpływu na ludzi drgań pionowych na 1 piętrze budynku, przejazd metra [60]



Rys. 1.8. Analiza wpływu na ludzi drgań pionowych na 3 piętrze budynku, przejazd metra [60]

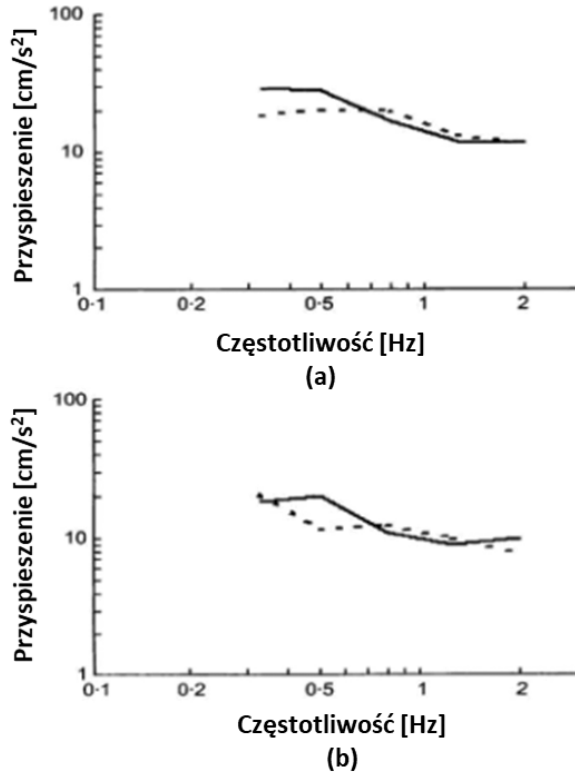
W 2006 roku została opublikowana praca Tamury [107], w której ponownie sięgnięto do badań eksperymentalnych przeprowadzonych z udziałem ludzi. Celem badań było sprawdzenie, czy istnieją zależności między odczuwalnością drgań przez ludzi a kierunkiem drgań oraz między odczuwalnością drgań a ich rodzajem (harmoniczne, losowe). Stanowisko laboratoryjne stanowiło pomieszczenie o wymiarach typowego pokoju, które umieszczono na stole wstrząsowym. Wszystkie otwory okienne w pomieszczeniu testowym były zasłonięte, tak aby ruch nie był widoczny dla uczestników eksperymentu. Dodatkowo pomieszczenie było izolowane akustycznie. Uczestnicy eksperymentu byli w pozycji siedzącej poddawani drganiom poziomym o częstotliwościach z przedziału od 0,125 Hz do 6 Hz. Pierwszy eksperyment polegał na poddaniu uczestników drganiom: jednokierunkowym (*przód-tył* lub *bok do boku*), kołowym i o kształcie eliptycznym. Zadaniem uczestników eksperymentu była identyfikacja wymuszanego kształtu ruchu. Okazało się, że uczestnicy prawie bezbłędnie identyfikują drgania występujące w jednej osi oraz drgania po trajektorii kołowej, natomiast drgania po trajektorii eliptycznej nie były tak dobrze rozpoznawane (Rys. 1.9).



Rys. 1.9. Wyniki eksperymentu dotyczącego identyfikacji formy drgań przez ludzi przebywających w pomieszczeniu [107]

Równie interesujące wyniki uzyskano w trakcie eksperymentu odnoszącego się do odczuwalności drgań o charakterze losowym i harmonicznym. Tym razem generowano drgania z przedziału częstotliwości od 0,3 do 2 Hz. Okazało się, że w przedziale częstotliwości od 0,3 do 0,6 Hz drgania o charakterze harmonicznym są odczuwalne przy mniejszej amplitudzie niż drgania o charakterze losowym (Rys. 1.10).

Rys. 1.10. Wyniki eksperymentu dotyczącego odczuwalności drgań o charakterze losowym (linia ciągła) i harmonicznym (linia przerywana) [107]



Uzyskane wyniki oznaczają, że próg odczuwalności drgań o charakterze harmonicznym w rozważanym przedziale częstotliwości znajduje się poniżej progu odczuwalności drgań o charakterze losowym.

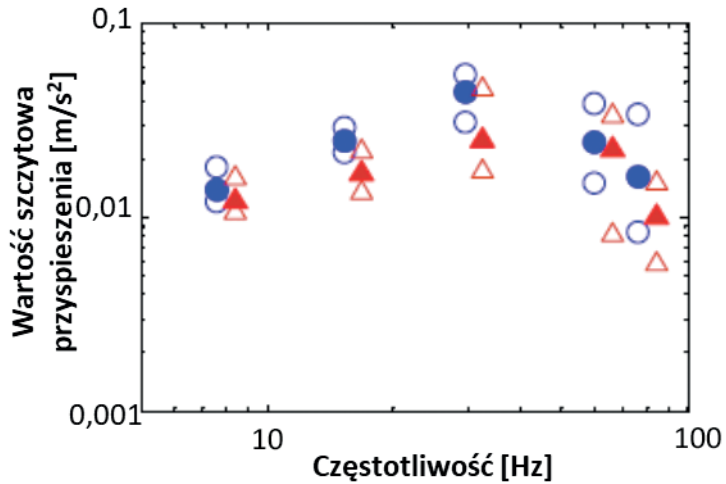
Podobne pomiary wykonał zespół pod kierownictwem Matsumoto [75]. Różnicą było użycie testowego budynku zamiast pomiarów w laboratorium (Rys. 1.11).

Rys. 1.11. Testowy budynek oraz uczestnicy w trakcie eksperymentu [75]

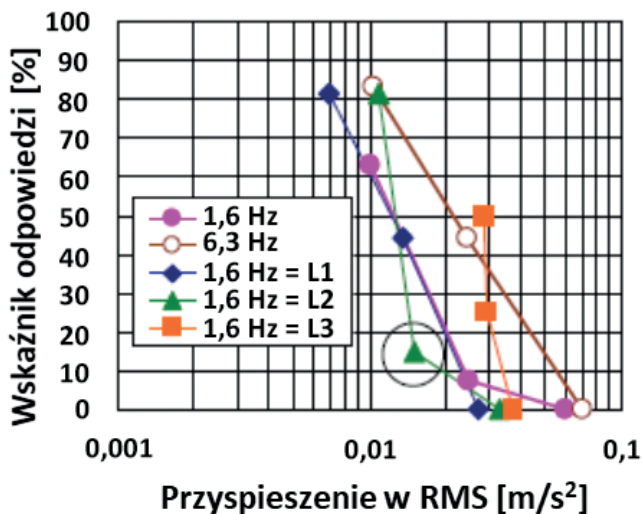


Podobnie jak w przypadku badań Tamury posłużono się mechanicznym wzbudnikiem drgań i starano się określić próg odczuwalności drgań przez ludzi w zależności od rodzaju drgań (ciągłe lub chwilowe) oraz pozycji ciała badanego człowieka. Wyniki dowodzą, że dla osoby znajdującej się w pozycji leżącej bardziej odczuwalne są drgania o charakterze ciągłym trwające min. 5 s niż wstrząsy jednosekundowe o tej samej wartości szczytowej drgań (Rys. 1.12).

Rys. 1.12. Prógi odczuwalności drgań przez osobę leżącą w zależności od charakteru drgań:
 ▲ – ciągłe (wartość średnia), Δ – ciągłe (wartości skrajne), ● – chwilowe (wartość średnia), ○ – chwilowe (wartości skrajne) [75]

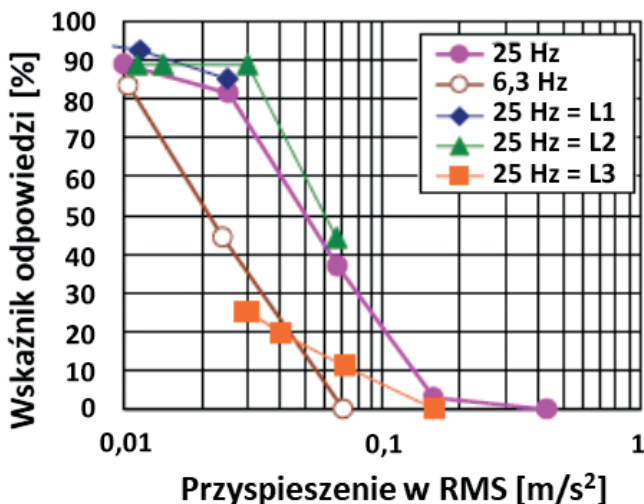


Zespół kierowany przez Matsumoto [75] przeprowadził także badania wpływu drgań z dwoma częstotliwościami na ich odbiór przez ludzi znajdujących się w testowym budynku. Jedną składową częstotliwości wymuszenia była zawsze taka sama i wynosiła 6,3 Hz, podczas gdy druga składowa zmieniała się i wynosiła: 0,4, 1,6 lub 25 Hz. Zmienna była także amplituda drgań w trzech dodatkowych składowych: 0,0063, 0,016, 0,040, 0,10, 0,25 lub 0,63 m/s². Wyniki wskazują, że zawarte w normie ISO [44] progi odczuwalności dobrze odwzorowują rzeczywistą odczuwalność drgań przez ludzi znajdujących się w pozycji leżącej. Wyjątek stanowiły dwa wymuszenia: dodatkowy komponent o częstotliwości 1,6 Hz z wartością amplitudy 0,016 m/s² (Rys. 1.13) oraz dodatkowy komponent 25 Hz z wartością amplitudy 0,04 m/s² (Rys. 1.14). Według autorów eksperymentu wyjątki te wymagają dalszych badań.



Rys. 1.13. Zależność pomiędzy wartością RMS przyspieszeń drgań a odczuwalnością drgań przez ludzi dla częstotliwości 6,3 Hz przy jednoczesnym wymuszeniu częstotliwości 1,6 Hz z wartościami amplitud:

L1 – 0,0063 m/s²,
L2 – 0,016 m/s²,
L3 – 0,04 m/s² [75]



Rys. 1.14. Zależność pomiędzy wartością RMS przyspieszeń drgań a odczuwalnością przez ludzi drgań o częstotliwości 6,3 Hz przy jednoczesnym wymuszeniu częstotliwości 25 Hz z wartościami amplitud:

L1 – 0,0063 m/s²,
L2 – 0,016 m/s²,
L3 – 0,04 m/s² [75]

Zagadnienie wpływu drgań na ludzi przebywających w budynkach nabiera nowego znaczenia we współczesnych warunkach. W coraz bardziej zaludnionych centrach miast ludzie poddawani są wielu wymuszeniom dynamicznym, a ich ocze-

kiwania odnoszące się do komfortu użytkowania pomieszczeń nie dotyczą już tylko komfortu termicznego czy akustycznego, ale także wibracyjnego [8, 29, 52, 59, 60, 61, 115]. Obecne prace badawcze koncentrują się na doprecyzowaniu wymagań normowych w zakresie częstotliwości niższych niż 1 Hz [13, 14, 55, 67, 77, 84, 117] i bardziej precyzyjnego ujęcia wpływu drgań o charakterze impulsowym [5, 12, 49, 113, 118]. W ostatnich latach pojawia się także tendencja do wspólnego ujmowania zagadnień związanych z narażeniem ludzi na hałas i na drgania [24, 27, 35, 37, 40, 64, 90, 100, 119], co ma swoje odzwierciedlenie m.in. w zapisach normy ISO z 2003 roku [46].

2. METODOLOGIA PROWADZENIA BADAŃ W ZAKRESIE WPŁYWU DRGAŃ NA LUDZI PRZEBYWAJĄCYCH W BUDYNKACH

2.1. Metodyka pomiarowa i ogólny opis przeprowadzonych pomiarów

Niniejsza praca ma charakter doświadczalny i jest syntezą wyników pomiarów przeprowadzonych w latach 2008–2018 na obiektach rzeczywistych. Badania realizowano m.in. w ramach grantu POIG.01.01.02-10-106/09, a ich celem była nowelizacja polskiej normy [95]. Wymagało to przygotowania odpowiedniej metodyki pomiarowo-interpretacyjnej.

Podstawowe informacje umożliwiające przeprowadzenie niezbędnych analiz były zbierane głównie w trakcie trzech grup prac badawczych:

- prace związane z oceną wpływu drgań na ludzi w budynkach znajdujących się w strefie oddziaływań I linii metra warszawskiego – analiza wpływu oddziaływania różnych źródeł transportowych na odczuwalność drgań,

- prace związane z oceną wpływu drgań na ludzi w budynkach od tzw. tła dynamicznego przed modernizacją torów tramwajowych przy ul. Mogilskiej w Krakowie – analiza wpływu czasu trwania drgań na ich odczuwalność przez ludzi,
- całodobowy monitoring wpływu drgań transportowych na ludzi w budynku MLBE zlokalizowanym w bezpośrednim sąsiedztwie drogi kołowej – analiza wpływu wartości współczynnika szczytu oraz lokalizacji czujnika pomiarowego na wynik oceny wpływu drgań na ludzi przebywających w budynkach.

W znowelizowanej normie [95] zawarto wytyczne odnoszące się do prawidłowego wykonywania i analizy pomiarów wpływu drgań na ludzi w budynkach. Zalecenia dotyczą zarówno wymagań sprzętowych, jak i doboru punktów pomiarowych oraz samej analizy zarejestrowanego sygnału.

Budynki, które zostały wybrane do analizy, znajdowały się w zasięgu tzw. strefy oddziaływań dynamicznych (Tab. 2.1).

Tabela 2.1

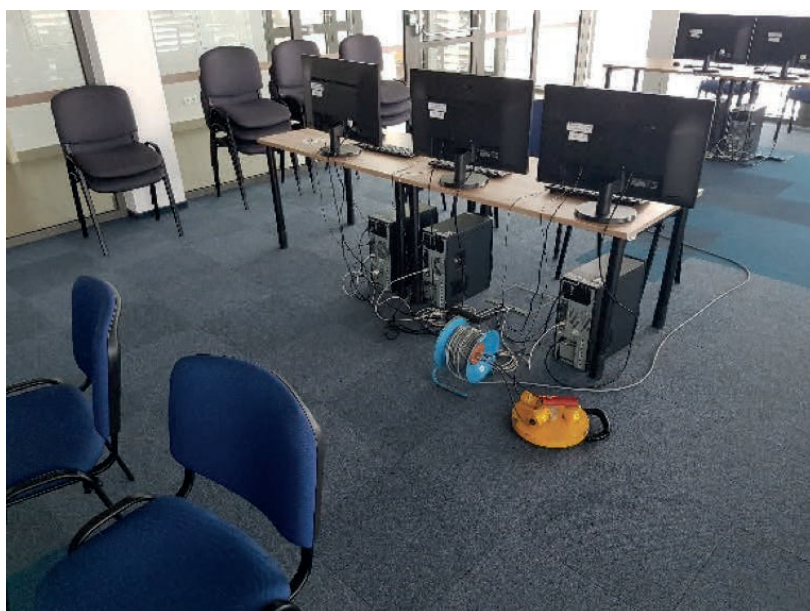
Zasięg strefy wpływów dynamicznych

Źródło drgań	Zasięg strefy [m]
Droga kolejowa	25–50
Tramwaj, droga kołowa	15–25
Linia płytkiego metra	40

W zakresie wyznaczania zasięgu oddziaływania drogi kolejowej w ostatnich latach powstało interesujące opracowanie na podstawie badań eksperymentalnych, które postuluje rozszerzenie zasięgu tej strefy z uwagi na odczuwalność drgań przez ludzi do 60 m dla pociągów pasażerskich, a w przypadku pociągów towarowych nawet do 100 m [87].

Niezwykle ważnym aspektem pomiarów wpływu drgań na ludzi w budynkach jest wybór lokalizacji punktów pomiarowych. W tym zakresie w zapisach normowych różnych krajów występują pewne różnice. Zgodnie z normą ISO [46] pomiary drgań przekazywane na ciało człowieka powinny być mierzone na powierzchni między ciałem a tą powierzchnią. Jest to zapis nieprecyzyjny. Natomiast w normie ISO [45] w odniesieniu do doboru punktu pomiarowego wymaga się, aby pomiar drgań przekazywanych na ciało człowieka przeprowadzać w środku sztywnych powierzchni. Ten bardziej precyzyjny zapis spowodowany jest zakresem stosowania normy ISO [45], która zawiera wymagania głównie odnoszące się do drgań o oddziaływaniu ogólnym. Brytyjska norma [11] w tym zakresie jest dużo bardziej łagodna. Też wskazuje środek pomieszczenia przeznaczonego na stały pobyt ludzi, ale zasięg strefy, w której można wykonywać pomiary wpływu drgań na ludzi, wynosi od 1/3 do 2/3 długości/szerokości stropu. Pomiary wykonane w ramach badań ujętych w niniejszej pracy przeprowadzono zgodnie z normą polską [95]. Punkty pomiarowe były zlokalizowane co najmniej w jednym pomieszczeniu na najwyższej

kondygnacji, znajdującym się możliwie najbliżej wymuszenia. Wyjaśnienia wymaga przyjmowanie punktu pomiarowego na stropie najwyższej kondygnacji wobec dysponowania informacjami o tym, iż przy drganiach generowanych przejazdami pociągów metra największy poziom drgań występuje na stropach najniższych kondygnacji. W badaniach przeprowadzonych w związku z tematem objętym niniejszym opracowaniem celem nie było wykonanie diagnozy, ale badanie wzajemnych relacji między parametrami oceny. Punkt pomiarowy był zlokalizowany w geometrycznym środku pomieszczenia (Rys. 2.1), o ile nie istniały przesłanki do jego innej lokalizacji (np. przy nietypowym układzie konstrukcyjnym stropu).



Rys. 2.1. Lokalizacja punktu do pomiarów wpływu drgań na ludzi w budynkach w centralnym punkcie pomieszczenia; na dysku pomiarowym umieszczono trzy akcelerometry (kolor żółty)

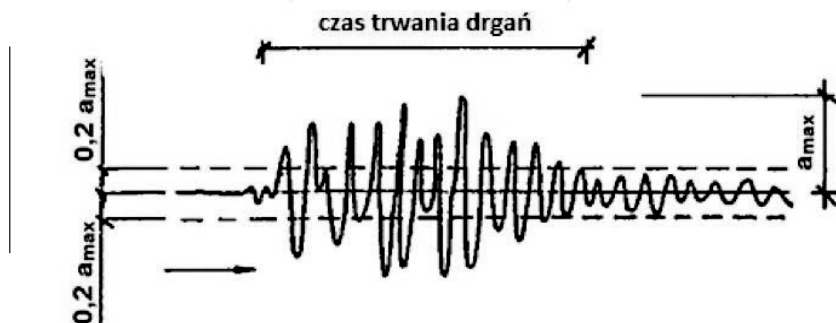
(fot. A. Kowalska-Koczwara)

W trakcie pomiarów rejestrowano przyspieszenia drgań, co związane było z łatwością oceny wpływu drgań na ludzi za pomocą tego parametru. W trakcie przeprowadzonych pomiarów istotne były urządzenia, które powinny umożliwiać prawidłową rejestrację sygnału już od 1 Hz, a nawet poniżej tej wartości. Pomiar, pomimo iż w większości przypadków kierunku pionowy odgrywa decydującą rolę, powinien odbywać się jednocześnie w trzech ortogonalnych kierunkach: kierunek X przyjmowany jest we wszystkich pomiarach prostopadle do wymuszenia, kierunek Y równoległe, a kierunek Z to kierunek pionowy.

Zgodnie z normą [95] rekomendowane jest użycie dysku pomiarowego, który powinien mieć masę co najmniej 30 kg oraz średnicę 30 cm [95] (Rys. 2.1).

Rejestracja sygnału powinna umożliwiać rejestrację częstotliwości z zakresu od 1 do 120 Hz, tak aby po zastosowaniu filtru dolnoprzepustowego częstotliwości do 80 Hz mogły być uwzględnione w ocenie.

Odrębnym problemem jest określenie czasu trwania drgań. W normie [95] przyjęto, że czas trwania drgań wyznacza przedział, w którym wartość amplitud przyspieszeń drgań nie spada poniżej 0,2 wartości amplitudy maksymalnej w zarejestrowanym przebiegu (Rys. 2.2).



Rys. 2.2. Czas trwania drgań wg [95] za [58]

Norma ISO [45] stosowana głównie do pomiaru drgań o charakterze ogólnym wymaga, aby czas rejestracji sygnału wynosił co najmniej 30 minut. W normie [46] znajduje się zapis odnoszący się do czasu trwania drgań, który mówi o tym, że zarejestrowany sygnał powinien wystarczyć do zapewnienia racjonalnej dokładności statystycznej. Ta definicja jest bardzo szeroka i nieprecyzyjna, podczas gdy czas trwania drgań ma znaczący wpływ na wyniki analizy sygnału, szczególnie odnoszące się do szeroko używanej i polecanej w pracy [46] metody RMS. W niemieckiej normie [23] analiza odbywa się w cyklach trwających po 30 s, a następnie dane z cykli są uśredniane. Pomiaru opisane w niniejszym opracowaniu były wykonywane zgodnie z normą [95], ale w przypadku badania wpływu czasu trwania drgań na wynik oceny oddziaływania na ludzi w budynkach posłużono się sygnałami ciągłymi o dłuższym czasie trwania.

Ostatnim problemem związanym z analizą danych pomiarowych jest częstotliwość próbkowania zarejestrowanego sygnału, która zgodnie z kryterium Nyquista [41] powinna

odpowiadać zasadzie, że najwyższa częstotliwość zarejestrowana w sygnale (f_N) jest połową częstotliwości próbkowania (f_S) (wzór 2.1.).

$$f_N = \frac{f_S}{2} \quad (2.1)$$

Oznacza to, że przy częstotliwości odcięcia $f_N = 120$ Hz, częstotliwość próbkowania powinna wynosić min. $f_S = 240$ Hz. W praktyce to minimum ustala się na poziomie 2,5-krotności najwyższej zarejestrowanej częstotliwości, czyli w przypadku wpływu drgań na ludzi częstotliwość próbkowania powinna wynosić min. 300 Hz. Oczywiście im wyższa wartość f_S , tym lepsza jakość wyników, dlatego w opisanych w niniejszej pracy analizach sygnału posłużono się częstotliwością równą 1024 Hz. Pomocne i wciąż aktualne wytyczne w zakresie analizy sygnału zawarte są w [7].

2.2. Wybrane metody oceny wpływu drgań na ludzi w budynkach w kontekście europejskich i światowych normatywów

2.2.1. METODA ŚREDNIOKWADRATOWA *RMS*

Metoda średniokwadratowa *RMS* wprowadzona już do pierwszej edycji normy ISO ma swoją interpretację fizyczną, którą jest energia drgań. Wartość średniokwadratowa dobrze opisuje

drżania, ponieważ zawiera informacje o wartościach *RMS* składowych drgań w całym przedziale rozpatrywanych częstotliwości. Ilustrację wartości średniokwadratowej drgań o charakterze harmonicznym i losowym pokazano na Rys. 2.3 za [9].

Wartość skuteczna, a_{RMS} , przyspieszenia drgań, $a(t)$, określana jest wzorem:

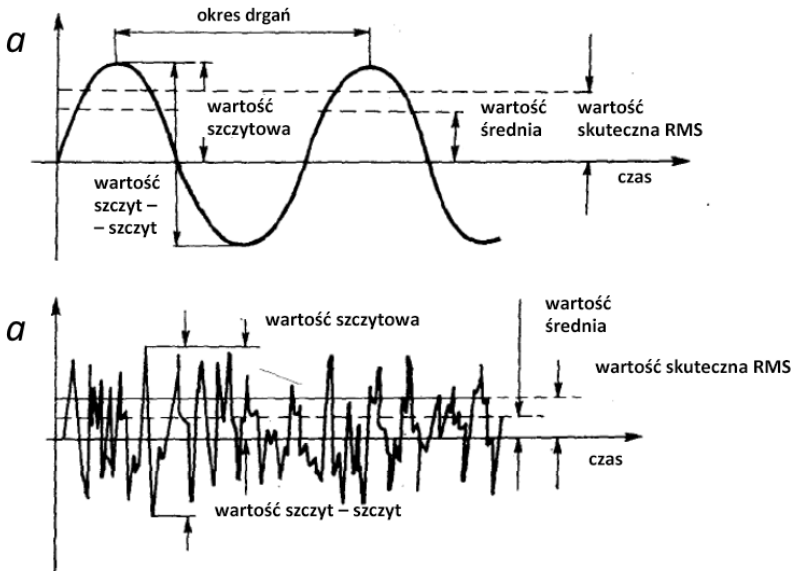
$$a_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T a^2(t) dt} \quad (2.2)$$

gdzie: T – czas trwania drgań [s].

W praktyce pomiarowej wpływu drgań na ludzi przebywających w budynkach stosuje się wartość średniokwadratową przyspieszeń przedstawioną w pasmach 1/3 oktaowych. Dzięki temu uzyskuje się informacje nie tylko o przekroczeniu wartości progowych odczuwalności drgań, ale także o paśmie częstotliwości, w którym to przekroczenie nastąpiło. Jest to szczególnie przydatne w projektowaniu budynków, ponieważ można wówczas jeszcze „przebrać” konstrukcję stropu czy nawet budynku w taki sposób, aby nie występowały przekroczenia w poszczególnych pasmach częstotliwości.

Metoda *RMS* zwana jest metodą podstawową ISO [45], zgodnie z którą opracowania dotyczące wpływu drgań na ludzi przebywających w budynkach powinny zawsze zawierać wyniki pomiarów w wartościach średniokwadratowych. Mię-

dzy innymi dlatego, oraz ze względu na łatwość interpretacji przedstawionych przy pomocy tej metody wyników, wielu badaczy się nią posługuje [9, 18, 22, 41, 66, 83, 89, 101, 110, 111], a metoda trafiła również do większości norm różnych krajów.



Rys. 2.3. Ilustracja wartości RMS na przykładowym przebiegu drgań harmonicznym i o charakterze losowym [9]

W ocenie wpływu drgań na ludzi przebywających w budynkach przeprowadzonych zgodnie z metodą *RMS* uwzględnia się takie czynniki oceny jak: przeznaczenie pomieszczenia, porę dnia występowania drgań, charakter i powtarzalność oraz kierunek działania drgań i pozycję ciała człowieka odbierającego drgania w pomieszczeniu (Rys. 1.1).

Wartości współczynnika n odnoszące się do przeznaczenia pomieszczenia, pory dnia oraz charakteru drgań zestawiono w Tab. 2.2 zgodnie z zapisami polskiej normy [95].

Tabela 2.2

Wartość współczynnika n w zależności od przeznaczenia pomieszczenia, pory dnia i charakteru drgań (wg [95])

Przeznaczenie pomieszczenia	Pora występowania drgań	Wartość współczynnika n	
		Drgania o charakterze ciągłym lub drgania okresowe występujące częściej niż 10 razy na dobę	Drgania sporadyczne występujące rzadziej niż 10 razy na dobę
Szpitale (sale operacyjne)	Dzień	1	1
	Noc	1	1
Szpitale (sale chorych)	Dzień	2	8
	Noc	1	4
Mieszkania	Dzień	4	32
	Noc	1,4	4
Biura	Dzień	4	64
	Noc	4	64
Zakłady pracy, warsztaty	Dzień	8	128
	Noc	8	128

Norma ISO [44] podaje bardzo podobne wartości współczynnika n , ale określa wiele dodatkowych sytuacji, które mogą wystąpić podczas oceny diagnostycznej (Tab. 2.3).

Tabela 2.3

Wartość współczynnika n w zależności od przeznaczenia pomieszczenia, pory dnia i charakteru drgań (wg [44])

Przeznaczenie pomieszczenia	Pora występowania drgań	Wartość współczynnika n	
		Drgania o charakterze ciągłym lub drgania okresowe występujące częściej niż 10 razy na dobę	Drgania sporadyczne występujące rzadziej niż 10 razy na dobę
Szpitala, precyzyjne laboratoria	Dzień Noc	1	1
Mieszkania	Dzień	2–4	30–90
	Noc	1,4	1,4–20
Biura	Dzień	4	60–128
	Noc		
Zakłady pracy, warsztaty	Dzień	8	90–128
	Noc		

Generalnie, współczynnik n przyjmowany jest jako dolna wartość z zakresu podawanego w Tab. 2.3. Norma [44] precyzuje, w jakich wyjątkowych sytuacjach możliwe jest podniesienie wartości współczynnika n . Do takich sytuacji należą m.in. mniejsza częstość występowania drgań czy też uprzedzenie mieszkańców o możliwości ich wystąpienia w określonym czasie (np. podczas prowadzonych w otoczeniu prac budowlanych).

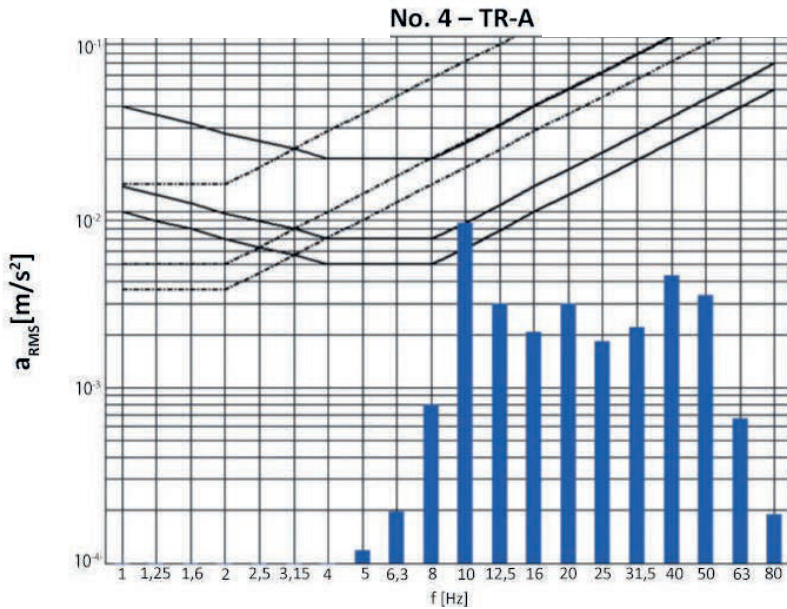
W niniejszej pracy posłużono się przepisami polskiej normy w zakresie metody *RMS*.

W znowelizowanej polskiej normie [95] wprowadzono nowy wskaźnik, za pomocą którego można wyrazić wynik oceny wpływu drgań na ludzi przebywających w budynkach. Wskaźnik ten, tzw. wskaźnik odczuwalności drgań przez ludzi (w skrócie *WODL*), w odniesieniu do drgań przekazywanych na człowieka w kierunku z można wyznaczyć ze wzoru:

$$WODL = \max\left(\frac{a_{RMS}}{a_z}\right) \quad (2.3)$$

gdzie: a_{RMS} – wartość średniokwadratowa przyspieszeń drgań otrzymana w wyniku analizy, a_z – wartość średniokwadratowa przyspieszeń drgań równa progowi odczuwalności drgań przez ludzi w kierunku z w tym samym paśmie częstotliwości, w którym wyznaczono a_{RMS} .

Wartość liczbowa wskaźnika uzupełniona informacją o częstotliwości środkowej pasma, w którym została wyznaczona stanowi uzupełnienie informacji pozyskanych za pomocą metody *RMS*, przedstawionej w pasmach 1/3-oktawowych, w postaci wykresu. Wskaźnik *WODL* informuje nie tylko o przekroczeniu progu odczuwalności drgań, ale także o wartości tego przekroczenia. Pamiętać należy, że wynik metody *RMS* ilustrowany jest w formie grafu w skali logarytmicznej, co często w wartościach granicznych powoduje problem w interpretacji przekroczenia wymagania zapewnienia niezbędnego komfortu. Natomiast graf razem z informacją o wartości wskaźnika *WODL* dostarcza pełniejszej infor-



Rys. 2.4. Analiza RMS drgań poziomych stropu – kierunek x, y w pasmach 1/3-oktawowych w nawiązaniu do linii progów odczuwalności drgań, za pracę [65]

macji. Na Rys. 2.4 podano za pracę [65] przykład oceny wpływu drgań na ludzi.

Na Rys. 2.4 dominujące jest pasmo o częstotliwości środkowej równej 10 Hz. Wartość $a_{RMS}(10 \text{ Hz}) = 0,025 \text{ m/s}^2$, wartość odpowiadająca progowi odczuwalności drgań przy $f = 10 \text{ Hz}$ (dolna linia ciągła) wynosi $0,018 \text{ m/s}^2$. Stąd *WODL* przy częstotliwości 10 Hz wynosi $0,025/0,018 = 1,39$. Jest więc to wartość większa od progów odczuwalności drgań przez ludzi.

2.2.2. METODA MAKSYMALNEJ WARTOŚCI PRZEJŚCIOWEJ *MTWV*

Metoda ta zwana jest dodatkową stanowi uzupełnienie metody *RMS*. Powinna być używana w przypadku wysokiej wartości współczynnika szczytu (powyżej 9) i raportowana wspólnie z wynikami metody *RMS*. Wynik oceny wpływu drgań na

ludzi przeprowadzonej za pomocą metody *MTVV* może się różnić od wyniku uzyskanego przy użyciu metody *RMS*, ponieważ metoda *MTVV* jest bardziej wrażliwa na tzw. piki występujące w przebiegu drgań.

Algorytm metody *MTVV* przedstawiają poniższe równania:

$$a_w(T) = \left[\frac{1}{\tau} \int_{T-\tau}^T a_w^2(t) dt \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.4)$$

$$MTVV = \max[a_w(T)] \quad (2.5)$$

gdzie: τ – jest czasem całkowania, zalecane jest użycie $\tau = 1$ s;
 T – czas trwania drgań.

Metoda *MTVV* jest bardzo podobna do podanej w normie polskiej metody *RMS* [95], w której czas trwania drgań jest ograniczony przedziałem, w którym mieszczą się wartości szczytowe wyższe od 0,2 maksymalnej wartości. Przebiegi przyspieszeń drgań pochodzące od źródeł transportowych z reguły trwają od kilku do kilkunastu sekund. Ponadto przyjęta w Polsce metodyka oceny wpływu drgań na ludzi przebywających w budynkach rekomenduje wybór oceny najmniej szkodliwego zdarzenia spośród zarejestrowanych.

Nie zawsze duża wartość współczynnika szczytu jest wystarczającą rekomendacją do użycia metody *MTVV*. W normie ISO [44] zapisano warunek, który wskazuje na koniecz-

ność zastosowania metody *MTVV* w opracowaniu oceny wpływu drgań na ludzi w budynkach.

$$\frac{MTVV}{a_w} = 1,5 \quad (2.6)$$

gdzie: a_w – wartość ważona przyspieszeń drgań.

Wartości progowe w tej metodzie są identyczne jak w metodzie *RMS*. Ponadto możliwe jest przedstawienie rozkładu wartości *MTVV* w pasmach 1/3-oktawowych, co dodatkowo ułatwia ocenę.

2.2.3. METODA DAWKI WIBRACJI *VDV*

Najlepszą metodą dodatkową w ocenie wpływu drgań na ludzi w budynkach w przypadku wystąpienia nagłych zmian przyspieszenia, czyli tzw. pików w zarejestrowanym sygnale, jest metoda dawki wibracji *VDV*. Metoda jest głównie stosowana w przypadku drgań ogólnych i miejscowych oddziałujących w sposób czynny na człowieka. Jej wrażliwość na występowanie wartości szczytowych w zarejestrowanym sygnale wynika z formuły jej wyznaczenia, w której przyspieszenie drgań występuje w czwartej potęgze:

$$VDV = \left[\int_0^T a_w^4(t) dt \right]^{\frac{1}{4}} \quad (2.7)$$

Przekształcenie sygnału za pomocą wzoru 2.6 powoduje, że jednostką VDV jest $m/s^{1,75}$.

Procedura wyznaczania wartości VDV jest podobna, co do istoty, do procedury stosowanej w metodzie RMS . Problem jednak pojawia się na samym początku, gdzie po zastosowaniu odpowiedniego filtra korekcyjnego (wartości dostępne w normach [44, 94, 95]) należy wprowadzić wartości wagowe odpowiadające kierunkom drgań. Zgodnie bowiem z normą [44] należy stosować wartości wagowe przypisane kierunkom odbioru drgań przez człowieka. Norma [44] umożliwia w przypadku oceny wpływu drgań na ludzi przebywających w budynkach zastosowanie tzw. wagi kombinowanej. W różnych normach występują jeszcze różnice w wartościach wag odnoszących się do tych samych kierunków. Jest to widoczne przy porównaniu informacji z dwóch norm, które jako pierwsze wprowadziły metodę VDV , czyli norm brytyjskiej [10] i ISO [45]. W zapisach obydwu norm występują różnice w wartościach wag w kierunku pionowym, zaś w kierunkach poziomym różnice te są znikome (Tab. 2.4 i Rys. 2.5) i wynikają z dokładności wyznaczenia podawanych wartości.

Z zestawionych w Tab. 2.4 i pokazanych na Rys. 2.5 wartości wag na kierunku z zawartych w normach ISO [45] i BS [10] wynika, że w normie brytyjskiej przy małych wartościach częstotliwości środkowych (od 0,5 do ok. 5 Hz) wartości funkcji wagi są mniejsze niż w normie ISO, w zakresie częstotliwości

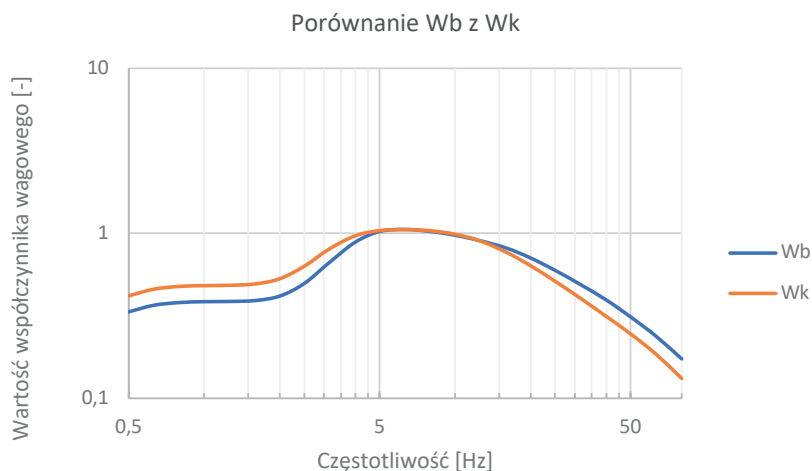
Tabela 2.4

**Zestawienie wartości wag w pasmach 1/3-oktawowych
wg norm: ISO [45] i BS [10]**

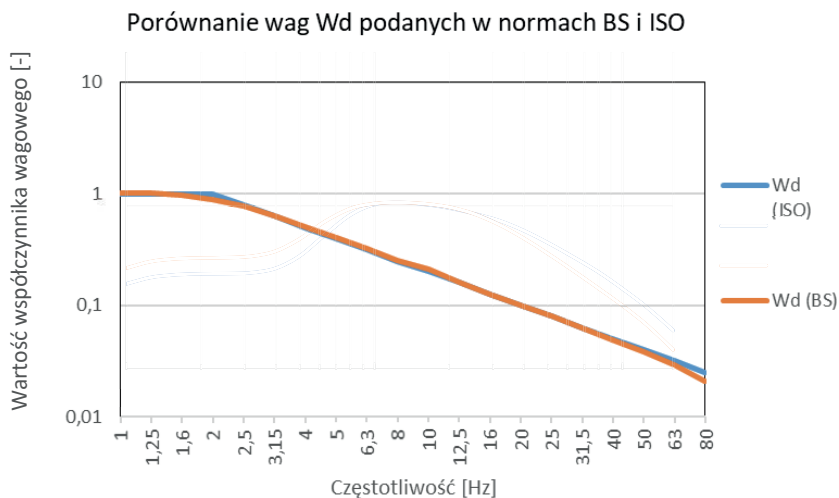
Częstotliwość środkowa pasma [Hz]	Wartość wagi W _b na kierunku z [10] [-]	Wartość wagi W _k na kierunku z [45] [-]	Wartość wagi W _d na kierunkach x, y [10] [-]	Wartość wagi W _d na kierunkach x, y [45] [-]
0,5	0,33457	0,418	-	0,853
0,63	0,3666	0,459	-	0,944
0,8	0,3808	0,477	-	0,992
1	0,3853	0,482	1	1,011
1,25	0,3864	0,484	1	1,008
1,6	0,3916	0,494	1	0,968
2	0,4168	0,531	1	0,890
2,5	0,496	0,631	0,8	0,776
3,15	0,6653	0,804	0,635	0,642
4	0,885	0,967	0,5	0,512
5	1,026	1,039	0,4	0,409
6,3	1,0554	1,054	0,317	0,323
8	1,026	1,036	0,25	0,253
10	0,974	0,988	0,2	0,212
12,5	0,9042	0,902	0,16	0,161
16	0,8144	0,768	0,125	0,125
20	0,7088	0,636	0,1	0,100
25	0,5973	0,513	0,08	0,080
31,5	0,4906	0,405	0,063	0,0632
40	0,395	0,314	0,05	0,0494
50	0,3118	0,246	0,04	0,0388
63	0,2389	0,186	0,032	0,0295
80	0,1734	0,132	0,025	0,0211

środkowych od 6,3 Hz do 12,5 Hz kształtują się na podobnym poziomie, po czym od częstotliwości 16 Hz przybierają wartości znacząco większe od podanych w normie ISO.

Rys. 2.5. Porównanie wartości funkcji wagi na kierunku z podanych w normach: ISO [45] i BS [10]



Na Rys. 2.6 natomiast pokazano wartości wag W_d dla kierunków x i y . Widoczne są jedynie nieznaczące różnice w wykresach.



Rys. 2.6. Porównanie wartości funkcji wagowych na kierunkach x i y podanych w normach: ISO [45] i BS [10]

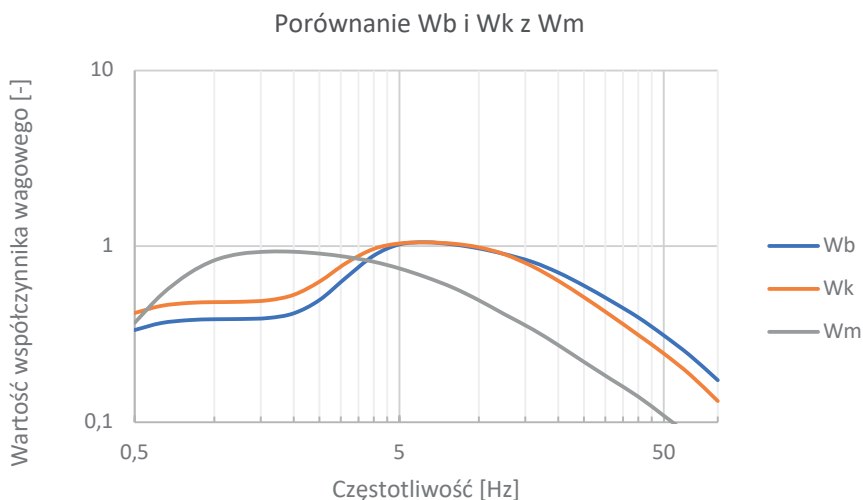
Charakterystykę tzw. funkcji wagowej kombinowanej zestawiono w Tab. 2.5.

Tabela 2.5

Wartości funkcji wagowej kombinowanej W_m niezależnej od pozycji człowieka odbierającego drgania w sposób bierny

Częstotliwość środkowa pasma [Hz]	Wartość wagi W_m [46] [-]
0,5	0,368
0,63	0,53
0,8	0,7
1	0,833
1,25	0,907
1,6	0,934
2	0,932
2,5	0,91
3,15	0,872
4	0,818
5	0,75
6,3	0,669
8	0,582
10	0,494
12,5	0,411
16	0,337
20	0,274
25	0,22
31,5	0,176
40	0,14
50	0,109
63	0,0834
80	0,0604

Na Rys. 2.7 zestawiono wartości funkcji wagowych na kierunkach z z wartościami takiej funkcji na kierunkach mieszanych W_m . Widać, że o ile wartości funkcji wagowych na kierunkach z nie różnią się znacząco od siebie, to o tyle wartość funkcji wagowej W_m jest znacząco różna od nich. Nie zawarto w żadnej z norm ISO kryteriów, wg których można byłoby oceniać otrzymane przy użyciu wagi W_m wartości VDV . Niektórzy badacze analizowali funkcję wagową kombinowaną i porównywali ją z funkcjami wagowymi jednoznacznie określonych kierunków drgań [68, 69]. Z analiz tych wynika, że oceny bardziej odpowiadają rzeczywistości, jeśli zastosowane będą funkcje wagowe uwzględniające wpływ drgań oddzielnie na kierunki odbioru drgań (W_d , W_b lub W_k).



Rys. 2.7. Porównanie wagi kombinowanej W_m z wagami na kierunku z zawartymi w BS (W_b) i w ISO (W_k)
(rys. A. Kowalska-Koczwara)

W analizach wykonanych w związku z niniejszą pracą zgodnie z polską normą [95] posługiwano się funkcjami wagowymi odnoszającymi się do kierunków z oraz x i y . Zastosowano wartości funkcji wagowych zestawione w normie ISO [45], gdyż polska norma ich nie podaje.

Drganiom przekazywanym na budynki poprzez podłoże gruntowe pomimo tego samego źródła drgań mogą odpowiadać inne wartości VDV wyznaczone przy pojedynczym zdarzeniu. W celu określenia całodniowego lub całonocnego wpływu drgań na ludzi odbierających drgania w sposób bierny, należy posłużyć się wzorem:

$$VDV_{dzień/noc} = \left(\sum_{k=1}^{k=N} VDV^4 \right)^{0,25} \quad (2.8)$$

gdzie: k – pojedyncze zdarzenie, N – liczba zdarzeń w ciągu dnia/nocy.

W odniesieniu do narażenia całodziennego i całonocnego w normie BS [10] oraz w normie polskiej [95] podano kryteria, według których oceniane jest prawdopodobieństwo wystąpienia skarg ze strony użytkowników budynków.

W Tab. 2.6 oraz w Tab. 2.7 zestawiono wartości progowe prawdopodobieństwa wystąpienia skarg, odpowiednio zgodnie z normami [10, 95].

Tabela 2.6

Wartości $VDV [ms^{-1,75}]$ do oceny prawdopodobieństwa wystąpienia skarg ludzi w budynkach [10]

Przeznaczenie pomieszczenia	Niskie prawdopodobieństwo wystąpienia skarg użytkowników	Możliwe wystąpienie skarg użytkowników	Wystąpienie skarg prawdopodobne
mieszkalne – 16 h dzień	0,2–0,4	0,4–0,8	0,8–1,6
mieszkalne – 8 h noc	0,1–0,2	0,2–0,4	0,4–0,8
biurowe – 16 h dzień	0,4–0,8	0,8–1,6	1,6–3,2
warsztaty – 16 h dzień	0,8–1,6	1,6–3,2	3,2–6,4

Tabela 2.7

Wartości $VDV [ms^{-1,75}]$ do oceny prawdopodobieństwa wystąpienia skarg ludzi w budynkach [95]

Miejsce odbioru drgań	Pora dnia	Niskie prawdopodobieństwo wystąpienia skarg użytkowników	Możliwe wystąpienie skarg użytkowników
Szpitala, sale operacyjne, precyzyjne laboratoria	Dzień i Noc	0,1	0,2
Mieszkania	Dzień	0,2	0,4
	Noc	0,13	0,26
Biura	Dzień i Noc	0,4	0,8
Warsztaty	Dzień i Noc	0,8	1,6

W niniejszej pracy odnoszono się głównie do wymagań podanych w polskiej normie [95], ale w celach porównawczych w niektórych przypadkach podano także wynik oceny zgodnie z normą brytyjską [10].

2.2.4. INNE METODY

Przytoczone poniżej metody są obecnie stosowane w ocenie wpływu drgań ogólnych i miejscowych na organizm ludzki. Opisanie ich w niniejszej pracy wynika z przekonania, iż mogą w przyszłości – podobnie jak metoda *VDV* – okazać się przydatne w ocenach objętych opisanym tu tematem.

2.2.4.1. Metoda wielkości wibracji

Wielkość wibracji, *VG*, to metoda wywodząca się z akustyki [80]. Podstawą metody jest użycie oktawy (ujęcie proste) albo 1/3 oktawy (ujęcie złożone) do uzyskania pojedynczej wartości, która odpowiada poziomowi głośności danego dźwięku. W metodzie *VG* stosuje się tą samą zasadę do oceny wpływu drgań na ludzi, którą podana jest w ocenie głośności. Wartości progowe zostały wyznaczone w tej metodzie w 1969 roku [79] i odnoszą się do takich drgań jak: drgania ogólne na kierunku *x*, *y*, drgania ogólne na kierunku *z* oraz drgania miejscowe na kierunku *z*. Po określeniu wartości progowych wyznacza się wartość *VG*, w zależności od przyjętej metody (ujęcie uproszczone – wzór 2.8, ujęcie złożone – wzór 2.9), z następujących wzorów:

$$VG = VG_{M,1} + 0,3 \left(\sum_i VG_{i,1} \right) - VG_{M,1} \quad (2.9)$$

$$VG = VG_{M,1/3} + 0,3 \left(\sum_i VG_{i,1/3} \right) - VG_{M,1/3} \quad (2.10)$$

gdzie: $VG_{M,1}$ jest największą wartością VG w pasmach VG_i , a VG_i jest wartością VG w i -tym paśmie częstotliwości.

Wyznaczone przy pomocy powyższych wzorów wartości VG nie powinny przekraczać wartości progowych.

2.2.4.2. Metoda tzw. Jerków

Jerk (symbol j) jest terminem używanym do określenia trzeciej pochodnej pozycji (kierunku drgań), która również ma wpływ na komfort [103]. Metoda jest głównie używana w przypadku komfortu jazdy windą, pojazdami szynowymi, kolejkami w parkach rozrywki i służy przede wszystkim do oceny komfortu podczas ruszania i hamowania.

2.2.4.3. Metoda wpływu wielokrotnych wstrząsów na kręgosłup

Spośród wszystkich prezentowanych w tym rozdziale metod ta jest najnowsza, powiązana z medycyną i choć bezpośrednio nie służy do oceny wpływu drgań na komfort wibracyjny, to w niedalekiej przyszłości może stać się dodatkowym pa-

rametrem oceny, na co wskazują niektóre prace [1]. Metoda już została wprowadzona do normy ISO jako jej rozszerzenie [48]. Wynik oceny zależy od liczby wstrząsów oddziałujących na ludzkie ciało, w tym głównie kręgosłup, a nie jak w przypadku metod tradycyjnych, od funkcji wagowych czy czasu trwania drgań.

Norma ISO [48], w celu oceny wpływu drgań na zdrowie, wprowadza statystyczną wartość naprężenia ściskającego S_{ed} , które jest obliczane na podstawie szóstej potęgi dawki wibracji pomnożonej przez współczynniki dawki. Jeżeli wartość S_{ed} jest mniejsza niż 0,5 to wynik odpowiada małemu prawdopodobieństwu negatywnych skutków dla zdrowia przy założeniu, że ekspozycja będzie występowała przez całe życie człowieka. Natomiast wartość S_{ed} większa od 0,8 wskazuje, że istnieje duże prawdopodobieństwo wystąpienia tych negatywnych efektów. Wyniki od 0,5 do 0,8 wskazują na umiarkowany wpływ drgań na zdrowie przy ekspozycji przez całe życie. Stosuje się oddzielne procedury obliczeniowe przy oddziaływaniu w kierunku wzdłuż i w poprzek kręgosłupa [48].

3. WPŁYW ODDZIAŁYWANIA WYBRANYCH ŹRÓDEŁ DRGAŃ TRANSPORTOWYCH NA ODCZUWALNOŚĆ DRGAŃ PRZEZ LUDZI W BUDYNKACH

Wyniki badań wpływu drgań pochodzących od ruchu środków transportowych na ludzi odbierających te drgania w sposób bierny przedstawiono w wielu pracach [27, 34, 36, 50, 56, 62, 63, 72, 91, 92, 93, 101, 104, 105, 106, 108, 116]. W opisach dotyczących szczegółowych rezultatów zabrakło globalnego ujęcia problemu. Często też w prezentacjach szczegółowych brakuje informacji o rodzaju źródła. A nawet jeżeli są podawane, nie wystarczają do tego, aby możliwe było sformułowanie ogólnych wniosków. Nie od dziś wiadomo bowiem, że drgania generowane przez pojazdy poruszające się po drogach szynowych są dużo bardziej intensywne i tym samym bardziej odczuwalne niż drgania generowane przejazdami po drogach kołowych.

W niniejszym rozdziale podane są syntetycznie wyniki oceny wpływu drgań na ludzi w budynkach, które to drgania pochodzą od pojazdów poruszających się po drogach

kołowych (przejazdy autobusów, samochodów ciężarowych) oraz po drogach szynowych (przejazdy tramwajów, pociągów metra). W badaniach uwzględniono wyniki pomiarów przeprowadzonych w czterech budynkach: w trzech poddanych wymuszeniom przejazdami pojazdów kołowych, tramwajów i pociągów metra oraz w jednym poddanym wymuszeniu przejazdami pojazdów kołowych i tramwajów. Pomiary przeprowadzone w 2008 roku stanowiły zbiór tzw. pomiarów tła dynamicznego, w trakcie których zarejestrowano wymuszenia pochodzące od przejazdów pojazdów po drogach kołowych i tramwajów. W roku 2015 wykonano pomiary porealityczne, w trakcie których wymuszeniem dynamicznym były przejazdy pociągów metra w Warszawie. Badania w roku 2008 i w roku 2015 realizowane były w tych samych punktach pomiarowych, co umożliwiło porównanie wyników badań.

3.1. Analiza wyników pomiarów wykonanych w budynku przy ul. Zamoyskiego

Pierwszy z budynków, na którym wykonano serię pomiarów, zlokalizowany jest w Warszawie przy ul. Zamoyskiego. Jest to budynek pięciokondygnacyjny wybudowany w technologii tradycyjnej murowanej (Rys. 3.1). Budynek postawiono przed II wojną światową. Wykonano stropy typu Kleina. Zlokalizowany jest w odległości 9 m od krawędzi drogi kołowej oraz ok. 20 m od linii tramwajowej (odległość mierzona od

**Rys. 3.1. Widok elewacji
wschodniej budynku**
(fot. A. Kowalska-Koczwara)

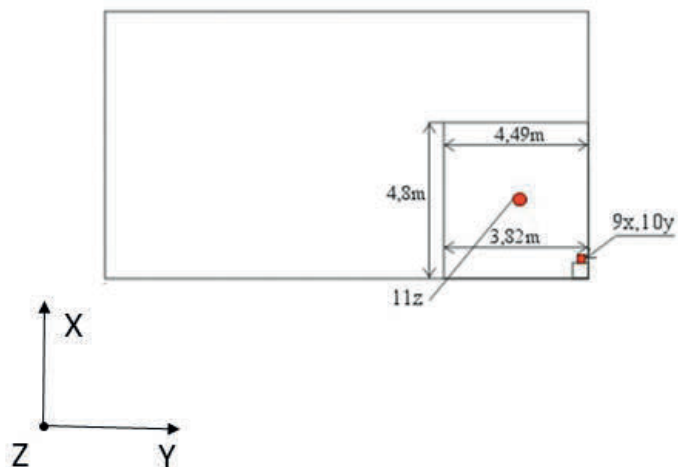


główki najbliższej szyny) i usytuowany bezpośrednio nad tunelem metra.

Punkt pomiarowy zlokalizowany był na czwartej kondygnacji, w pomieszczeniu mieszkalnym od strony dróg kołowej i szynowej, zgodnie z normą [95] usytuowany był w środku geometrycznym stropu (Rys. 3.2). Mierzono przyspieszenia w trzech ortogonalnych kierunkach (X , Y , Z).

**Rys. 3.2. Szkic usytuowania
punktu pomiarowego
odbioru drgań przez ludzi**

(rys. A. Kowalska-Koczwara
na podstawie zasobów
Laboratorium Badania
Odkształceń i Drgań Budowli)



W wyniku pomiarów tła dynamicznego zarejestrowano 12 zdarzeń pochodzących od: linii tramwajowej (8 zdarzeń) oraz drogi kołowej (4 zdarzenia). Natomiast w trakcie pomiarów porealizacyjnych zarejestrowano 11 zdarzeń związanych z przejazdami pociągów metra. Łącznie analizie *RMS/MTVV* i *VDV* podlegały 23 zdarzenia.

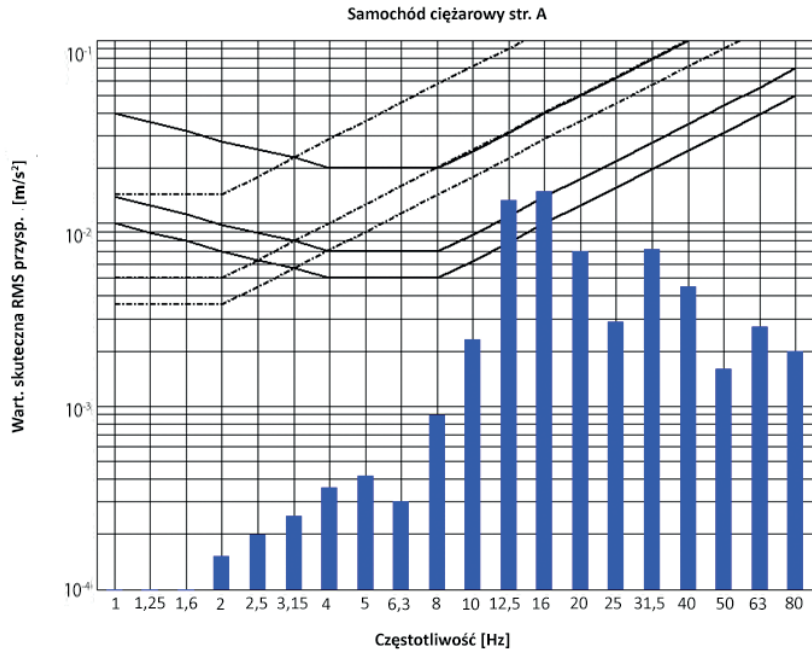
3.1.1. WYNIKI ANALIZY METODAMI *RMS* i *MTVV*

Zarejestrowany sygnał analizowany był zgodnie z metodologią opisaną w rozdziale 2 niniejszej pracy. Spośród 23 zarejestrowanych zdarzeń w pięciu przekroczony został próg odczuwalności drgań przez ludzi przebywających w budynkach. Trzy przekroczenia progu odczuwalności wystąpiły dla przejazdów pociągów metra, co stanowi ok. 27% wszystkich przejazdów pociągów metra zarejestrowanych na obiekcie. Dwa przekroczenia progu odczuwalności wystąpiły przy wymuszeniach pochodzących od przejazdami drogą kołową, co w tym przypadku stanowi 50% wszystkich wymuszeń zarejestrowanych od przejazdów tą drogą. W przypadku przejeżdżających tramwajów nie zaobserwowano przekroczenia progu odczuwalności drgań przez ludzi.

Poniżej pokazano przykładowe analizy *RMS* pojedynczych zdarzeń w pasmach 1/3-oktawowych (Rys. 3.3, Rys. 3.4.).

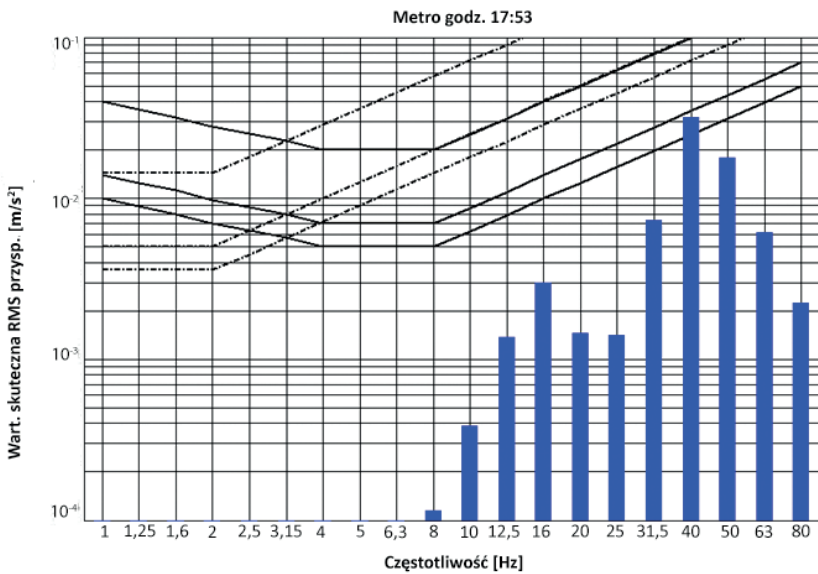
Rys. 3.3. Wyniki pomiarów drgań w kierunku pionowym Z wywołanych przejazdami samochodu ciężarowego

(rys. A. Kowalska-Koczwara na podstawie zasobów Laboratorium Badania Odształceń i Drgań Budowli)



Rys. 3.4. Wyniki pomiarów wpływu drgań pionowych Z na ludzi od przejeżdżającego pociągu metra

(rys. A. Kowalska-Koczwara na podstawie zasobów Laboratorium Badania Odształceń i Drgań Budowli)



Z informacji podanych na Rys. 3.3 wynika, że zarejestrowane drgania nie naruszają warunków zapewnienia niezbędnego komfortu, ale są odczuwalne przez ludzi przebywających w pomieszczeniu. Przekroczenie progu odczuwalności drgań występuje dla dwóch częstotliwości 12.5 oraz 16 Hz, co lepiej ilustrują wyniki podane w Tab.3.1, odnoszące się do wartości wskaźnika *WODL*.

Tabela 3.1

Wartości *WODL* i odpowiadające im częstotliwości w pasmach, w których nastąpiło przekroczenie progu odczuwalności

<i>WODL</i> [-]	Częstotliwość średkowa <i>f</i> [Hz]
1,72	12,5
1,49	16,0

Analiza *RMS* wibrogramu wywołanego przejazdem pociągu metra nie wykazała naruszenia warunków zapewnienia komfortu wibracyjnego ludziom w pomieszczeniach. Wystąpiły jednak przekroczenia progu odczuwalności drgań. W widocznym na Rys. 3.4 przykładzie przekroczenie progu mierzone wskaźnikiem *WODL* wyniosło $WODL = 1,28$ przy częstotliwości 40 Hz. W tym przykładzie w stosunku do drgań wywołanych przejazdami po drodze kołowej drgania wywołane przejazdami pociągów metra powodują przesunięcie spektrum częstotliwości w stronę większych wartości.

Na podstawie analizy *RMS* można stwierdzić, że w 22% zdarzeń nastąpiło przekraczanie wartości odpowiadającym progom odczuwalności drgań przez ludzi w budynkach.

3.1.2. WYNIKI ANALIZY METODĄ *VDV*

Analizie *VDV* poddano te same zdarzenia, które analizowano metodą *RMS*. Uwzględniano czas trwania zdarzenia, który zmieniał się od 11 do 19 s. Wyniki analizy *VDV* wraz ze zbiorczym zestawieniem wskaźników *WODL* obliczonych w analizie *RMS* podano w Tab. 3.2.

Tabela 3.2

Wartości *VDV* w poszczególnych zdarzeniach oraz maksymalne wartości *WODL* w zdarzeniach

Lp.	Przejazd pojazdu	Czas trwania zdarzenia [s]	<i>VDV</i> [m/s ^{1,75}]	<i>WODL/f</i> [-/Hz]
1	tramwaj	19	0,050	0,48/12,5
2	tramwaj	11	0,049	0,49/12,5
3	autobus	11	0,094	1,01/12,5
4	tramwaj	18	0,088	0,86/12,5
5	samochód ciężarowy	12	0,161	1,72/12,5
6	autobus	12	0,065	0,75/12,5
7	tramwaj	12	0,050	0,52/12,5
8	autobus	12	0,043	0,58/12,5
9	tramwaj	14	0,073	0,49/12,5
10	tramwaj	12	0,049	0,53/12,5

11	tramwaj	12	0,041	0,42/12,5
12	tramwaj	12	0,070	0,77/12,5
13	pociąg metra	18	0,171	0,83/40
14	pociąg metra	18	0,142	0,70/40
15	pociąg metra	18	0,214	1,28/40
16	pociąg metra	17	0,144	0,71/40
17	pociąg metra	16	0,119	0,57/40
18	pociąg metra	18	0,152	0,71/40
19	pociąg metra	18	0,166	0,94/40
20	pociąg metra	18	0,162	1,03/40
21	pociąg metra	16	0,322	1,18/40
22	pociąg metra	18	0,146	0,90/40
23	pociąg metra	18	0,198	0,82/40

Żółtym kolorem zaznaczono wartości, które zgodnie z polską normą [95] przekraczają wartości odpowiadające progowi odczuwalności drgań przez ludzi w budynkach ($WODL > 1,0$) lub odpowiadają niskiemu prawdopodobieństwu wystąpienia skarg ze strony mieszkańców w porze dziennej ($VDV > 0,2$).

W celu porównania wyników uzyskanych metodą *RMS* i metodą *VDV* przyjęto następujące założenia:

- niskie prawdopodobieństwo wystąpienia skarg porównywane jest z przekroczeniem progu odczuwalności drgań przez ludzi,
- możliwe wystąpienie skarg porównywane jest z poziomem wymagań odnośnie do zapewnienia niezbędnego komfortu wibracyjnego.

Na podstawie badań metodą *VDV* stwierdzono mniej zdarzeń, w których nastąpiło małe prawdopodobieństwo wystąpienia skarg mieszkańców. Są to dwa zdarzenia związane z przejazdami pociągów metra. Drgania generowane przejazdami tramwajów są nieodczuwalne dla ludzi. Na podstawie wyników oceny wykonanej przy pomocy metody *VDV* można stwierdzić, iż 18% zdarzeń spowodowanych przejazdami pociągów metra skutkuje niskim prawdopodobieństwem wystąpienia skarg.

3.2. Analiza wyników pomiarów wykonanych w budynku przy ul. Targowej 15

Analizowany budynek zlokalizowany jest w Warszawie przy ul. Targowej 15. Jest to budynek mieszkalny, siedmiokondygnacyjny wybudowany w technologii tradycyjnej murowanej (Rys. 3.5). Budynek wybudowano przed II wojną światową. Usytuowany jest w odległości 5 m od krawędzi drogi kołowej oraz ok. 25 m od linii tramwajowej (odległość mierzona od główki szyny) i znajduje się bezpośrednio nad tunelem metra.

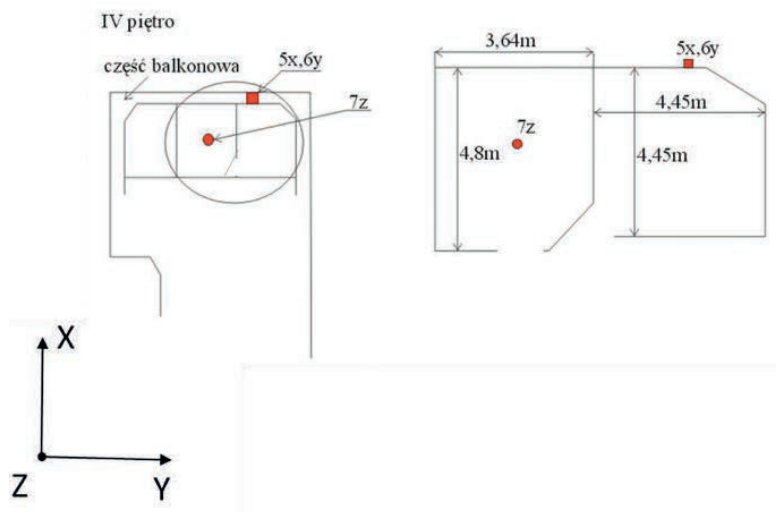
Analizie poddano 28 zdarzeń występujących podczas pomiarów tzw. tła dynamicznego, w tym zarejestrowano dwa przejazdy po drodze kołowej oraz 10 zdarzeń pochodzących od wymuszenia spowodowanego przejazdami pociągów metra.



Rys. 3.5. Widok elewacji budynku przy ul. Targowej 15

(fot. A. Kowalska-Koczwara)

Punkt pomiarowy w kierunku Z zlokalizowany był w środku rozpiętości stropu w pomieszczeniu znajdującym się na piątej kondygnacji od strony drogi kołowej. Natomiast punkt pomiaru drgań w kierunkach poziomych (X, Y) znajdował się na tej samej kondygnacji, ale w narożu pomieszczenia (Rys. 3.6).



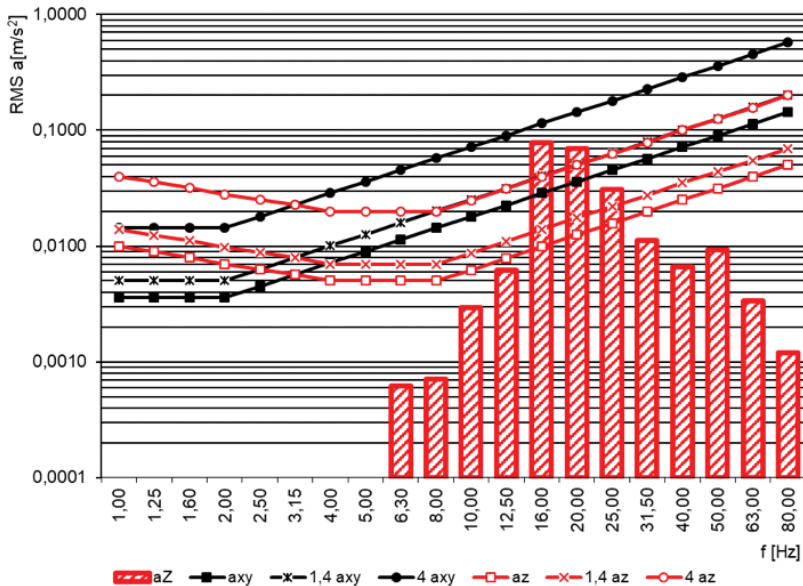
Rys. 3.6. Lokalizacja punktu pomiarowego w budynku przy ul. Targowej 15

(rys. A. Kowalska-Koczwara na podstawie zasobów Laboratorium Badania Odkształceń i Drgań Budowli)

3.2.1. WYNIKI ANALIZY METODAMI *RMS* i *MTVV*

Na Rys. 3.7 i Rys. 3.8 podano przykładowe analizy metodą *RMS* dotyczące dwóch wybranych zdarzeń: od przejazdu metra i przejazdu tramwaju. Wybrano wyniki dotyczące przejazdów, które wykazują największe wartości wskaźnika *WODL*. Przejazd tramwaju, którego analizę metodą *RMS* podano na Rys. 3.7, spowodował naruszenie warunków komfortu przy dwóch wartościach częstotliwości: 16 i 20 Hz.

Rys. 3.7. Analiza metodą *RMS* dotycząca przejazdu tramwaju obok budynku przy ul. Targowej 15
(rys. A. Kowalska-Koczwarą)

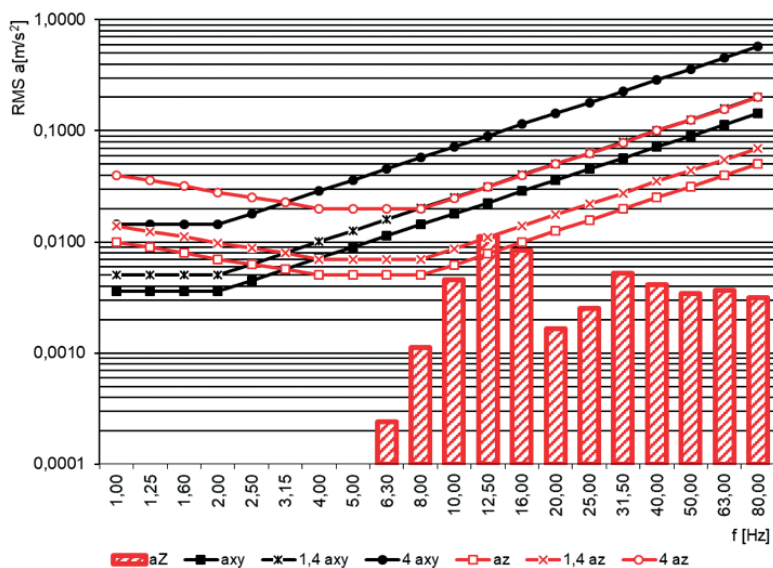


W Tab. 3.3 zestawiono wartości *WODL* wraz z odpowiadającymi im częstotliwościami środkowymi pasma wyznaczone w warunkach przedstawionych na Rys. 3.7. Zestawiono te wartości *WODL*, w których nastąpiło przekroczenie co najmniej progu odczuwalności drgań przez ludzi.

Tabela 3.3

Wartości WODL i odpowiadające im częstotliwości w pasmach, w których nastąpiło przekroczenie progu odczuwalności drgań pionowych

WODL [-]	Częstotliwość środkowa f [Hz]
7,84	16,0
5,57	20,0
1,96	25,0



Rys. 3.8. Analiza metodą RMS dotycząca przejazdu pociągu metra pod budynkiem przy ul. Targowej 15

(rys. A. Kowalska-Koczwara)

W przypadku przejazdu pociągu metra (wyniki podano na Rys. 3.8) nie jest wyraźnie uwidocznione ewentualne przekroczenie progu odczuwalności drgań przy częstotliwości środkowej pasma 16 Hz. W celu dokładniejszej oceny posłużono się wartościami wskaźnika WODL (Tab. 3.4).

Tabela 3.4

Wartości WODL i odpowiadające im częstotliwości w pasmach, w których można spodziewać się wystąpienie przekroczenia progu odczuwalności

WODL [-]	Częstotliwość środkowa f [Hz]
1,43	12,5
0,84	16,0

W odniesieniu do pomieszczenia znajdującego się na IV piętrze budynku przy ul. Targowej 15 nie ma wątpliwości, że ruch tramwajowy powoduje naruszenie warunków komfortu zarówno podczas dnia jak i w nocy. W przypadku przejazdów pociągów metra w tunelu pod budynkiem tylko w jednym zdarzeniu (10% wszystkich przejazdów metra) uwidoczniła się przekroczenie progu odczuwalności drgań przez ludzi w czasie pory dziennej.

Z analizy metodą *MTVV* polegającej na wyborze najbardziej niekorzystnego zdarzenia do oceny wpływu drgań na ludzi przebywających w budynkach wynika, że każde przejazdy tramwajów naruszają warunki komfortu wibracyjnego w tym budynku.

3.2.2. WYNIKI ANALIZY METODĄ *VDV*

Analizie metodą *VDV* poddano te same zdarzenia co objęte metodą *RMS*. Uwzględniano czas trwania zdarzenia, który

zmieniał się od 14 do 24 s. Wyniki analizy metodą *VDV* wraz ze zbiorczym zestawieniem wskaźników *WODL* pokazano w Tab. 3.5.

Tabela 3.5

**Wartości *VDV* dla poszczególnych zdarzeń
oraz maksymalne wartości *WODL* dla tych zdarzeń**

Lp.	Przejazd pojazdu	Czas trwania zdarzenia [s]	<i>VDV</i> [m/s ^{1,75}]	<i>WODL/f</i> [-/Hz]
1	tramwaj	14	0,393	4,23/16
2	tramwaj	14	0,188	1,88/20
3	autobus	14	0,233	2,21/20
4	tramwaj	14	0,140	1,26/20
5	tramwaj	14	0,229	2,84/20
6	tramwaj	14	0,604	7,84/16
7	samochód ciężarowy	14	0,328	4,62/20
8	tramwaj	14	0,403	5,39/20
9	tramwaj	16	0,245	2,74/20
10	tramwaj	14	0,414	7,09/16
11	tramwaj	16	0,521	6,04/20
12	tramwaj	14	0,133	1,13/20
13	tramwaj	16	0,169	1,35/20
14	tramwaj	16	0,309	3,98/20
15	tramwaj	14	0,351	3,05/16
16	tramwaj	14	0,216	2,57/20
17	tramwaj	14	0,285	3,83/20
18	tramwaj	14	0,239	2,93/16
19	metro	18	0,116	0,55/40
20	metro	18	0,101	0,37/40

21	metro	24	0,158	1,44/12,5
22	metro	18	0,104	0,38/40
23	metro	18	0,107	0,49/12,5
24	metro	18	0,104	0,43/16
25	metro	18	0,099	0,41/16
26	metro	18	0,101	0,40/40
27	metro	18	0,163	0,98/12,5
28	metro	18	0,126	0,59/12,5

Kolory zestawione w Tab. 3.5 oznaczają przekroczenia odpowiednich linii progowych tzn. jeśli $VDV < 0,2$ – brak skarg (kolor biały), $0,2 < VDV < 0,4$ – niskie prawdopodobieństwo skarg (kolor żółty) oraz $VDV > 0,4$ – możliwe wystąpienie skarg (kolor czerwony).

Przekroczenia wartości progowych w przypadku analizy metodą VDV nastąpiły w odniesieniu do 14 zdarzeń, przy czym przekroczeń naruszenia wymagań odnośnie do komfortu tożsamym z możliwym wystąpieniem skarg było 4. Ocena wpływu różnych źródeł transportowych na wynik analizy VDV wskazuje na to, iż wyłącznie przejazdy tramwajów powodują naruszenia wartości progowych prawdopodobieństw wystąpienia skarg.

W budynku przy ul. Targowej 15 zarejestrowano aż 19 zdarzeń, w których wystąpiły co najmniej przekroczenia progu odczuwalności drgań przez ludzi, co stanowi 68% wszystkich zarejestrowanych zdarzeń. Strop pomieszczenia, w którym przeprowadzono pomiary, okazał się być bardziej wrażliwy na drgania generowane przejazdami pojazdów transportu

naziemnego, głównie tramwajowego (por. Tab. 3.5). W 100% zarejestrowanych przejazdów tramwajów nastąpiło przekroczenie progu odczuwalności drgań, w tym w 6 zdarzeniach wystąpiło naruszenie wymagań zapewnienia niezbędnego komfortu ludziom przebywającym w tym pomieszczeniu w porze dziennej (35%). Tylko jedno zdarzenie generowane przejazdem pociągów metra w tunelu spowodowało przekroczenie progu odczuwalności drgań przez ludzi.

3.3. Analiza pomiarów wykonanych w budynku przy ul. Targowej 76

Kolejnym budynkiem, w którym wykonano oceny wpływu drgań generowanych źródłami transportowymi na ludzi, był budynek zlokalizowany przy ul. Targowej 76 w Warszawie. Jest to budynek sześciokondygnacyjny, wybudowany w technologii tradycyjnej murowanej (Rys. 3.9).

Budynek zlokalizowany jest w odległości 25 m od tunelu metra, 9 m od drogi kołowej oraz 25 m od linii tramwajowej. Punkt pomiarowy do oceny wpływu drgań na ludzi umieszczono w środku rozpiętości stropu pomieszczenia mieszkalnego (udostępnionego przez lokatorów) znajdującego się na czwartej kondygnacji (Rys. 3.10).

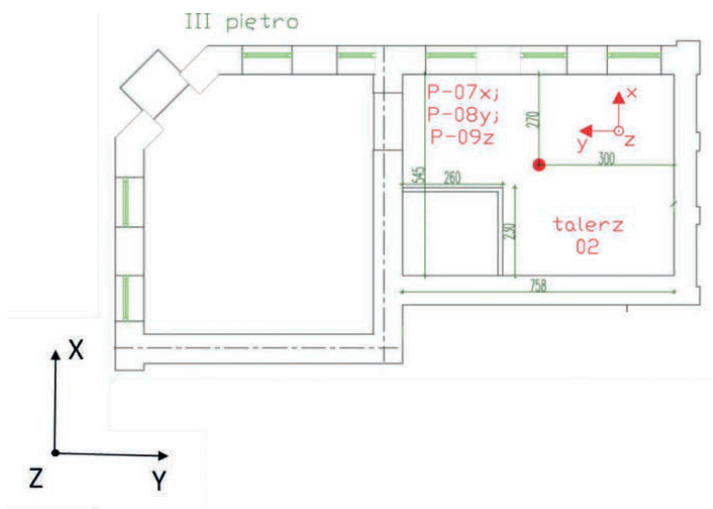
Rys. 3.9. Widok elewacji budynku przy ul. Targowej 76

(fot. A. Kowalska-Koczwara)



Rys. 3.10. Lokalizacja punktu pomiarowego w budynku przy ul. Targowej 76

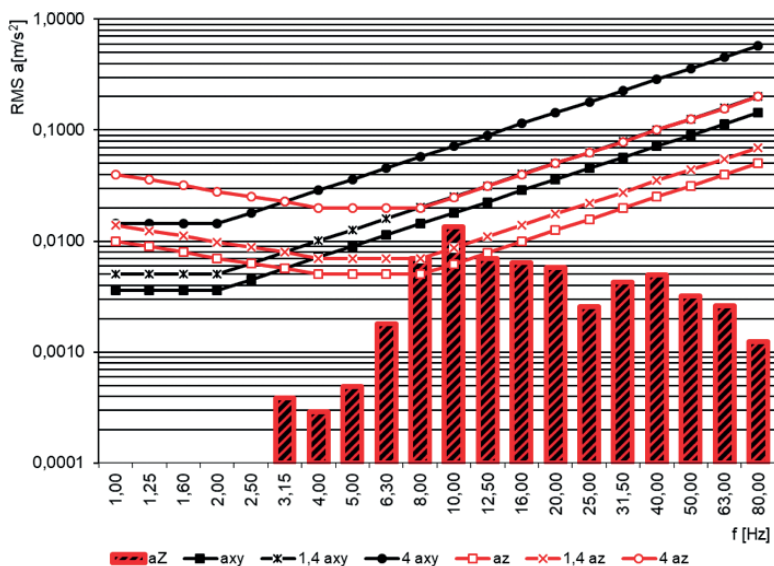
(rys. A. Kowalska-Koczwara
na podstawie zasobów
Laboratorium Badania
Odształceń i Drgań Budowli)



Analizie poddano 30 zdarzeń pochodzących od przejazdów tramwajów (11 zdarzeń), ciężkich pojazdów kołowych (autobus, samochód ciężarowy – 3 zdarzenia) oraz od przejazdów pociągów metra (16 zdarzeń).

3.3.1. WYNIKI ANALIZY METODAMI *RMS* i *MTVV*

Na poniższych rysunkach pokazano wyniki analizy metodą *RMS* uzyskane w odniesieniu do dwóch ekstremalnych przejazdów: jeden związany jest z przejazdem samochodu ciężarowego (Rys. 3.11), drugi z przejazdem tramwaju (Rys. 3.12).



Rys. 3.11. Analiza metodą *RMS* wyników uzyskanych podczas przejazdu samochodu ciężarowego obok budynku przy ul. Targowej 76

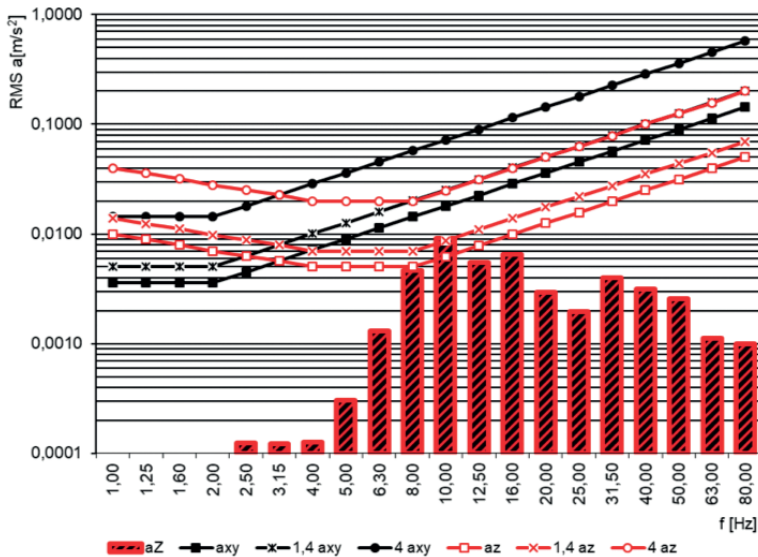
(rys. A. Kowalska-Koczwarą)

W Tab. 3.6 i Tab. 3.7 zestawiono wartości *WODL* wraz z odpowiadającymi im częstotliwościami środkowymi pasma. Zestawiono te wartości *WODL*, w których istnieje podejrzenie, że nastąpiło przekroczenie co najmniej progu odczuwalności drgań przez ludzi.

Tabela 3.6

Wartości *WODL* i odpowiadające im częstotliwości w pasmach, w których spodziewano się przekroczenia progu odczuwalności drgań przez ludzi

<i>WODL</i> [-]	Częstotliwość f [Hz]
2,19	10,0
1,39	8,0
0,89	12,5



Rys. 3.12. Analiza metodą *RMS* wyników uzyskanych podczas przejazdu tramwaju obok budynku przy ul. Targowej 76

(rys. A. Kowalska-Koczwara)

Tabela 3.7

Wartości *WODL* i odpowiadające im częstotliwości w pasmach, w których spodziewano się przekroczenia progu odczuwalności drgań przez ludzi

<i>WODL</i> [-]	Częstotliwość f [Hz]
1,48	10,0
0,93	8,0

W żadnym z zarejestrowanych zdarzeń nie nastąpiło naruszenie warunków zapewnienia niezbędnego komfortu wiibracyjnego. W przypadku trzech zdarzeń został przekroczony próg odczuwalności drgań przez ludzi: dwóch zdarzeń związanych z przejazdem samochodów ciężarowych i jednego zdarzenia związanego z przejazdem tramwaju.

W wyniku analizy metodą *RMS* okazało się, że przejazdy pociągów metra nie generują przekroczeń progu odczuwalności drgań przez ludzi w pomieszczeniu na III piętrze budynku. Przejazdy tramwajów oraz samochodów ciężarowych są odczuwalne w tym pomieszczeniu w porze dziennej.

3.3.2. WYNIKI ANALIZY METODĄ *VDV*

Analizie metodą *VDV* poddano te same zdarzenia, które analizowano metodą *RMS*. Uwzględniano czas trwania zdarzenia, który zmieniał się od 15 do 20 s. Wyniki analizy metodą *VDV* wraz ze zbiorczym zestawieniem wskaźników *WODL* zestawiono w Tab. 3.8.

Tabela 3.8

**Wartości VDV odpowiadające poszczególnym zdarzeniom
oraz maksymalne wartości WODL w tych zdarzeniach**

Lp.	Przejazd pojazdu	Czas trwania zdarzenia [s]	VDV [m/s ^{1,75}]	WODL/f [-/Hz]
1	tramwaj	19	0,078	0,31/10
2	tramwaj	19	0,064	0,54/8
3	tramwaj	19	0,073	0,36/10
4	tramwaj	19	0,090	0,47/10
5	samochód ciężarowy	15	0,173	2,19/10
6	tramwaj	19	0,074	0,40/8
7	tramwaj	19	0,075	0,41/8
8	tramwaj	19	0,058	0,36/10
9	tramwaj	19	0,079	0,48/8
10	samochód ciężarowy	15	0,119	1,03/10
11	autobus	19	0,101	0,94/10
12	tramwaj	15	0,125	1,48/10
13	tramwaj	17	0,114	0,71/16
14	tramwaj	19	0,058	0,32/10
15	metro	19	0,027	0,16/31,5
16	metro	19	0,049	0,14/25
17	metro	20	0,047	0,15/10
18	metro	18	0,033	0,11/25
19	metro	19	0,029	0,08/25
20	metro	19	0,036	0,11/25
21	metro	19	0,036	0,12/31,5
22	metro	19	0,029	0,10/25
23	metro	19	0,031	0,12/25
24	metro	19	0,041	0,12/25

25	metro	19	0,077	0,41/25
26	metro	19	0,047	0,19/25
27	metro	19	0,039	0,14/25
28	metro	19	0,075	0,23/25
29	metro	19	0,056	0,17/25
30	metro	19	0,030	0,07/25

Analiza metodą *VDV* nie wykazała przekroczenia poziomu odpowiadającemu niskiemu prawdopodobieństwu wystąpienia skarg. Tak więc w przypadku budynku przy ul. Targowej 76 wyniki obydwu analiz tylko nieznacznie różnią się od siebie.

3.4. Analiza pomiarów wykonanych w budynku przy ul. Targowej 84

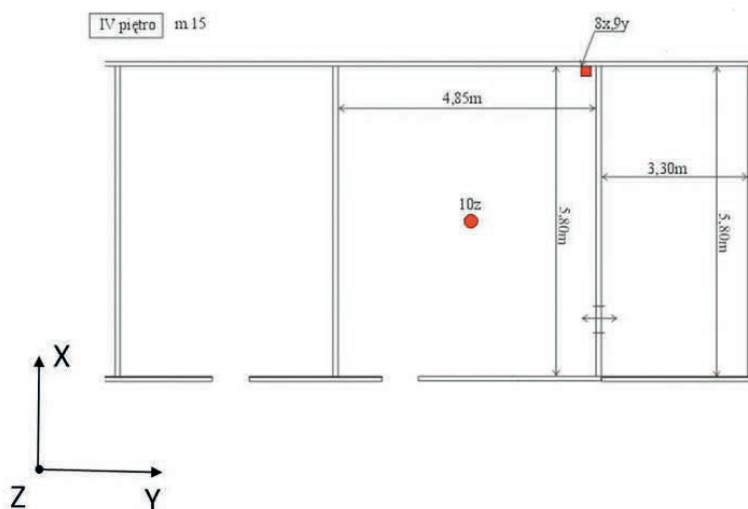
Budynek przy ul. Targowej 84 to pięciokondygnacyjny budynek wykonany w technologii tradycyjnej murowanej poddany wymuszeniu od przejeżdżających tramwajów (Rys. 3.13).



Rys. 3.13. Widok budynku przy ul. Targowej 84
(fot. A. Kowalska-Koczwara)

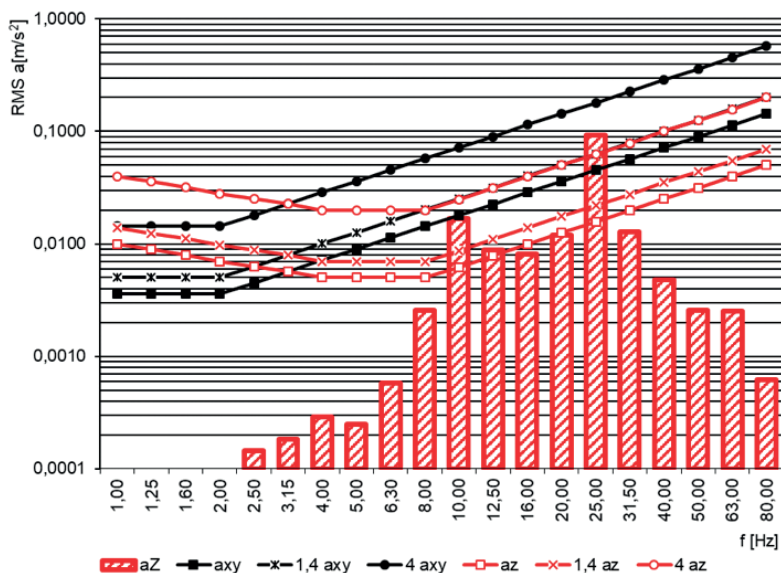
Budynek zlokalizowany jest w odległości 19 m od rozjazdów linii tramwajowych. W odległości 5 m od budynku znajduje się jednocześnie droga kołowa. Budynek zlokalizowany jest nad tunelem metra. Podczas pomiarów w 2008 roku oraz w roku 2015 zarejestrowano wyłącznie przejazdy tramwajów po pobliskich torach. Pozostałe źródła drgań nie występowały podczas rejestracji. Zarejestrowano łącznie 20 zdarzeń, które poddano analizie. Podobnie jak w poprzednich budynkach punkt pomiarowy zlokalizowany był na środku pomieszczenia przeznaczonego na stały pobyt ludzi. Było to pomieszczenie mieszkalne na piątej kondygnacji (udostępnione przez właściciela na czas trwania pomiarów) od strony wymuszenia (Rys. 3.14).

Rys. 3.14. Lokalizacja punktu pomiarowego w budynku przy ul. Targowej 84
(rys. A. Kowalska-Koczwara na podstawie zasobów Laboratorium Badania Odształceń i Drgań Budowli)



3.4.1. WYNIKI ANALIZY METODAMI *RMS* i *MTVV*

Na Rys. 3.15 podano wynik analizy metodą *RMS* przeprowadzonej w odniesieniu do najbardziej niekorzystnego przejazdu.



Rys. 3.15. Analiza metodą *RMS* w odniesieniu do przejazdu tramwaju obok budynku przy ul. Targowej 84

(rys. A. Kowalska-Koczwara)

Wyraźnie widoczne jest przekroczenie progu odczuwalności drgań przez ludzi oraz linii zapewnienia niezbędnego komfortu przy częstotliwości środkowej pasma 25 Hz. W Tab. 3.9 zestawiono wartości wskaźnika *WODL* i odpowiadające im częstotliwości, co do których podejrzewano przekroczenie progu odczuwalności drgań przez ludzi.

Tabela 3.9

Wartości *WODL* i odpowiadające im częstotliwości w pasmach, w których mogło nastąpić przekroczenie progu odczuwalności drgań przez ludzi

<i>WODL</i> [-]	Częstotliwość f [Hz]
5,92	25,0
2,72	10,0
1,14	12,5
0,96	20,0
0,81	16,0

We wszystkich zarejestrowanych zdarzeniach nastąpiło co najmniej przekroczenie progu odczuwalności drgań przez ludzi (wartości wskaźnika *WODL* lokowały się w przedziale od 1,13 do 5,92), a w przypadku 8 z 20 zdarzeń nastąpiło naruszenie warunków niezbędnego komfortu w porze dziennej i nocnej (co stanowi 40% wszystkich zdarzeń). W przypadku tego budynku zarówno analiza *RMS*, jak i *MTVV* wskazują na naruszenie warunków niezbędnego komfortu wibracyjnego.

3.4.2. WYNIKI ANALIZY METODĄ *VDV*

W Tab. 3.10 zestawiono wyniki analizy metodą *VDV* i wartości wskaźników *WODL* uzyskane w odniesieniu do wszystkich rozpatrywanych zdarzeń.

Tabela 3.10

Wartości *VDV* uzyskane w wyniku analizy poszczególnych zdarzeń oraz maksymalne wartości *WODL* odpowiadające tym zdarzeniom

Lp.	Przejazd pojazdu	Czas trwania zdarzenia [s]	<i>VDV</i> [m/s ^{1,75}]	<i>WODL/f</i> [-/Hz]
1	tramwaj	15	0,402	3,06/10
2	tramwaj	15	0,360	4,93/10
3	tramwaj	15	0,316	4,95/10
4	tramwaj	15	0,482	5,37/10
5	tramwaj	15	0,245	2,33/10
6	tramwaj	15	0,404	2,95/10
7	tramwaj	15	0,219	1,95/10
8	tramwaj	15	0,183	1,13/10
9	tramwaj	15	0,283	2,25/10
10	tramwaj	15	0,190	1,95/10
11	tramwaj	15	0,377	3,87/10
12	tramwaj	15	0,462	5,92/10
13	tramwaj	15	0,463	3,62/10
14	tramwaj	15	0,400	4,18/10
15	tramwaj	15	0,301	3,04/10
16	tramwaj	15	0,221	2,65/10
17	tramwaj	15	0,446	4,19/10
18	tramwaj	15	0,483	4,63/25
19	tramwaj	15	0,393	3,98/25
20	tramwaj	15	0,314	4,14/10

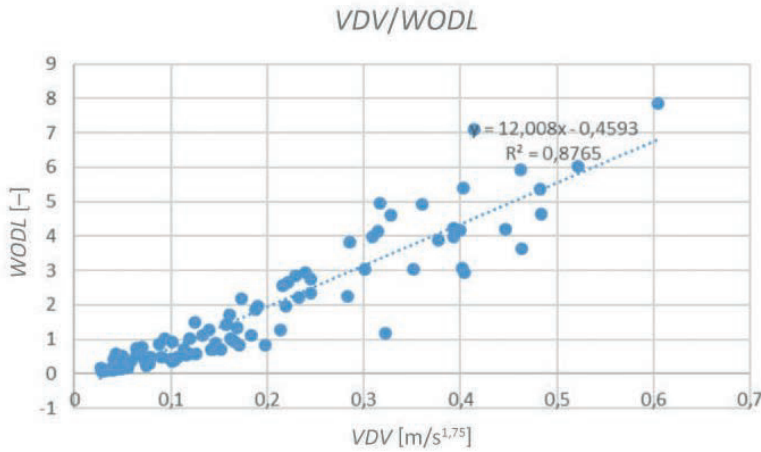
Wyniki analizy metodą *VDV* są podobne do wyników analiz uzyskanych metodą *RMS*. Naruszenie warunków komfortu wibracyjnego utożsamiane z możliwym wystąpieniem skarg

nastąpiło w 8 przypadkach na 20 (40% zdarzeń). W przypadku 10 zdarzeń naruszony został poziom niskiego prawdopodobieństwa wystąpienia skarg.

3.5. Zależność między wskaźnikiem *WODL* a wartością dawki wibracji *VDV*

W wyniku pomiarów przeprowadzonych na wybranych 4 budynkach zarejestrowano 101 zdarzeń: 8 zdarzeń pochodzących od ruchu pojazdów po drodze kołowej, 38 związanych z wymuszeniem przejazdami wagonów metra i 55 spowodowanych przejazdem tramwajów. Budynki były o podobnej konstrukcji i zlokalizowane w podobnej okolicy. Jedynie budynek przy ul. Targowej 76 znajduje się w nieco większej odległości od tunelu metra niż pozostałe budynki, ale mieści się w zasięgu strefy wpływów dla tego typu źródła drgań transportowych.

Liczba zdarzeń pozwala na poszukiwanie pewnych zależności. I tak np. widoczna jest silna zależność między wartościami *WODL* i *VDV*. Najpierw więc podjęto próbę wyznaczenia zależności liniowej między wymienionymi wielkościami. Zestawienie wartości podano na Rys. 3.16.



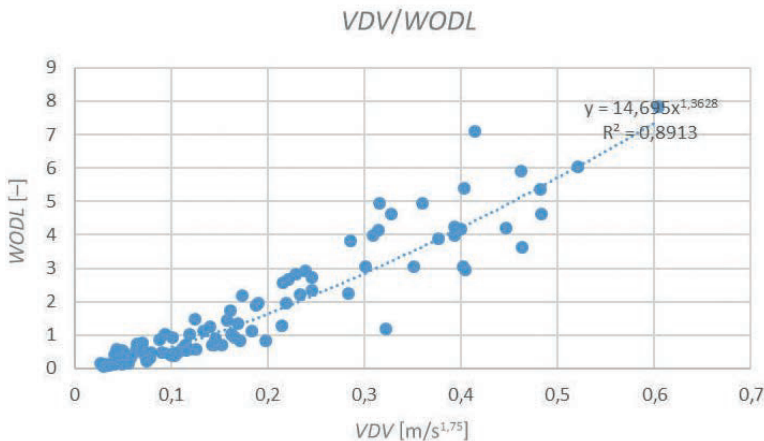
Rys. 3.16. Aproksymacja liniowa pomiędzy wartościami wskaźnika WODL a wartościami dawki wibracji VDV w odniesieniu do 101 zdarzeń pochodzenia transportowego

(rys. A. Kowalska-Koczwarą)

W wyniku aproksymacji liniowej otrzymano następujące równanie:

$$y = 12,008x - 0,4593 \quad (3.1)$$

Współczynnik determinacji R^2 dotyczący wyznaczonej liniowej zależności wynosi 0,8765, co jest bardzo dobrym wynikiem. Jednakże wyższą wartość R^2 równą 0,8913 otrzymano, zakładając aproksymację wykładniczą (Rys. 3.17). Dlatego też w dalszej części niniejszego rozdziału posługiwano się już wyłącznie aproksymacją wykładniczą.



Rys. 3.17. Aproksymacja wykładnicza pomiędzy wartościami wskaźnika WODL a wartościami dawki wibracji VDV w odniesieniu do 101 zdarzeń pochodzenia transportowego

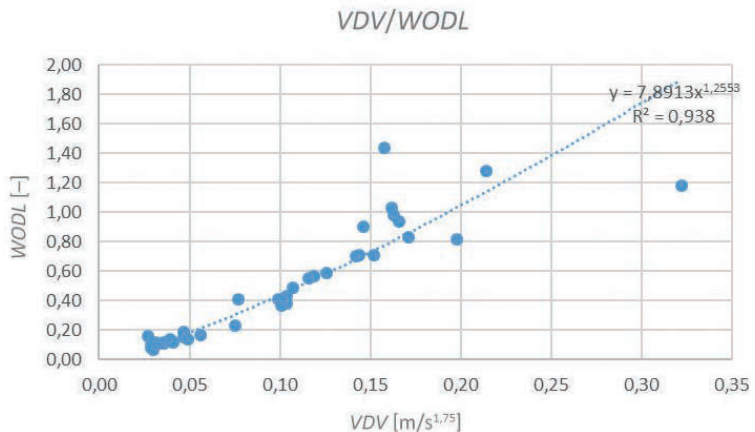
(rys. A. Kowalska-Koczwarą)

Równanie wykładnicze (3.2) otrzymane przy założeniu aproksymacji wykładniczej lepiej opisuje zależność między wartością *WODL* a wartością dawką wibracji *VDV*:

$$y = 14,695x^{1,3628} \quad (3.2)$$

Ze względu na wystarczającą statystycznie liczbę zdarzeń zarejestrowanych przejazdów pociągów metra oraz przejazdów tramwajów wyznaczono także zależności pomiędzy wartościami *WODL* a wartościami dawki wibracji *VDV* w odniesieniu do tych dwóch źródeł drgań transportowych. Na Rys. 3.18 i Rys. 3.19 przedstawiono te zależności, wybierając aproksymacje z najwyższą wartością współczynnika determinacji R^2 .

Rys. 3.18. Aproksymacja wykładnicza pomiędzy wartościami wskaźnika *WODL* a wartościami dawki wibracji *VDV* w odniesieniu do 38 zdarzeń wywołanych przejazdami pociągów metra
(rys. A. Kowalska-Koczwara)

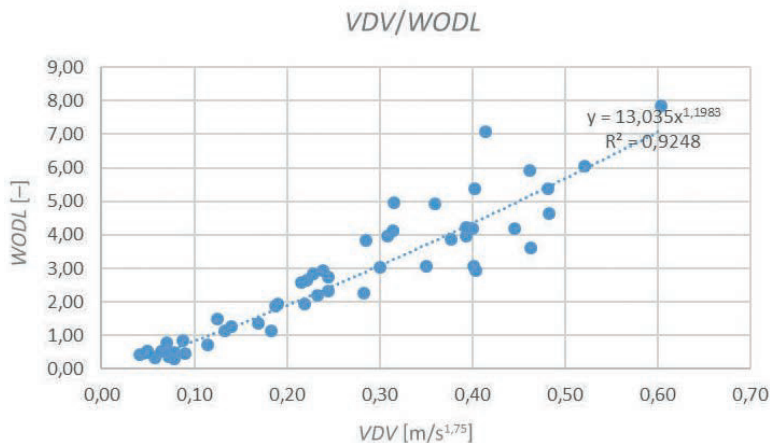


Zależność pomiędzy wartością wskaźnika *WODL* a wartością *VDV* w odniesieniu do zdarzeń związanych z przejazdami pociągów metra (Rys. 3.18) opisuje wzór (3.3) ze współczynnikiem determinacji $R^2 = 0,938$:

$$y = 7,8913x^{1,2553} \quad (3.3)$$

W odniesieniu do 55 zdarzeń związanych z przejazdami tramwajów w pobliżu wybranych czterech budynków zależność między wartością wskaźnika *WODL* a wartością dawki vibracji *VDV* przedstawiono na Rys. 3.19 i opisano wzorem (3.4) ze współczynnikiem determinacji równym $R^2 = 0,9248$:

$$y = 13,035x^{1,1983} \quad (3.4)$$



Rys. 3.19. Aproksymacja wykładnicza pomiędzy wartościami wskaźnika *WODL* a wartościami dawki vibracji *VDV* w odniesieniu do 55 zdarzeń pochodzących od przejazdów tramwajów (rys. A. Kowalska-Koczwarą)

Na podstawie przeprowadzonej procedury aproksymacji widać wyraźnie, iż opis zależności między wartościami *WODL* i *VDV* jest najmniej wiarygodny w odniesieniu do przejazdów pociągów metra w przedziale $VDV > 0,2$. Tam bowiem dysponowano niewielką liczbą wyników analiz.

W jednym z analizowanych opisów stosunkowo dobrze identyfikowane są zdarzenia, w których ocena dotyczy zakwalifikowania drgań jako nieodczuwalnych przez człowieka.

4. WPŁYW DŁUGOŚCI CZASU TRWANIA DRGAŃ NA OCENĘ ODCZUWALNOŚCI DRGAŃ PRZEZ LUDZI W BUDYNKACH

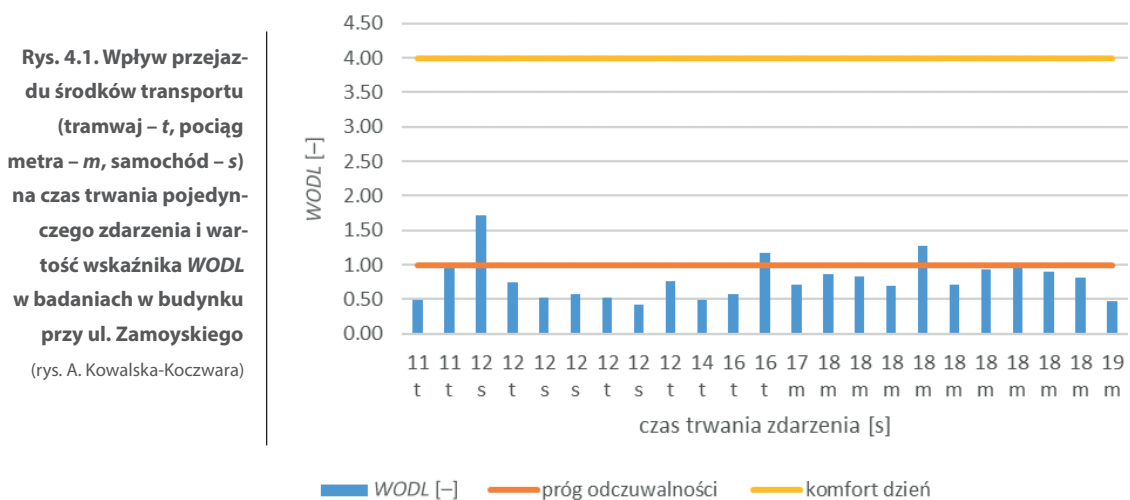
Wynik oceny wpływu drgań na ludzi przebywających w budynkach zależy od czasu trwania drgań, który uwzględnia się w obliczeniach wartości *RMS*. W niniejszym rozdziale przedstawiono wyniki badania tego wpływu na wynik oceny. Zbadano więc, czy występuje związek pomiędzy czasem trwania pojedynczych zdarzeń a wynikami analizy metodami *RMS* i *VDV*, a następnie zbadano, jak wpływa czas rejestracji na wynik tych analiz.

4.1. Wpływ typu przejazdu środka transportu na czas trwania pojedynczych zdarzeń

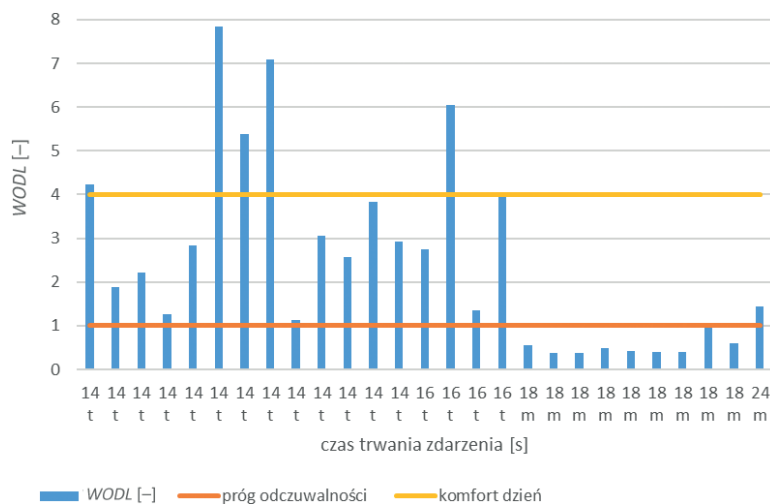
W tej części rozważań posłużono się wynikami pomiarów zarejestrowanych w budynkach przy ul. Zamoyskiego, ul. Targowej 15, ul. Targowej 76 i ul. Targowej 84 w Warszawie. Budynki te wraz z metodyką przeprowadzonych pomiarów zostały opisa-

ne w poprzednim rozdziale. Na Rys. 4.1–4.4 zestawiono wyniki badania wpływu typu środka transportu i czasu trwania pojedynczego zdarzenia na ocenę drgań wyrażoną za pomocą wskaźnika *WODL*. Na rysunkach zaznaczono linie odpowiadające: progowi odczuwalności drgań w kierunku *z* oraz zapewnieniu warunków niezbędnego komfortu wibracyjnego ludzi przebywających w budynkach w dzień.

Z wyników zamieszczonych na Rys. 4.1–4.4 wpływ środków transportu na czas trwania poszczególnych zdarzeń nie jest możliwy do opisanego za pomocą wybranej funkcji. Przykładowo na Rys. 4.4 zamieszczono wyniki uzyskane z pomiarów w budynku przy ul. Targowej 84, w którym czas trwania drgań wyznaczony wg zasady opisanej tu w rozdz. 2.1 na Rys. 2.2 zgodnie z normą [95] wynosi ok. 15 s w każdym zdarzeniu.

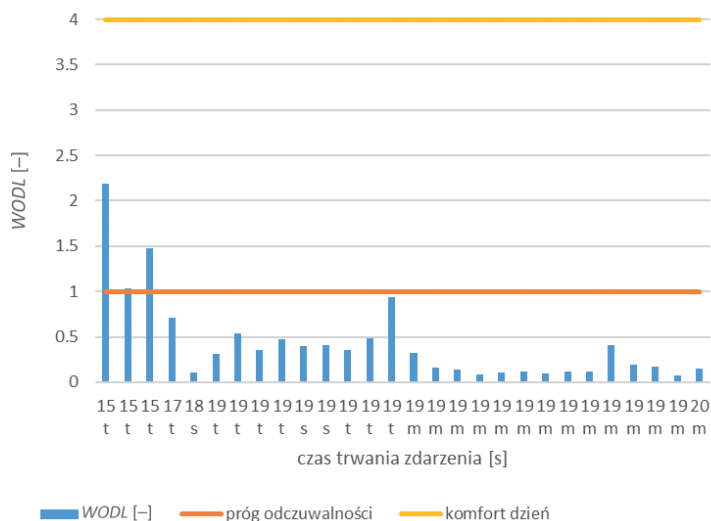


Wartości *WODL* w tych badaniach zmieniały się od 1,13 do 5,92, czyli od przekroczenia progu odczuwalności drgań przez ludzi do naruszenia wymaganego komfortu w porze dziennej przy stałej wartości czasu trwania zdarzenia.



Rys. 4.2. Wpływ przejazdu środków transportu (tramwaj – *t*, pociąg metra – *m*) na czas trwania pojedynczego zdarzenia i wartość wskaźnika *WODL* w badaniach w budynku przy ul. Targowej 15

(rys. A. Kowalska-Koczwara)

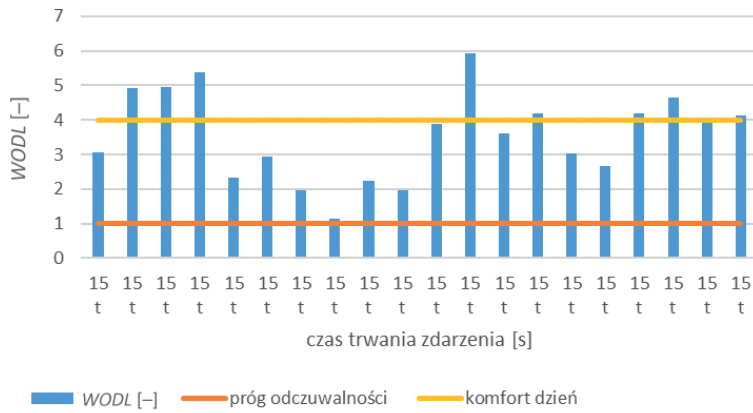


Rys. 4.3. Wpływ przejazdu środków transportu (tramwaj – *t*, pociąg metra – *m*, samochód – *s*) na czas trwania pojedynczego zdarzenia i wartość wskaźnika *WODL* w badaniach w budynku przy ul. Targowej 76

(rys. A. Kowalska-Koczwara)

Rys. 4.4. Wpływ przejazdu środków transportu (tramwaj – t) na czas trwania pojedynczego zdarzenia i wartość wskaźnika WODL w badaniach w budynku przy ul. Targowej 84

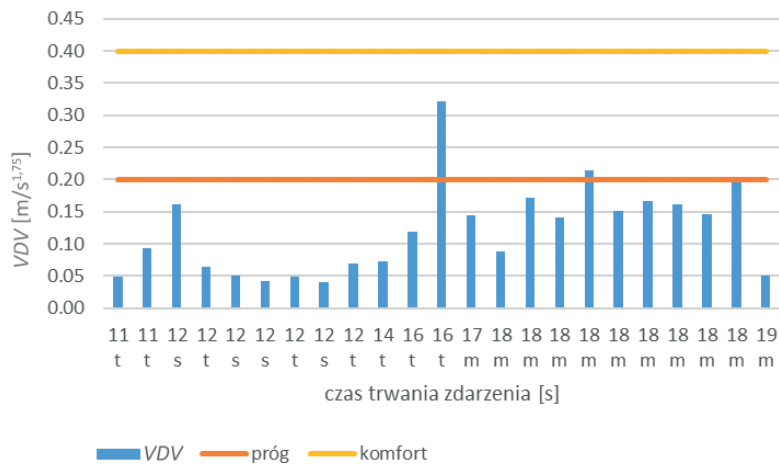
(rys. A. Kowalska-Koczwara)

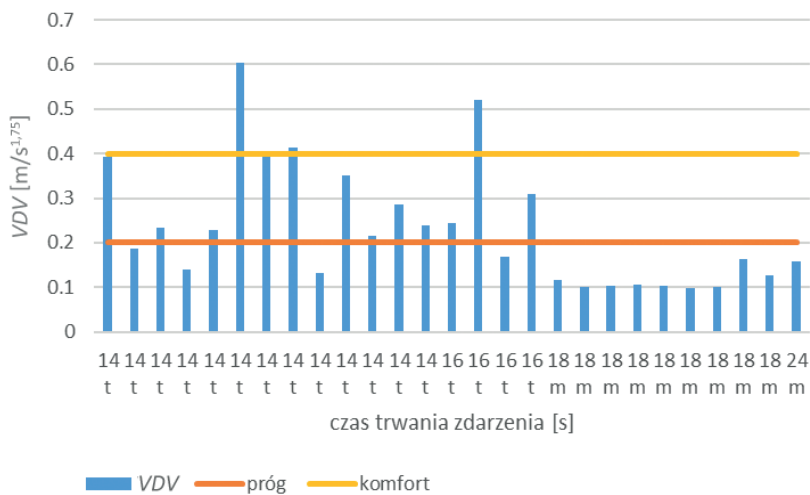


Analogiczną analizę dotyczącą wpływu rodzaju transportu i czasu trwania drgań na wynik oceny wyrażonej za pomocą wartości dawki wibracji VDV przedstawiono na Rys. 4.5–4.8. Podobnie jak w poprzednio opisanych rysunkach, na Rys. 4.5–4.8 zamieszczono linie odpowiadające progowi odczuwalności drgań w kierunku z oraz zapewnienia niezbędnego komfortu wibracyjnego w dzień.

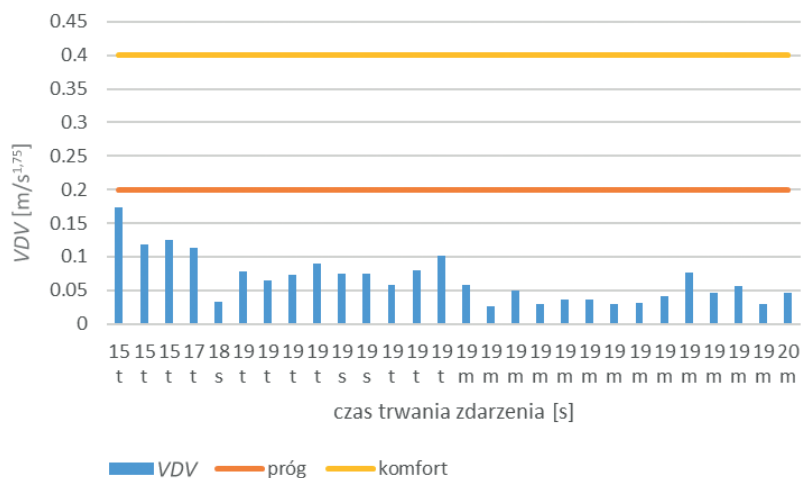
Rys. 4.5. Wpływ przejazdu środków transportu (tramwaj – t, pociąg metra – m, samochód – s) na czas trwania pojedynczego zdarzenia i wartość VDV w badaniach budynku przy ul. Zamojskiego

(rys. A. Kowalska-Koczwara)



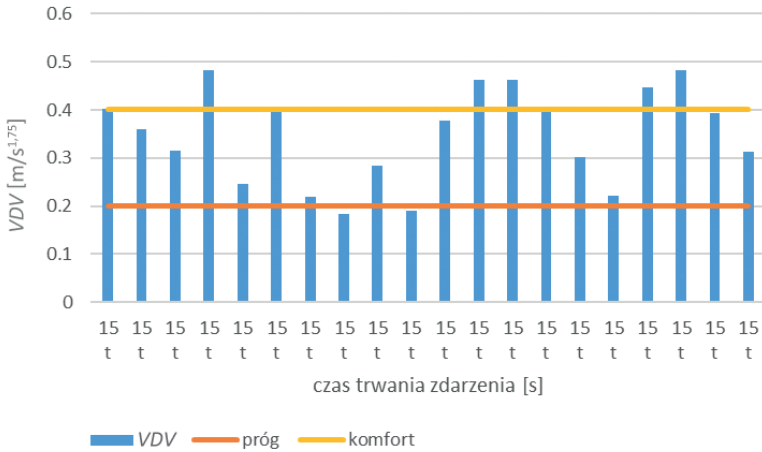


Rys. 4.6. Wpływ przejazdu środków transportu (tramwaj – t, pociąg metra – m) na czas trwania pojedynczego zdarzenia i wartość VDV w badaniach w budynku przy ul. Targowej 15
(rys. A. Kowalska-Koczwara)



Rys. 4.7. Wpływ przejazdu środków transportu (tramwaj – t, pociąg metra – m, samochód – s) na czas trwania pojedynczego zdarzenia i wartość VDV w badaniach w budynku przy ul. Targowej 76
(rys. A. Kowalska-Koczwara)

Rys. 4.8. Wpływ przejazdu środków transportu (tramwaj – t) na czas trwania pojedynczego zdarzenia i wartość VDV w badaniach w budynku przy ul. Targowej 84
(rys. A. Kowalska-Koczwara)



Wartość VDV w badaniach przedstawionych na Rys. 4.5–4.8 zmieniała się niezależnie od czasu trwania drgań od wartości 0,033 do 0,483. Przykładowo na Rys. 4.8 dla stałej wartości czasu trwania drgań wartość VDV zmieniała się od wartości 0,183 (poniżej wartości poziomu niskiego prawdopodobieństwa wystąpienia skarg odpowiadającemu progowi odczuwalności drgań przez ludzi) do wartości 0,483 (powyżej wartości poziomu możliwego wystąpieniem skarg utożsamianego z naruszeniem warunków komfortu wibracyjnego).

Na podstawie informacji zestawionych na Rys. 4.1–4.8 zauważa się, iż w odniesieniu do pojazdów szynowych czas trwania drgań wyznaczony przy przejazdach tramwajowych jest krótszy od wyznaczonego w odniesieniu do czasu trwania drgań wywołanego przejazdami pociągów metra. W odniesieniu do przejazdów tramwajowych najczęściej wynosi on 11–15 s, a w odniesieniu do przejazdów pociągów metra

18–19 s. Analizy dotyczące przejazdów samochodów odnosiły się do zbyt małej liczby zdarzeń, a czas trwania drgań odpowiadający tym zdarzeniom obejmował różne warunki przejazdu. Zauważa się, iż przy ustabilizowanej prędkości przejazdów i długości pojazdów (tramwaj, pociągi metra) czas trwania drgań w różnych pomiarach niewiele się zmienia.

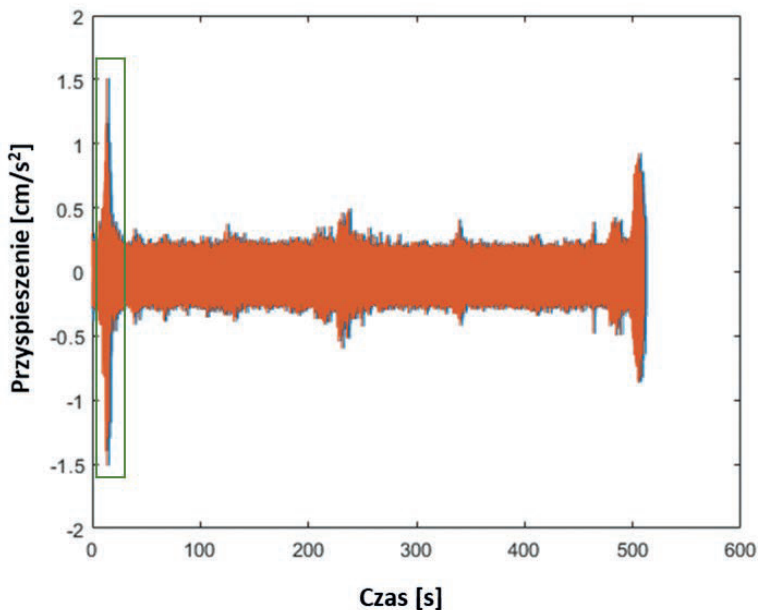
4.2. Wpływ czasu rejestracji na wynik oceny wpływu drgań na ludzi w budynkach

Zgodnie z normą ISO [45] reprezentatywną próbką mogącą posłużyć do oceny wpływu drgań na ludzi jest sygnał co najmniej 30 min. Dotyczy to zarówno analizy metodą *RMS*, jak i tzw. dodatkowych parametrów oceny metodą *MTVV* i metodą *VDV*. Zgodnie z polską normą [95] do oceny wpływu drgań na ludzi wystarczy analizować jedno zdarzenie, najbardziej niekorzystne, wybrane ze zbioru zdarzeń. Norma polska jest więc pod tym względem bardziej wymagająca, wynik analizy sygnału trwającego 15 sekund bowiem będzie się znacząco różnić od analizy przeprowadzonej podczas pełnego czasu rejestracji trwającego nawet kilka minut. Warto też zauważyć, że w przypadku analizy metodą *VDV* czas narażenia człowieka na drgania ma kluczowe znaczenie na wynik oceny.

4.2.1. CZAS REJESTRACJI POWYŻEJ 7 MINUT

W celu zbadania, jak duży wpływ na wartość wskaźnika *RMS* oraz wartość dawki wibracji *VDV* ma czas rejestracji, przeanalizowano dwa wibrogramy o podobnym czasie rejestracji, ale różnej strukturze:

- pierwszy wibrogram – rejestracja 8,5 min., w trakcie której zarejestrowano przejazd dwóch pociągów (Rys. 4.9).

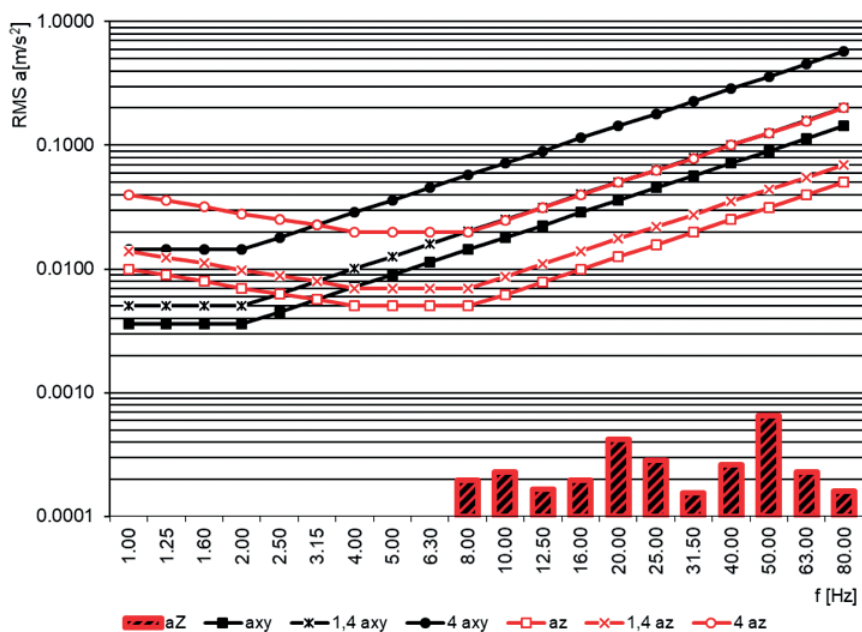


Rys. 4.9. Długi sygnał z zarejestrowanymi przejazdami dwóch pociągów

(rys. A. Kowalska-Koczwara)

Wynik analizy metodą *RMS* całego zarejestrowanego sygnału podano na Rys. 4.10. Następnie z zarejestrowanego długiego sygnału wycięto początkowy fragment zaznaczony ramką na Rys. 4.9, przedstawiający przejazd pojedynczego pociągu (Rys. 4.11), który poddano analizie metodą *RMS* (Rys. 4.12).

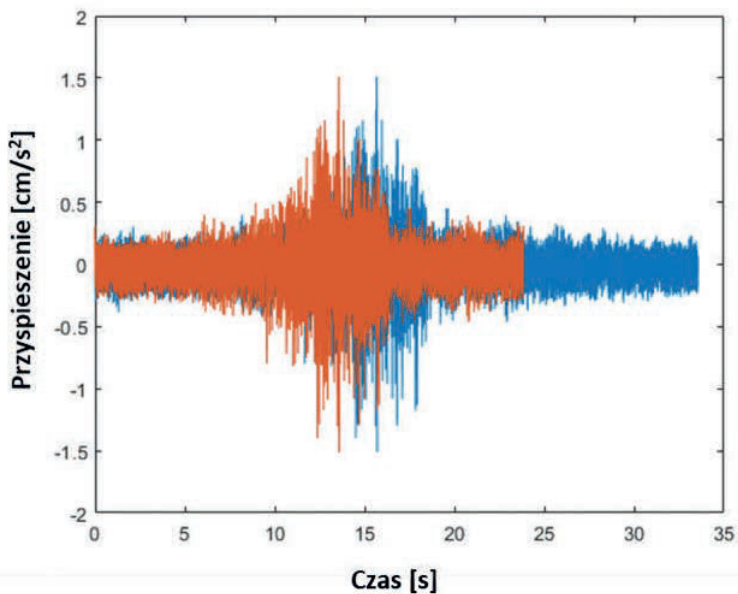
Na Rys. 4.11 podano wibrogramy przed (kolor niebieski) i po odcięciu sygnału zawierającego wartości większe od 0,2 maksymalnej wartości szczytowej (kolor pomarańczowy). W odniesieniu do wibrogramu długiego oraz do odpowiadajacemu pojedynczemu zdarzeniu zostały wyznaczone wartości VDV , które zestawiono wraz z wartościami $WODL$ w Tab. 4.1.



Rys. 4.10. Wynik analizy metodą RMS wibrogramu uzyskane-go podczas przejazdu dwóch pociągów

(rys. A. Kowalska-Koczwara)

4.11. Wibrogram z pojedynczego zdarzenia przed (kolor niebieski) i po odcięciu na poziomie 0,2 wartości szczytowej (kolor pomarańczowy)
(rys. A. Kowalska-Koczwarą)



Rys. 4.12. Wynik analizy metodą *RMS* dla wibrogramu uzyskanego podczas przejazdu jednego pociągu
(rys. A. Kowalska-Koczwarą)

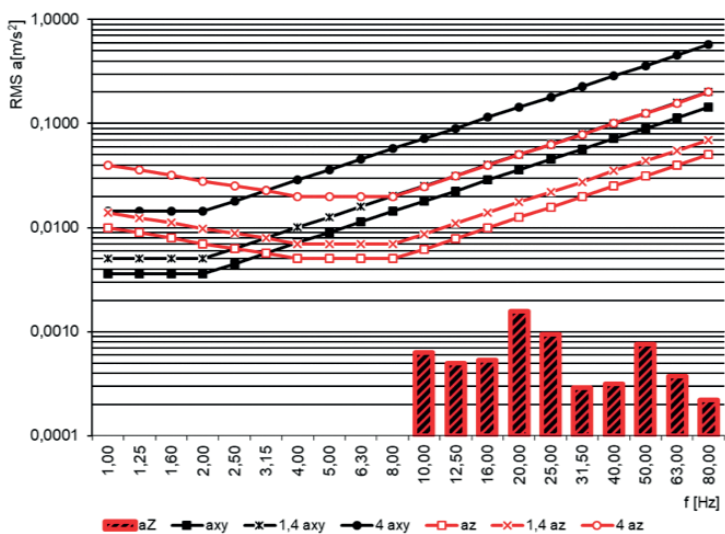


Tabela 4.1

Wartości VDV oraz maksymalne wartości WODL uzyskane z analizy wibrogramu z przejazdu 2 pociągów i wibrogramu odpowiadającego przejazdowi pojedynczego pociągu

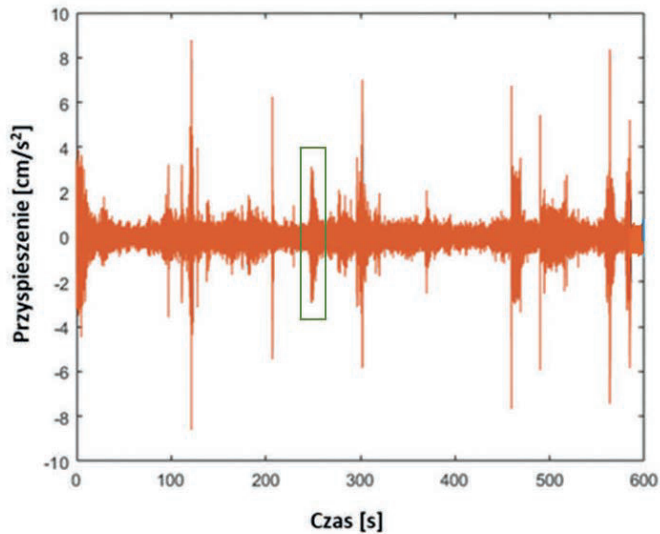
Lp.	Przejazd	Czas trwania zdarzenia [s]	VDV [m/s ^{1,75}]	WODL/f [-/Hz]
1	Dwóch pociągów	520	0,049	0,04/8
2	Jednego pociągu	24	0,025	0,13/20

Wyniki analizy metodą *RMS* oraz metodą *VDV* różnią się znacząco w przypadku obydwu wibrogramów. Chociaż przy tak niskim poziomie wymuszenia nie wpływa to na ocenę odczuwalności drgań przez ludzi, to jednak warto zauważyć, że dawka wibracji *VDV* jest czuła na czas trwania drgań, natomiast analiza metodą *RMS* poprzez uśrednianie wartości jest wrażliwa na wartości szczytowe:

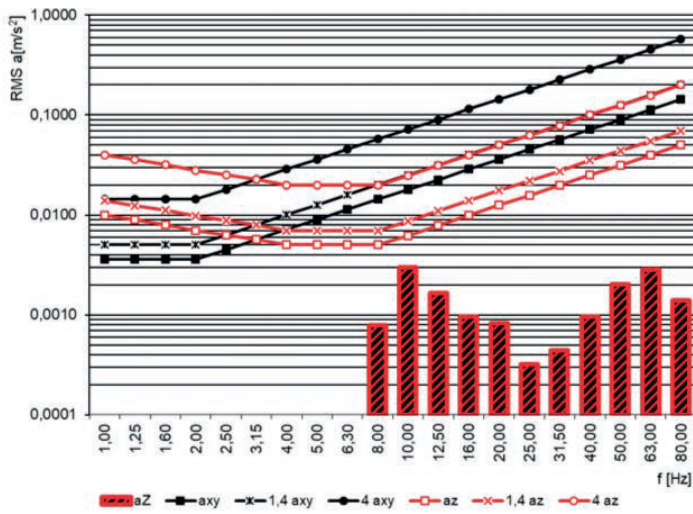
- drugi wibrogram – rejestracja ok. 10 min. (600 s) z różnymi zdarzeniami (Rys. 4.13).

Tym razem do analizy wybrano sygnał z zarejestrowanymi kilkoma zdarzeniami w celu sprawdzenia, jak liczba zdarzeń wpłynie na wynik oceny przeprowadzonej przy pomocy obydwu metod. Wibrogram wyjściowy przedstawiony na Rys. 4.13 obejmuje 580 s.

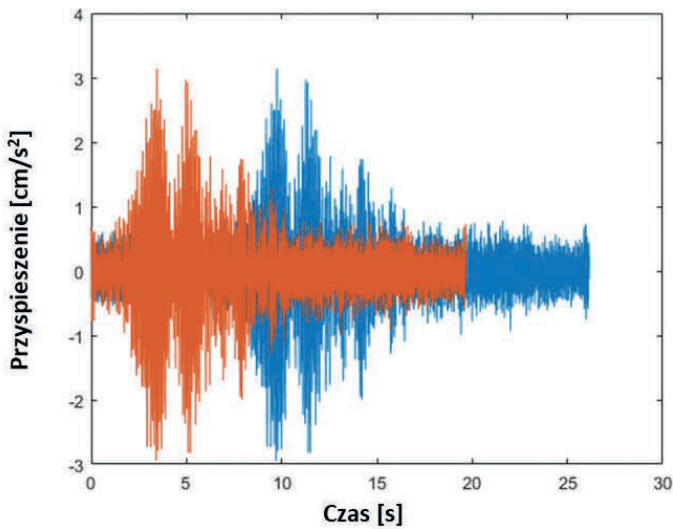
Rys. 4.13. Wibrogram
10-minutowy z zarejestrowa-
nymi różnymi zdarzeniami
(rys. A. Kowalska-Koczwarą)



Wykonano analizę metodą *RMS* (Rys. 4.14) i metodą *VDV* całego wibrogramu oraz wybranego zdarzenia (Rys. 4.15 i 4.16). Wybrano zdarzenie zaznaczone ramką na wibrogramie wyjściowym (Rys. 4.14). Wybór zdarzenia związany był z jego identyfikacją jako zdarzenia pochodzącego od przejazdu środka transportu. W pozostałych zarejestrowanych zdarzeniach widocznych na wibrogramie wyjściowym posiadają występują zakłócenia od źródeł wewnętrznych. Czas trwania drgań w wybranym zdarzeniu wynosi ok. 20 s (wibrogram opisany kolorem pomarańczowym na Rys. 4.15). Wyniki analizy w postaci wartości *WODL* i *VDV* zestawiono w Tab. 4.2.



Rys. 4.14. Wynik analizy metodą RMS wibrogramu wyjściowego z wieloma zdarzeniami (czas trwania 580 s)
(rys. A. Kowalska-Koczwarą)



Rys. 4.15. Wibrogram z pojedynczego zdarzenia przed (kolor niebieski) i po odcięciu tej części, w której wartości są mniejsze od 0,2 wartości szczytowej (kolor pomarańczowy)
(rys. A. Kowalska-Koczwarą)

Rys. 4.16. Wynik analizy metodą RMS dla wibrogramu z pojedynczego zdarzenia
(rys. A. Kowalska-Koczwar)

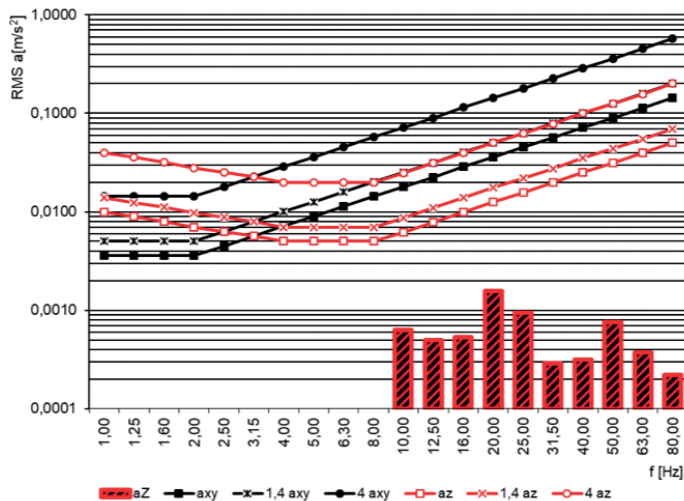


Tabela 4.2

Wartości *VDV* oraz maksymalne wartości *WODL* dla wibrogramu z zarejestrowanymi różnymi przejazdami środków transportu i wibrogramu dla przejazdu pojedynczego pociągu

Lp.	Wibrogram przyjęty do analizy	Czas trwania zdarzenia [s]	<i>VDV</i> [m/s ^{1,75}]	<i>WODL/f</i> [-/Hz]
1	Wyjściowy 10 min	580	0,107	0,48/10
2	Odpowiadający pojedynczemu zdarzeniu	20	0,120	0,86/10

W przypadku analiz metodami *RMS* i *VDV* w odniesieniu do wibrogramu z zarejestrowanymi wieloma zdarzeniami wyniki analiz różnią się od siebie. Wartości *WODL* i wartości *VDV* otrzymane w wyniku analizy sygnału wyjściowego są mniejsze niż wartości tych wskaźników otrzymane w wyniku analizy wybranego zdarzenia związanego z przejazdem środka transportu. Czas trwania drgań wzięty do analizy wpływa zarówno na wynik analizy metodą *RMS*, jak i metoda *VDV*.

4.2.2. CZAS REJESTRACJI POWYŻEJ 15 MINUT

W celu zbadania wpływu czasu rejestracji powyżej 15 minut na wynik oceny wpływu drgań na ludzi przebywających w budynkach wybrano dwa wibrogramy zarejestrowane w budynkach, w których wystąpiło przekroczenie naruszenie wymagań odnośnie do zapewnienia komfortu w porze dziennej przy rozważaniu pojedynczych zarejestrowanych zdarzeń. Obydwa budynki znajdują się w Krakowie przy al. Jana Pawła II. Są to budynki dwukondygnacyjne, zbudowane w technologii tradycyjnej murowanej (Rys. 4.17 i Rys. 4.18). Wymuszenie drgań stanowiły przejazdy tramwajów po pobliskim torze: w przypadku budynku A tory znajdowały się w odległości 15 m, a w przypadku budynku B w odległości 13,8 m. W obydwu obiektach punkt pomiarowy umiejscowiony był w środku rozpiętości stropu pomieszczenia znajdującego się na najwyższej kondygnacji (Rys. 4.19 i 4.20).



Rys. 4.17. Widok elewacji frontowej budynku A
(fot. A. Kowalska-Koczwarą)

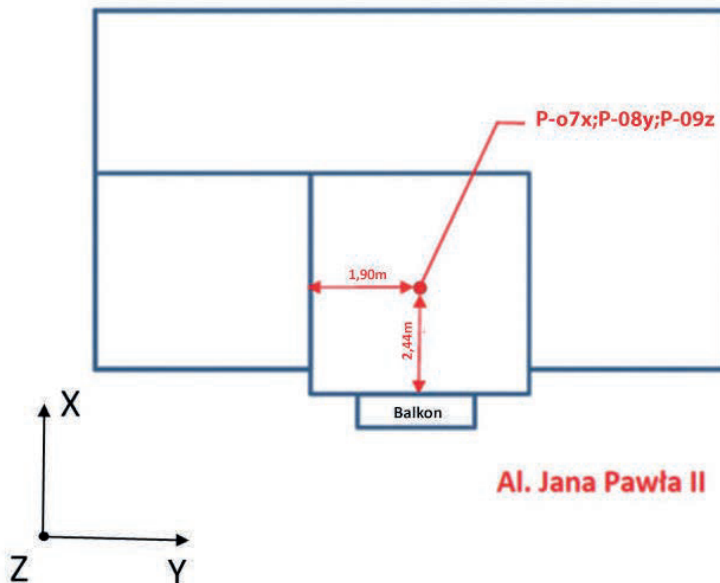
4.18. Widok elewacji frontowej budynku B

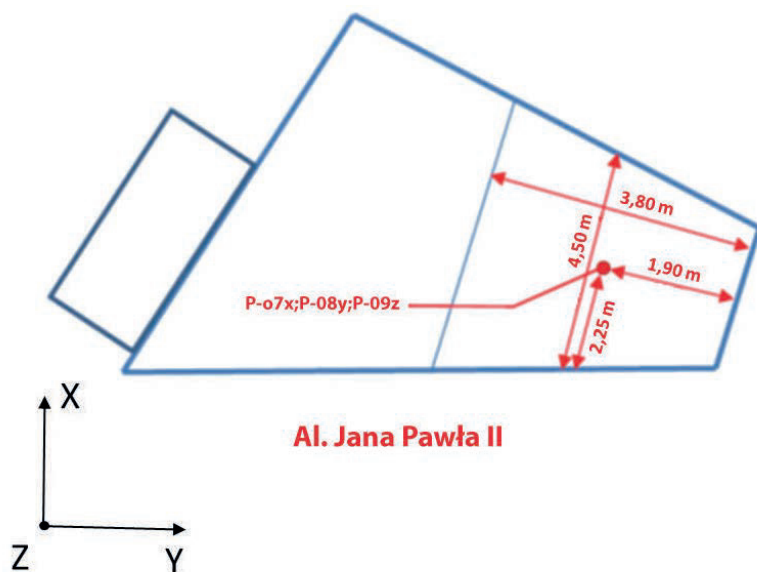
(fot. A. Kowalska-Koczwara)



Rys. 4.19. Lokalizacja punktu pomiarowego w budynku A

(rys. A. Kowalska-Koczwara na podstawie zasobów Laboratorium Badania Odształceń i Drgań Budowli)



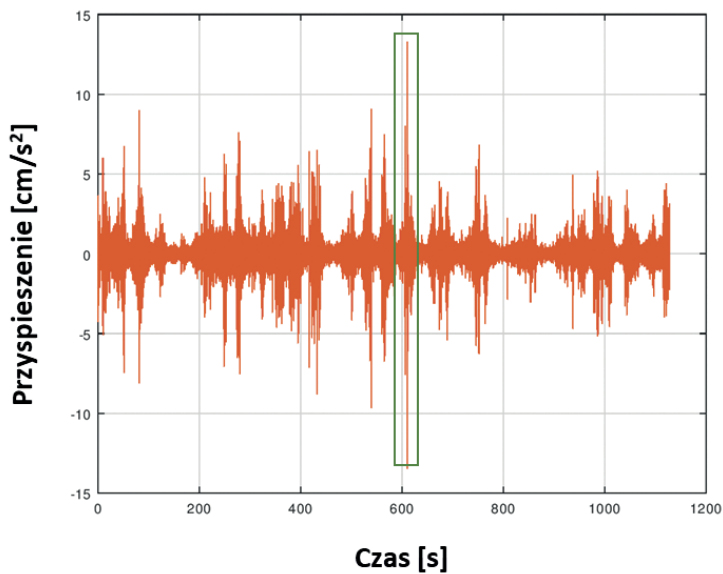


Rys. 4.20. Lokalizacja punktu pomiarowego w budynku B

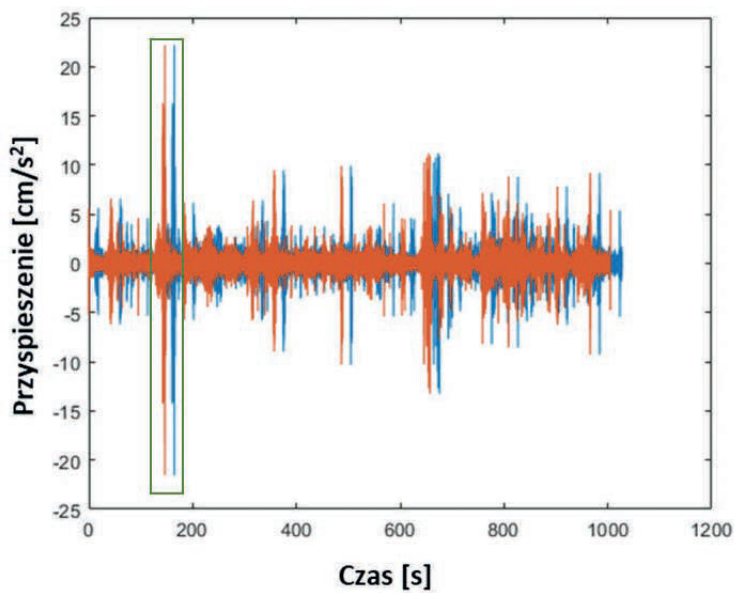
(rys. A. Kowalska-Koczwara na podstawie zasobów Laboratorium Badania Odształceń i Drgań Budowli)

Zarejestrowano dwa wibrogramy trwające powyżej 15 minut, które poddano analizie metodami *RMS* i *VDV*. Z wibrogramów wybrano pojedyncze zdarzenia, które także poddano analizom przy pomocy obydwu metod. W każdym wibrogramie dokonano obcięcia sygnału zgodnie z zasadą przyjętą w [95] wyznaczania czasu trwania drgań. Tak przygotowane dane były uwzględniane w algorytmie metody *RMS* oraz metody *VDV*. Na Rys. 4.21 i 4.22 zestawiono wibrogramy przed i po odcięciu sygnału. Wibrogram zarejestrowany w budynku A nieznacznie różni się od sygnału wyjściowego, natomiast w wibrogramie zarejestrowanym w budynku B została odcięta skrajna część sygnału (Rys. 4.22).

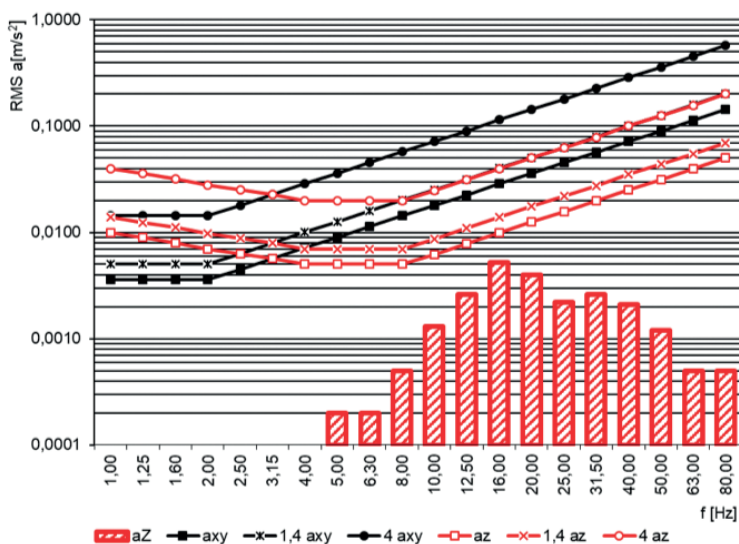
Rys. 4.21. Wibrogram zarejestrowany w budynku A przed (kolor niebieski) i po odcięciu zgodnie z zasadą wyznaczania czasu trwania drgań (kolor pomarańczowy) (rys. A. Kowalska-Koczwarą)



Rys. 4.22. Wibrogram zarejestrowany w budynku B przed (kolor niebieski) i po odcięciu zgodnie z zasadą wyznaczania czasu trwania drgań (kolor pomarańczowy) (rys. A. Kowalska-Koczwarą)

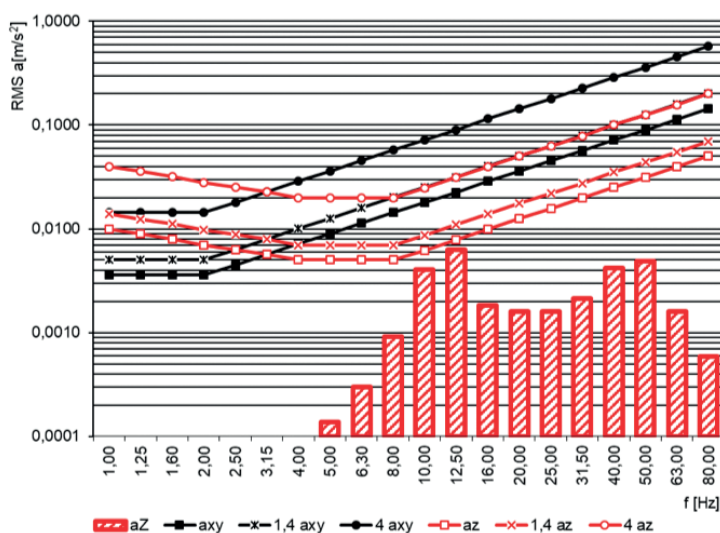


Wyniki analizy metodą *RMS* w pasmach 1/3-oktawowych przeprowadzonej dla całej długości zarejestrowanych sygnałów zestawiono na Rys. 4.23 i 4.24, odpowiednio w odniesieniu do budynku A i B.



Rys. 4.23. Wynik analizy metodą *RMS* wibracji dla budynku A

(rys. A. Kowalska-Koczwara)



Rys. 4.24. Wynik analizy metodą *RMS* wibracji dla budynku B

(rys. A. Kowalska-Koczwara)

Obydwa wibrogramy zostały także analizowane metodą *VDV*. Wyniki wartości *VDV* wraz z wartościami *WODL* zestawiono w Tab. 4.3. Kolorem żółtym zaznaczono wartość o niskim prawdopodobieństwie wystąpienia skarg.

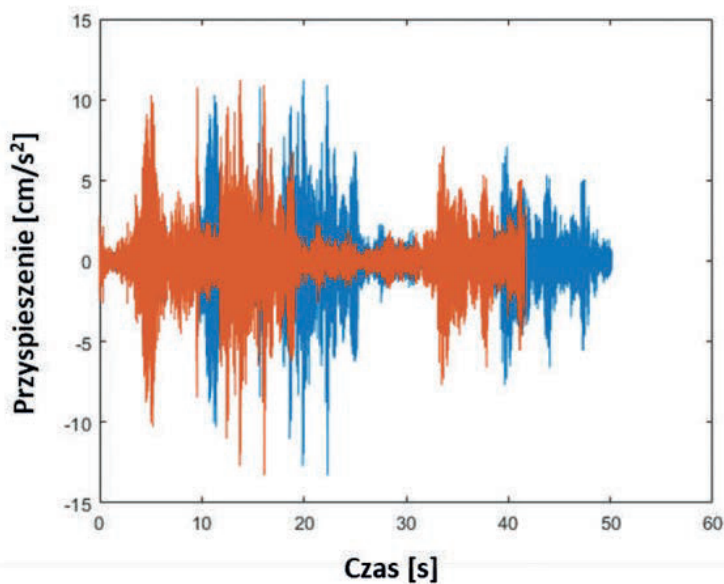
Tabela 4.3

Wartości *VDV* oraz maksymalne wartości *WODL* dla wibrogramów dla budynków A i B

Lp.	Nazwa pomiaru	Czas trwania zdarzenia [s]	<i>VDV</i> [m/s ^{1,75}]	<i>WODL/f</i> [-/Hz]
1	Budynek A	1023	0,187	0,52/16
2	Budynek B	1024	0,248	0,81/12,5

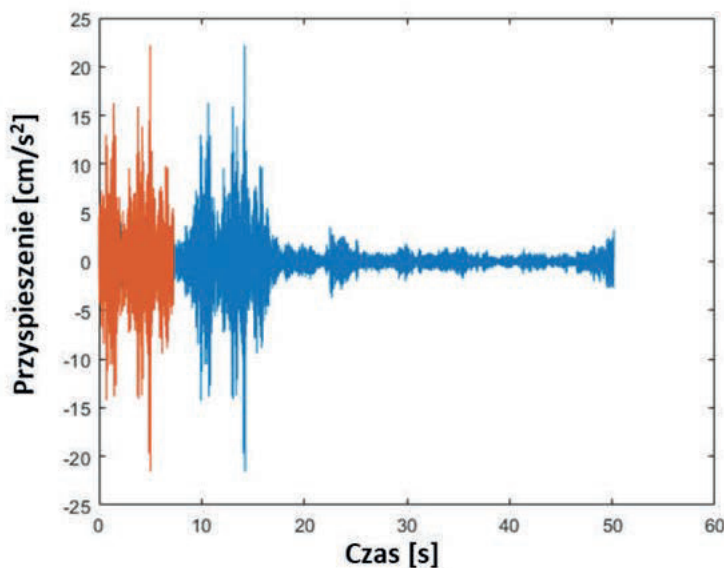
Wartości wskaźnika *WODL* w odniesieniu 17-minutowych wibrogramów odpowiadającym drganiom klasyfikowanym poniżej progu odczuwalności drgań przez ludzi. Wartość dawki wibracji *VDV* w odniesieniu do budynku A znajduje się poniżej poziomu niskiego prawdopodobieństwa wystąpienia skarg ze strony mieszkańców, podczas gdy wartość *VDV* w odniesieniu do budynku B znajduje się powyżej tego poziomu.

Podobnie jak w przypadku wibrogramów z przedziału 7–15 minut (rozdział 4.2.1) z całego zarejestrowanego wibrogramu wybrano pojedyncze zdarzenia, które poddano podobnym analizom. Wybrano zdarzenia o największej wartości szczytowej (zaznaczone w ramach na Rys. 4.21 i na Rys. 4.22). Wibrogramy oraz wyniki analizy metodą *RMS* podano na Rys. 4.25–4.28, natomiast wartości dawki wibracji *VDV* i wskaźnika *WODL* zestawiono w Tab. 4.4.



Rys. 4.25. Wibrogram pojedynczego zdarzenia w budynku A przed (kolor niebieski) i po odcięciu zgodnie z zasadą wyznaczania czasu trwania drgań (kolor pomarańczowy)

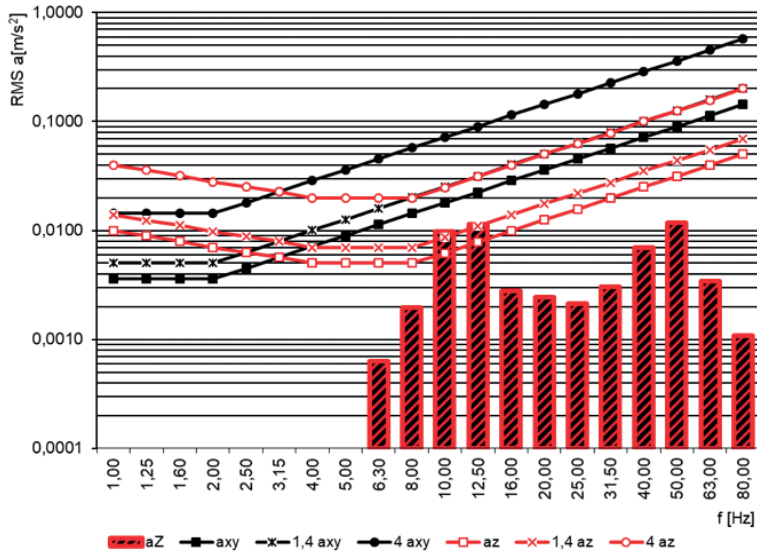
(rys. A. Kowalska-Koczwara)



Rys. 4.26. Wibrogram pojedynczego zdarzenia w budynku B przed (kolor niebieski) i po odcięciu zgodnie z zasadą wyznaczania czasu trwania drgań (kolor pomarańczowy)

(rys. A. Kowalska-Koczwara)

Rys. 4.27. Wynik analizy metodą RMS wibrogramu pojedynczego zdarzenia w budynku A
(rys. A. Kowalska-Koczwarą)



Rys. 4.28. Wynik analizy metodą RMS wibrogramu pojedynczego zdarzenia w budynku B
(rys. A. Kowalska-Koczwarą)

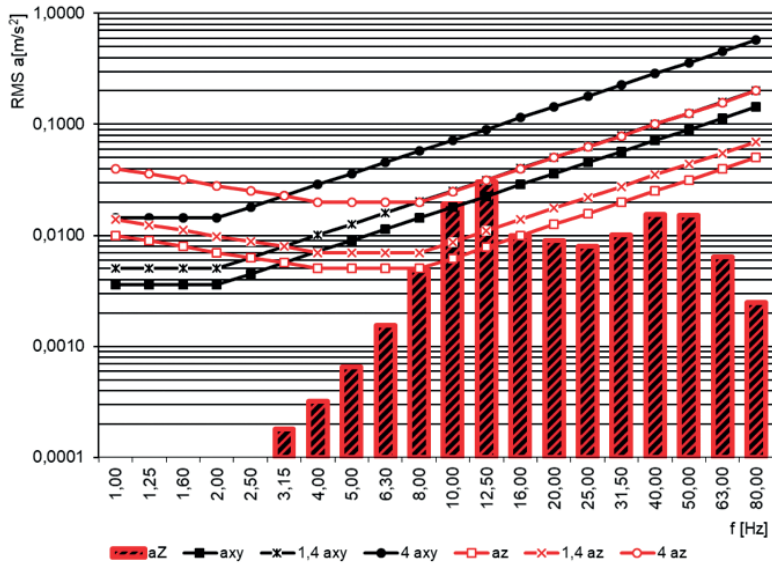


Tabela 4.4

**Wartości VDV oraz maksymalne wartości WODL
dla wibrogramów dla pojedynczych zdarzeń w budynku A i B**

Lp.	Nazwa pomiaru	Czas trwania zdarzenia [s]	VDV [m/s ^{1,75}]	WODL/f [-/Hz]
1	Budynek A	42	0,153	1,57/10
2	Budynek B	10	0,341	3,91/12,5

Kolorem żółtym zaznaczono wartości przekraczające próg odczuwalności drgań przez ludzi.

Analizując przypadek pojedynczych zdarzeń wyodrębnionych z przebiegów ponad 15-minutowych, zauważono, iż w odniesieniu do budynków nastąpiło przekroczenie wartości progowych (z wyłączeniem analizy metodą VDV w budynku A). W odniesieniu do sygnałów wyjściowych, trwających powyżej 15 minut, jedynie w przypadku analizy metodą VDV sygnału zarejestrowanego w budynku B nastąpiło przekroczenie poziomu niskiego prawdopodobieństwa wystąpienia skarg.

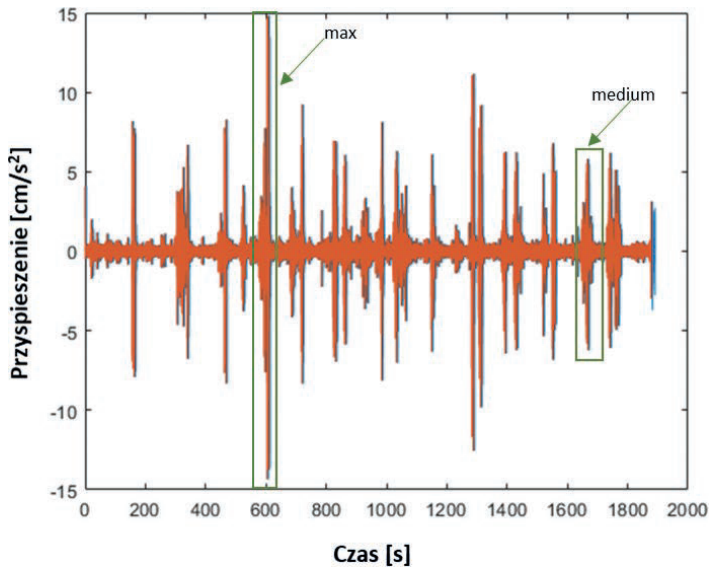
4.2.3. CZAS REJESTRACJI POWYŻEJ 30 MINUT

Zestawione wcześniej wyniki analiz pozwalają na sformułowanie spostrzeżeń podanych wyżej. Uzupełnieniem tych wyników będzie przypadek rejestracji drgań trwający ponad 30 minut. Takiego czasu wymagają przepisy ISO [45]. Warto tu podkreślić, że analiza tak długiego sygnału przy dużej czę-

stotliwości próbkowania jest utrudniona, zarówno w trakcie rejestracji, jak i jego analizy numerycznej.

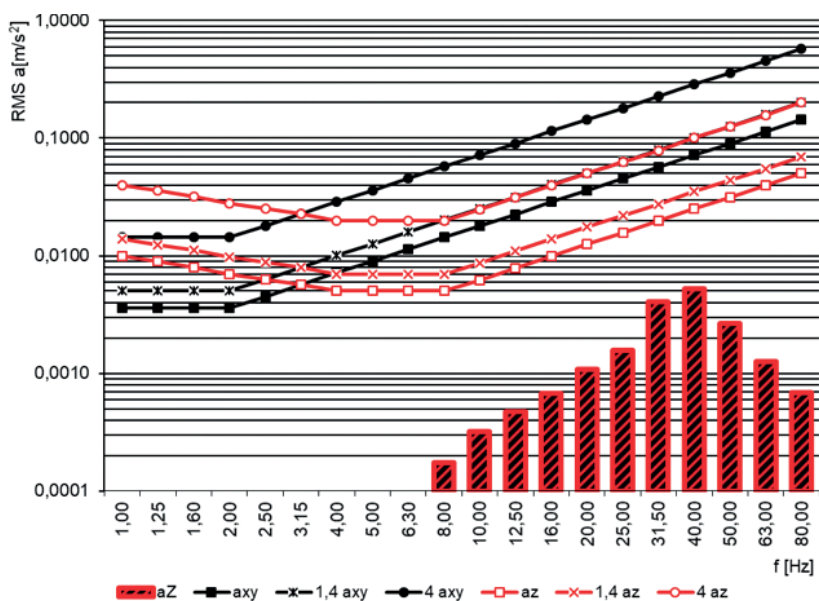
Analizowany sygnał został zarejestrowany w budynku przy ul. Targowej 83 w Warszawie, w środku rozpiętości stropu najwyższej kondygnacji. Rejestracja trwała 31,5 minuty (Rys. 4.29). Budynek przy ul. Targowej 83 to budynek czterokondygnacyjny o konstrukcji tradycyjnej murowanej zlokalizowany w odległości 20 m od tunelu metra, 24 m od drogi kołowej i 21 m od linii tramwajowej. Podczas półgodzinnej rejestracji zapisywano drgania wywołane wszystkimi trzema źródłami drgań.

Rys. 4.29. Wibrogram zarejestrowany w budynku przy ul. Targowej 83 przed (kolor niebieski) i po odcięciu zgodnie z zasadą wyznaczania czasu trwania drgań (kolor pomarańczowy) (rys. A. Kowalska-Koczwarą)



Wibrogram w całości poddano analizie metodą *RMS* i metodą *VDV*. Wynik analizy *RMS* w pasmach 1/3-oktawowych przedstawiono na Rys. 4.30. W wibrogramie widocznych jest kilkanaście zdarzeń, z których wybrano dwa i poddano oby-

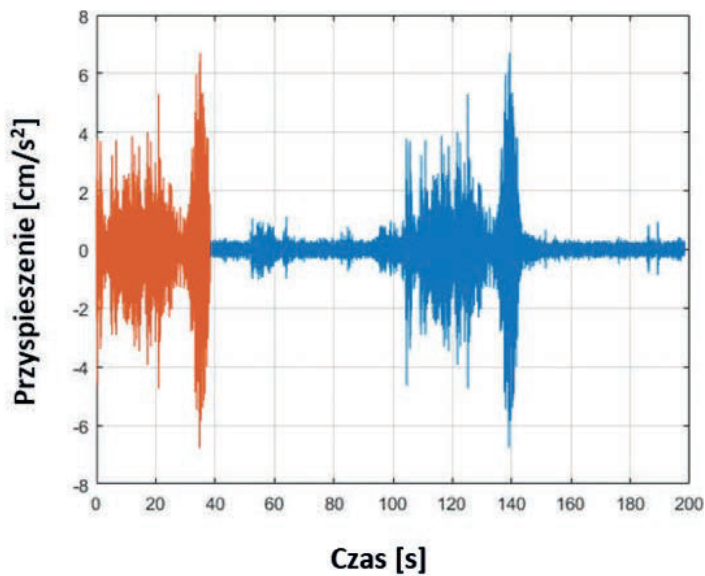
dwu analizom: zdarzenie o średniej intensywności oraz zdarzenie maksymalne. Wibrogramy oraz wyniki analizy *RMS* przedstawiono na Rys. 4.31–4.34. Wyniki analizy *VDV* zestawiono wraz z wartościami wskaźnika *WODL* dla całego wibrogramu oraz dla dwóch wybranych zdarzeń w Tab. 4.5. Kolorem żółtym zaznaczono wartości przekraczające niskie prawdopodobieństwo wystąpienia skarg.



Rys. 4.30. Analiza metodą RMS wibrogramu trwającego 30 minut
(rys. A. Kowalska-Koczwarą)

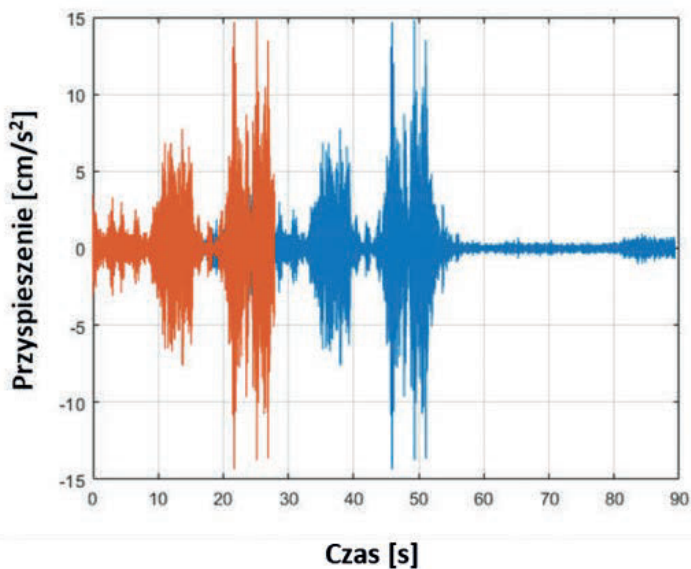
Rys. 4.31. Wibrogram pojedynczego zdarzenia o średniej intensywności, wybranego z 30-minutowego wibrogramu, przed (kolor niebieski) i po odcięciu zgodnie z zasadą wyznaczania czasu trwania drgań (kolor pomarańczowy)

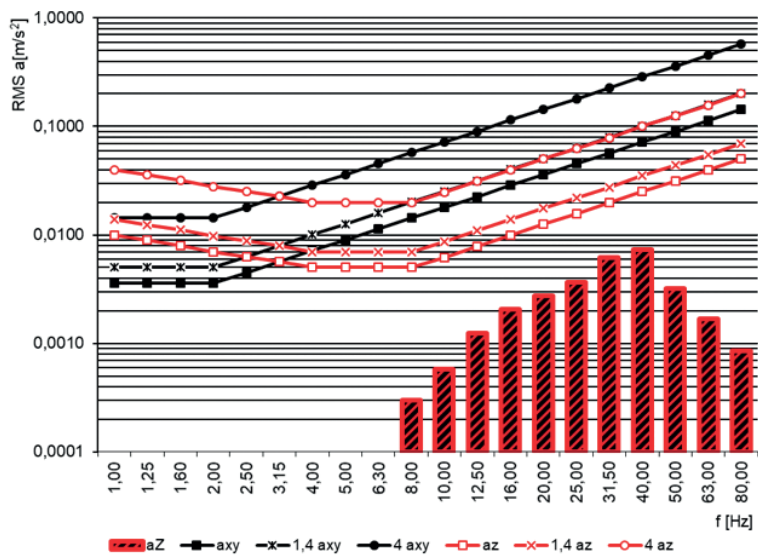
(rys. A. Kowalska-Koczwara)



Rys. 4.32. Wibrogram pojedynczego zdarzenia o maksymalnej wartości szczytowej, wybranego z 30-minutowego wibrogramu, przed (kolor niebieski) i po odcięciu zgodnie z zasadą wyznaczania czasu trwania drgań (kolor pomarańczowy),

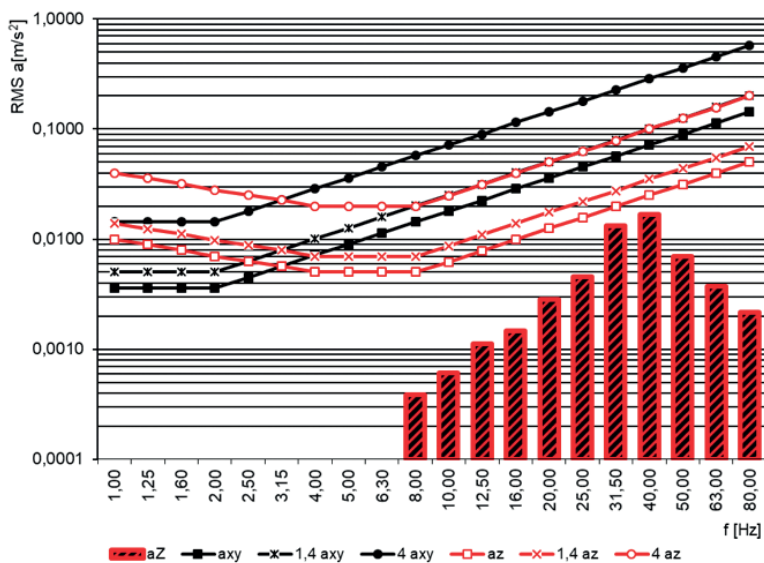
(rys. A. Kowalska-Koczwara)





Rys. 4.33. Wynik analizy metodą RMS wibrogramu zdarzenia o średniej intensywności (z Rys. 4.31)

(rys. A. Kowalska-Koczwarą)



Rys. 4.34. Wynik analizy metodą RMS wibrogramu zdarzenia o maksymalnej wartości szczytowej (z Rys. 4.32)

(rys. A. Kowalska-Koczwarą)

Tabela 4.5

**Wartości VDV oraz maksymalne wartości WODL
dla wibrogramów 30-minutowych i wybranych zdarzeń**

Lp.	Nazwa pomiaru	Czas trwania zdarzenia [s]	VDV [m/s ^{1,75}]	WODL/f [-/Hz]
1	Wibrogram 30 min.	1900	0,203	0,21/40
2	Wibrogram średni	40	0,076	0,32/31,5
3	Wibrogram max	28	0,135	0,67/31,5

Analiza 30-minutowego wibrogramu, podobnie jak poprzednie analizy na temat wpływu czasu trwania drgań na wynik oceny wpływu drgań na ludzi w budynkach, pozwala na sformułowanie kilku wniosków:

- czas trwania zarejestrowanego sygnału wpływa w sposób znaczący na wynik analizy metodą VDV – wraz z długością zarejestrowanego sygnału zwiększa się wartość VDV, przy czym zależna jest ona także od intensywności zarejestrowanych zdarzeń,
- analiza metodą RMS powinna być wykonywana w odniesieniu do pojedynczych zdarzeń, jej wartość jest wówczas większa, ale także zależna od intensywności zarejestrowanego zjawiska,
- czas trwania pojedynczych zdarzeń nie wpływa na wynik obydwu analiz, decyduje ich intensywność.

5. WPŁYW WARTOŚCI WSPÓŁCZYNNIKA SZCZYTU NA WYNIK OCENY

W poprzednim rozdziale zauważono, że czas trwania oraz intensywność zdarzenia mogą mieć wpływ na wynik oceny wpływu drgań na ludzi przebywających w budynkach. Czas trwania zdarzenia czy rejestracji jest jednoznacznie określony i widoczny na wibrogramie. Do oceny intensywności zdarzenia służy współczynnik szczytu CF (*crest factor*). Współczynnik szczytu to stosunek maksymalnej wartości szczytowej do wartości RMS i opisuje się go następującym wzorem [44]:

$$CF = \frac{|a_w|_{PEAK}}{a_{wRMS}} \quad (5.1)$$

gdzie: a_{wPEAK} – maksymalna wartość szczytowa w zarejestrowanym sygnale, a_{wRMS} – wartość RMS obliczana na podstawie ważonego przebiegu.

W literaturze tematu można odnaleźć kilka prób powiązania wartości współczynnika szczytu z wybraną metodą oceny [16, 53, 54, 73, 102]. W niniejszym rozdziale analizie podda-

wano zostały dwie główne metody oceny stosowane obecnie, tzn. *RMS* i *VDV*.

W normie polskiej z 1988 roku [94] zakres stosowalności był podyktowany właśnie wartością współczynnika szczytu. Analizowane zgodnie z normą przebiegi drgań muszą mieć wartość współczynnika szczytu mniejszą od 9. Bardzo ciekawe odwołanie do współczynnika szczytu wprowadzono do normy australijskiej [4]. Podano tam przedziały, w których w zależności od współczynnika szczytu powinno się stosować różne metody oceny:

- $CF < 6$ – powinna być stosowana metoda *RMS*,
- $CF \geq 6$ i $CF \leq 9$ – powinny być stosowane metody *RMS* i *VDV*, a o końcowym wyniku oceny decyduje bardziej niekorzystny wynik,
- $CF > 9$ – powinna być stosowana metoda *VDV*.

Jest to podejście niespotykane w żadnych innych normatywach ani zaleceniach. Na ogół w danym kraju zaleca się stosowanie jednej metody oceny, np. w Polsce jest to metoda *RMS* [94, 95], a w Wielkiej Brytanii metoda *VDV* [11]. Podejście w normie [4] jest nowe i dlatego w niniejszym rozdziale zostało szczegółowo przeanalizowane.

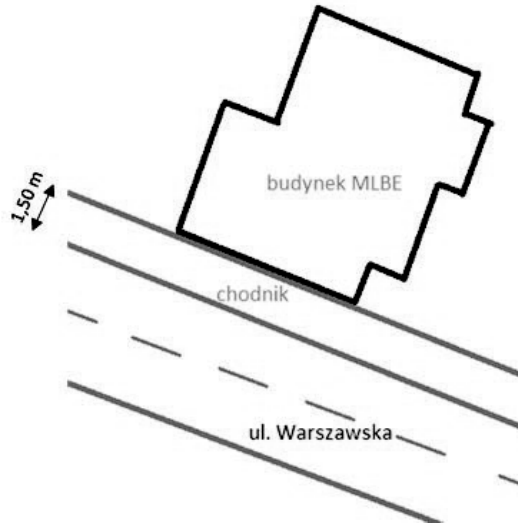
Analiza możliwa była dzięki monitoringowi drgań przeprowadzonemu na budynku eksperymentalnym Małopolskiego Laboratorium Budownictwa Energooszczędnego (MLBE), znajdującego się na terenie kampusu Politechniki Krakowskiej. Jest to budynek o konstrukcji ramowej żelbetowej o sześciu

kondygnacjach naziemnych (Rys. 5.1). Budynek poddawany był wymuszeniu przejazdami pojazdów po drodze kołowej znajdującej się 1,5 m od ściany budynku (Rys. 5.2). Monitoring prowadzony był przez 24 godziny w pomieszczeniu konferencyjnym na piątej kondygnacji, która jest najwyżej położoną kondygnacją przeznaczoną na stały pobyt ludzi. Punkt pomiarowy umieszczono w środku rozpiętości stropu tego pomieszczenia.



Rys. 5.1. Widok budynku MLBE od strony kampusu PK [120]

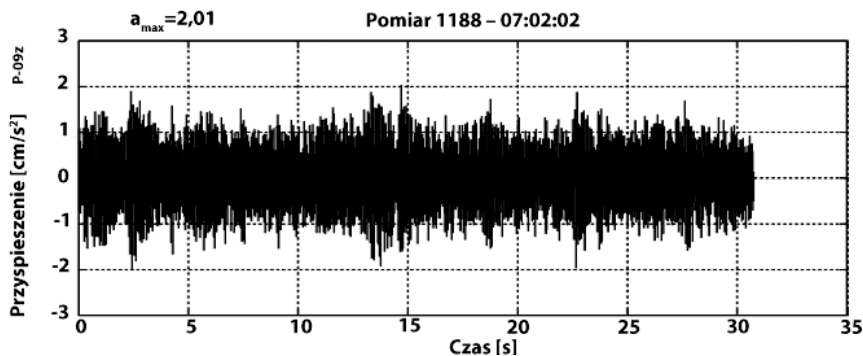
Rys. 5.2. Usytuowanie budynku MLBE względem ul. Warszawskiej
(rys. A. Kowalska-Koczwarą)



Zarejestrowano łącznie 1477 zdarzeń, z czego ok. 1000 stanowiły rejestracje bez zakłóceń od źródeł wewnętrznych. Spośród tych zdarzeń na potrzeby niniejszej analizy wybrano ponad 30 zdarzeń w odniesieniu do każdego z rozpatrywanych za normą australijską [4] przedziałów wartości współczynnika szczytu.

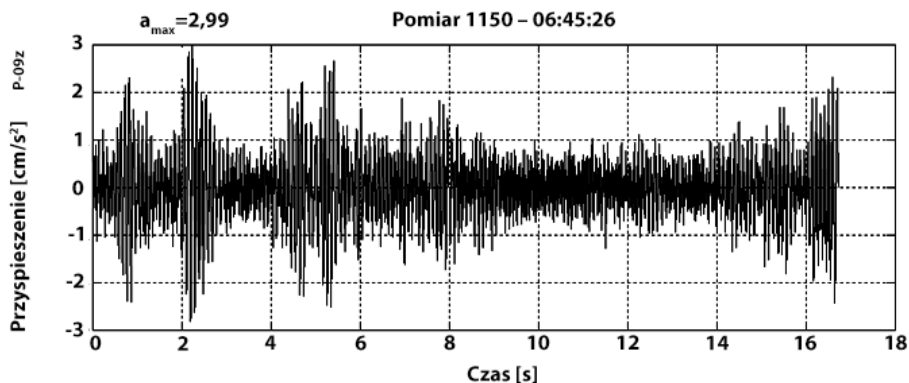
5.1. Wibrogramy o wartości współczynnika szczytu mniejszej niż 6

Wartość współczynnika szczytu poniżej 6 odnosi się do wibrogramów o niewielkiej zmienności wartości szczytowych. Przykładowe wibrogramy zarejestrowane w toku pomiarów przeprowadzonych w budynku MLBE pokazano na Rys. 5.3–5.5.



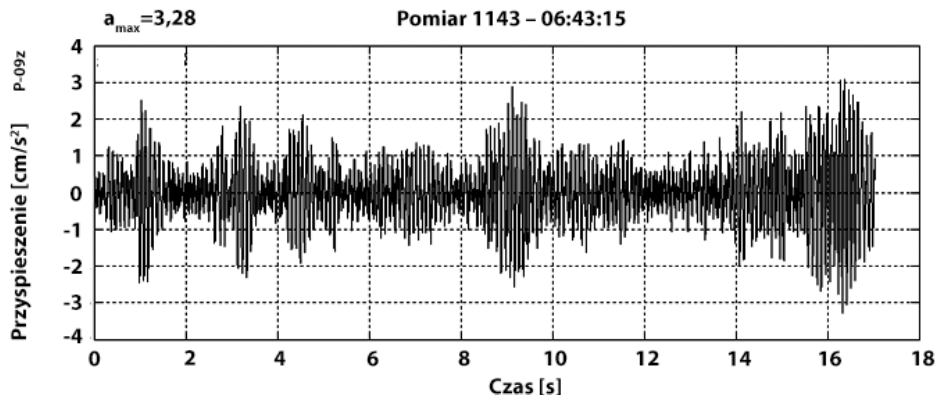
Rys. 5.3. Wibrogram o wartości współczynnika szczytu poniżej 4,0

(rys. A. Kowalska-Koczwara)



Rys. 5.4. Wibrogram o wartości współczynnika szczytu pomiędzy 4,01 a 5,0

(rys. A. Kowalska-Koczwara)



Rys. 5.5. Wibrogram o wartości współczynnika szczytu pomiędzy 5,01 a 5,99

(rys. A. Kowalska-Koczwara)

Widoczne są wyraźne różnice w wibrogramach. Jeśli wartość współczynnika szczytu jest mniejsza niż 4,0, to takie wibrogramy cechuje bardzo mała zmienność wartości szczytowych.

Przeanalizowano 42 pomiary zarejestrowane podczas monitoringu. Chociaż nie udało się wyznaczyć żadnej zależności pomiędzy wartością *CF* a wartościami wskaźnika *WODL* czy dawki wibracji *VDV*, można zauważyć w odniesieniu do wskaźnika *WODL* pojedynczych zdarzeń, że przekroczenia wartości progu odczuwalności drgań przez ludzi w budynkach występują tylko przy współczynniku szczytu większym od 5,0. Wartości *VDV* we wszystkich zdarzeniach o $CF < 6,0$ nie przekraczały poziomu niskiego prawdopodobieństwa wystąpienia skarg. Wartości wskaźnika *WODL* i dawki wibracji *VDV* zestawiono wraz z *CF* w Tab. 5.1. Kolorem żółtym zaznaczono wartości, które odpowiadają przekroczeniu progu odczuwalności drgań przez ludzi.

Tabela 5.1

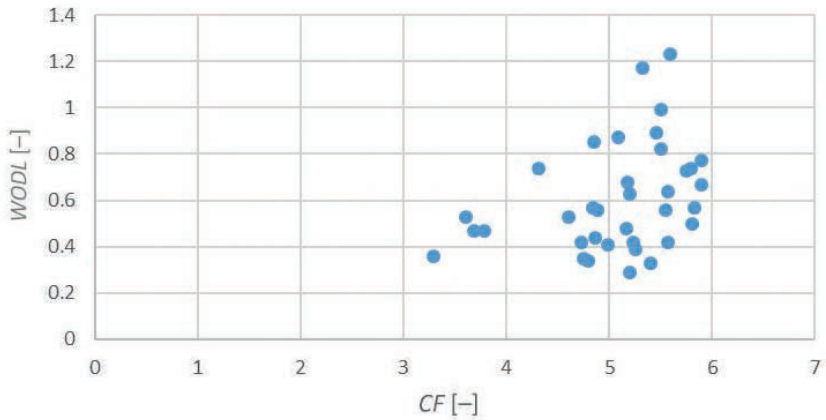
**Wartości *VDV* oraz maksymalne wartości *WODL*
w zdarzeniach o współczynniku szczytu poniżej 6**

Lp.	Numer pomiaru	Wartość <i>CF</i> [-]	<i>VDV</i> [m/s ^{1,75}]	<i>WODL/f</i> [-/Hz]
1	1188	3,26	0,036	0,53/10
2	1116	3,26	0,027	0,29/10
3	1103	3,29	0,031	0,41/10
4	1106	3,29	0,029	0,36/10
5	1102	3,60	0,033	0,53/10
6	1105	3,68	0,034	0,47/10

7	1104	3,78	0,031	0,47/10
8	1126	4,31	0,042	0,74/10
9	869	4,60	0,040	0,53/10
10	4	4,73	0,035	0,42/10
11	786	4,75	0,041	0,35/10
12	211	4,79	0,048	0,34/10
13	3	4,84	0,041	0,57/10
14	1150	4,85	0,044	0,85/10
15	108	4,86	0,039	0,44/10
16	1059	4,88	0,036	0,56/10
17	756	4,99	0,042	0,41/10
18	1193	5,09	0,044	0,87/10
19	681	5,16	0,049	0,48/10
20	616	5,18	0,045	0,68/10
21	659	5,20	0,054	0,29/10
22	878	5,20	0,041	0,63/10
23	698	5,23	0,048	0,42/10
24	912	5,25	0,037	0,39/10
25	1143	5,32	0,063	1,17/10
26	121	5,40	0,033	0,33/10
27	1158	5,46	0,051	0,89/10
28	1154	5,50	0,047	0,82/10
29	1251	5,50	0,050	0,99/10
30	301	5,55	0,039	0,56/10
31	64	5,57	0,039	0,42/10
32	1010	5,57	0,042	0,64/10
33	1199	5,59	0,068	1,23/10
34	191	5,75	0,058	0,73/10
35	107	5,79	0,045	0,74/10
36	381	5,81	0,042	0,50/10
37	633	5,83	0,044	0,57/10

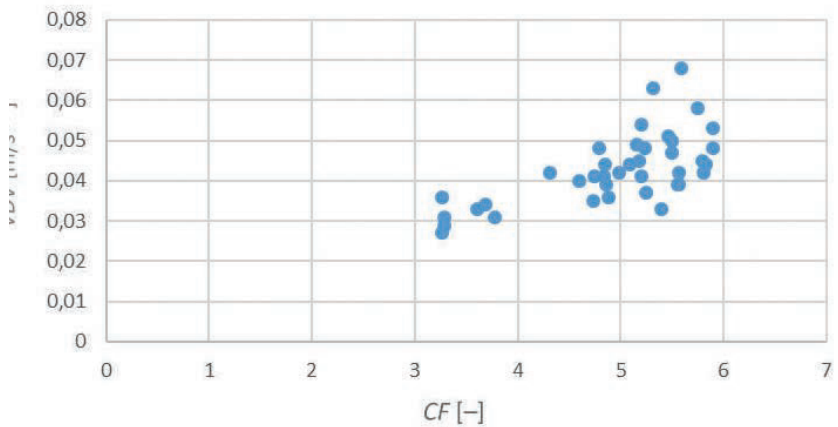
38	74	5,90	0,048	0,67/10
39	482	5,90	0,053	0,77/10
40	496	5,90	0,049	0,67/10
41	291	5,92	0,049	0,58/10
42	875	5,94	0,039	0,53/10

Na Rys. 5.6 i 5.7 pokazano zależność między wartościami współczynnika szczytu a wartościami *WODL* i *VDV*.

zależność *WODL* od *CF*

Rys. 5.6. Zależność pomiędzy wartościami *CF* a *WODL* w wibrogramach o $CF < 6$

(rys. A. Kowalska-Koczwara)

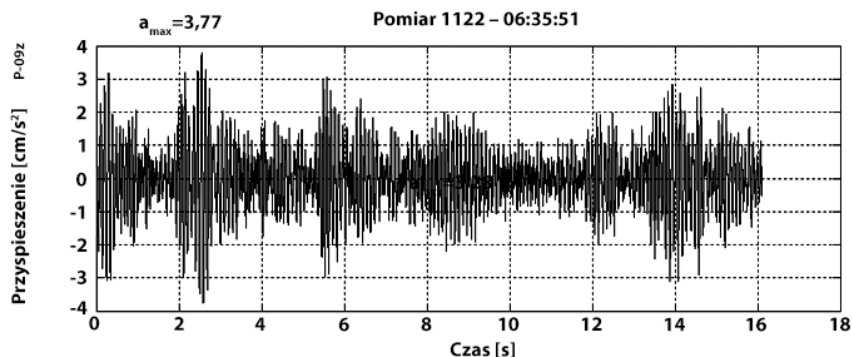
zależność *VDV* od *CF*

Rys. 5.7. Zależność pomiędzy wartościami *CF* a *VDV* w wibrogramach o $CF < 6$

(rys. A. Kowalska-Koczwara)

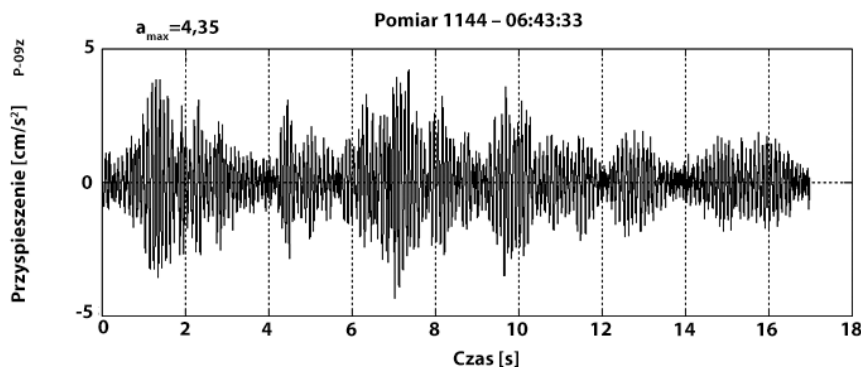
5.2. Wibrogramy o wartości współczynnika szczytu z przedziału od 6 do 9

W tym przedziale wartości współczynnika szczytu przeanalizowano 36 zdarzeń. Na Rys. 5.8–5.10 pokazano przykładowe wibrogramy o wartości CF : w przedziale od 6,0 do 6,99 (Rys. 5.8), od 7,0 do 7,99 (Rys. 5.9) i od 8,0 do 9,0 (Rys. 5.10).



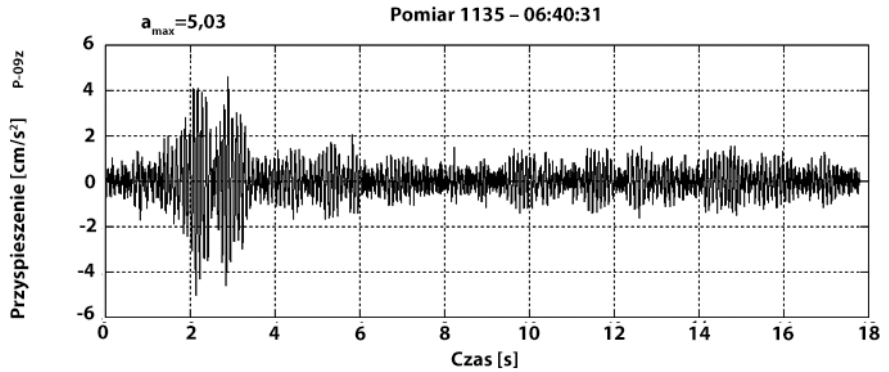
Rys. 5.8. Wibrogram o wartości współczynnika szczytu z przedziału od 6,0 do 6,99

(rys. A. Kowalska-Koczwara)



Rys. 5.9. Wibrogram o wartości współczynnika szczytu z przedziału od 7,0 do 7,99

(rys. A. Kowalska-Koczwara)



Rys. 5.10. Wibrogram o wartości współczynnika szczytu z przedziału od 8,0 do 9,0

(rys. A. Kowalska-Koczwara)

W odniesieniu do wskaźnika *WODL* w analizowanym przedziale widoczny jest większy udział wibrogramów, w których nastąpiły przekroczenia progu odczuwalności drgań przez ludzi w budynku MLBE. Nie odnotowano natomiast naruszenia warunków niezbędnego komfortu w pomieszczeniu na piątej kondygnacji. Pomieszczenie to jest salą konferencyjną i w związku z tym naruszenie warunków komfortu rozpoczęła się od wartości $WODL = 4$. Wartość dawki wibracji *VDV* ponownie nie osiągnęła wartości progowych. Wszystkie 36 zdarzeń wraz wartościami *WODL* i *VDV* w odniesieniu do wartości *CF* zestawiono w Tab. 5.2. Kolorem żółtym zaznaczono wartości, które odpowiadają przekroczeniu progu odczuwalności drgań przez ludzi.

Tabela 5.2

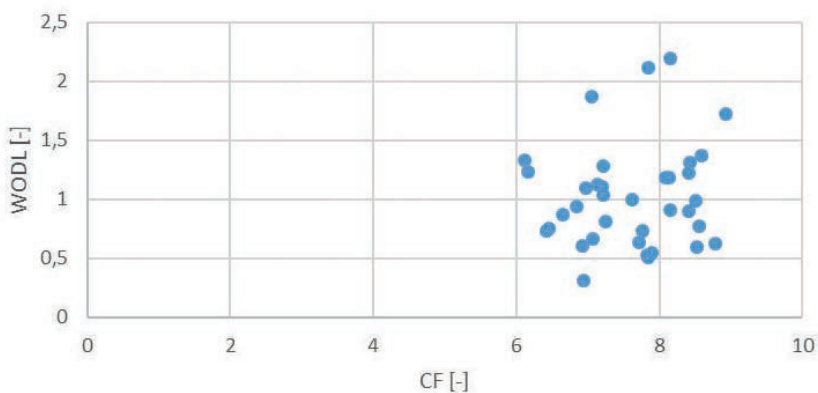
**Wartości VDV oraz maksymalne wartości WODL
w zdarzeniach o współczynniku szczytu z przedziału od 6 do 9**

Lp.	Nazwa pomiaru	Wartość CF [-]	VDV [m/s ^{1,75}]	WODL/f [-/Hz]
1	1122	6,11	0,064	1,33/10
2	1141	6,16	0,056	1,23/10
3	1152	6,42	0,048	0,73/10
4	1421	6,45	0,051	0,75/10
5	1133	6,65	0,045	0,87/10
6	1125	6,84	0,051	0,94/10
7	1098	6,92	0,036	0,61/10
8	1020	6,94	0,027	0,31/10
9	1129	6,97	0,058	1,10/10
10	1144	7,05	0,080	1,87/10
11	1027	7,07	0,038	0,66/10
12	1245	7,13	0,058	1,13/10
13	1189	7,20	0,053	1,11/10
14	1045	7,22	0,041	1,04/10
15	1168	7,22	0,065	1,28/10
16	1298	7,25	0,046	0,81/10
17	1289	7,62	0,048	1,00/10
18	212	7,72	0,057	0,64/10
19	208	7,76	0,055	0,73/10
20	11	7,83	0,048	0,53/10
21	1128	7,85	0,101	2,11/10
22	1379	7,85	0,045	0,51/10
23	1071	7,89	0,034	0,55/10
24	1300	8,09	0,062	1,18/10
25	1299	8,14	0,069	1,18/10

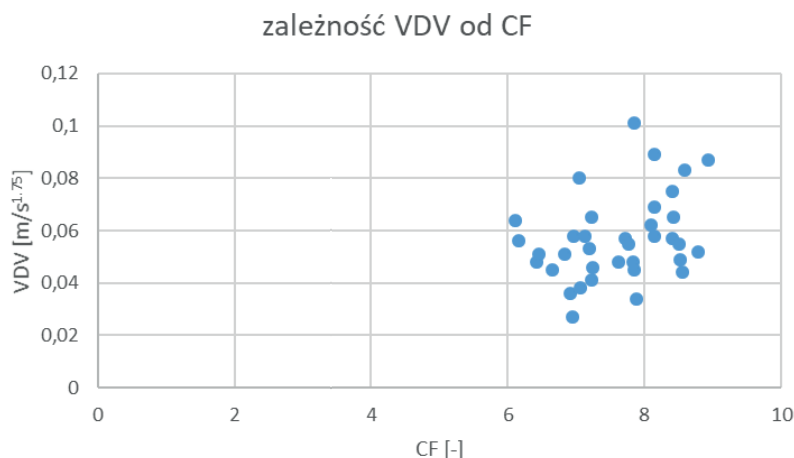
26	75	8,15	0,058	0,91/10
27	1135	8,15	0,089	2,19/10
28	1287	8,41	0,075	1,22/10
29	1323	8,41	0,057	0,90/10
30	1192	8,43	0,065	1,31/10
31	1183	8,51	0,055	0,99/10
32	72	8,52	0,049	0,60/10
33	989	8,56	0,044	0,77/10
34	1202	8,59	0,083	1,37/10
35	66	8,78	0,052	0,63/10
36	1148	8,93	0,087	1,72/10

Nie stwierdzono występowania zależności między wartością współczynnika szczytu CF a wartościami $WODL$ i VDV (Rys. 5.11 i 5.12).

zależność $WODL$ od CF



Rys. 5.11. Zależność pomiędzy wartościami CF a $WODL$ w wibrogramach o CF od 6 do 9 (rys. A. Kowalska-Koczwara)

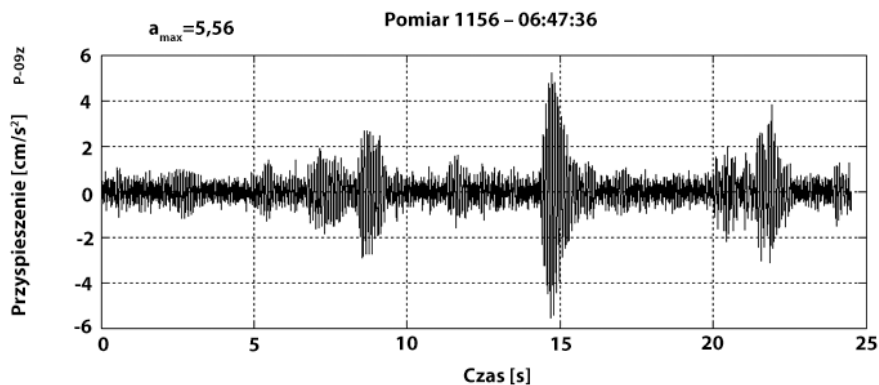


Rys. 5.12. Zależność pomiędzy wartościami CF a VDV w wibrogramach o CF od 6 do 9

(rys. A. Kowalska-Koczwarą)

5.3. Wibrogramy o wartości współczynnika szczytu powyżej 9

Przeanalizowano 42 pomiary, w których wartość współczynnika szczytu w wibrogramach przekraczała 9. Wartości CF w przeanalizowanych wibrogramach mieściły się w przedziale od 9,01 do 19,38. na Rys. 5.13 i Rys. 5.14 podano dwa wibrogramy, w których CF przyjmowało wartości skrajne z podanego przedziału.

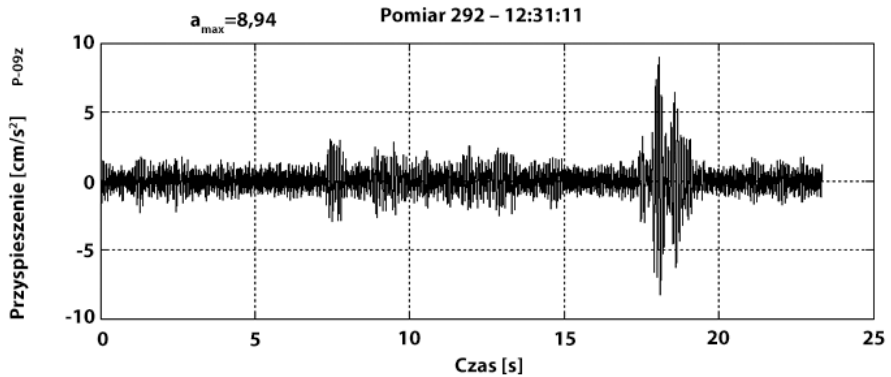


Rys. 5.13. Wibrogram o wartości współczynnika szczytu równej 9,01

(rys. A. Kowalska-Koczwarą)

Rys. 5.14. Wibrogram
o wartości współ-
czynnika szczytu
równiej 19,38

(rys. A. Kowalska-Koczwara)



Trzeba odnotować, iż w odniesieniu do wyższych wartości *CF* pojawiły się wartości *WODL* wskazujące na naruszenie wymagań komfortu wibracyjnego w porze dziennej. Tylko 5 zdarzeń z 42 zarejestrowanych w tym zakresie współczynnika szczytu mieści się poniżej progu odczuwalności drgań przez ludzi. W odniesieniu do dawki wibracji *VDV* w żadnym z zarejestrowanych zdarzeń nie nastąpiło przekroczenie wartości 0,4 (Tab. 5.3). Kolorem żółtym zaznaczono wartości wskazujące na przekroczenie progu odczuwalności drgań, zaś kolorem czerwonym poziom zapewnienia wymaganego komfortu wibracyjnego.

Tabela 5.3

Wartości *VDV* oraz maksymalne wartości *WODL*
w odniesieniu do zdarzeń o *CF* > 9

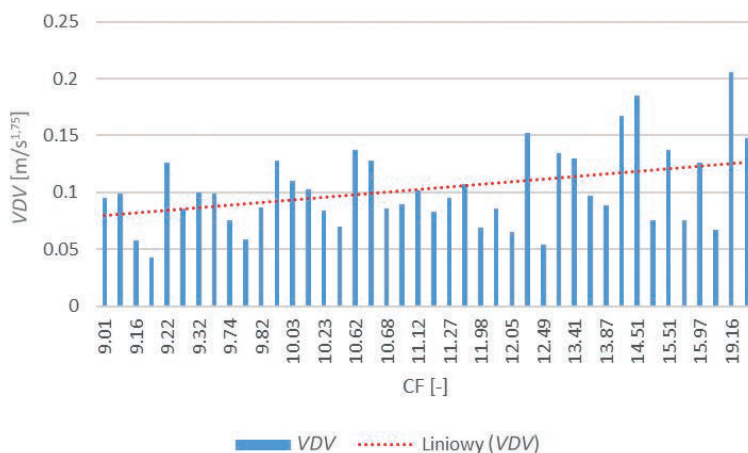
Lp.	Nazwa pomiaru	Wartość <i>CF</i> [-]	<i>VDV</i> [m/s ^{1,75}]	<i>WODL/f</i> [-/Hz]
1	1156	9,01	0,095	2,78/10
2	1302	9,14	0,099	1,98/10
3	1180	9,16	0,058	0,94/10

4	988	9,17	0,043	0,82/10
5	1311	9,22	0,126	2,68/10
6	1286	9,27	0,086	1,86/10
7	1260	9,32	0,100	2,67/10
8	1120	9,69	0,099	2,46/10
9	1366	9,74	0,076	0,74/10
10	1362	9,79	0,059	0,52/10
11	1149	9,82	0,087	1,72/10
12	1282	9,89	0,128	2,35/10
13	1304	10,03	0,110	1,75/10
14	1181	10,08	0,103	2,23/10
15	1288	10,23	0,084	1,63/10
16	1223	10,29	0,070	1,76/10
17	1306	10,62	0,137	2,68/10
18	1420	10,64	0,128	2,20/10
19	1206	10,68	0,086	1,68/10
20	122	10,97	0,090	1,09/10
21	1155	11,12	0,102	2,41/10
22	1244	11,17	0,083	2,02/10
23	179	11,27	0,095	1,55/10
24	1146	11,27	0,107	2,92/10
25	1346	11,98	0,069	1,21/10
26	1241	12,04	0,086	1,52/10
27	22	12,05	0,065	1,02/10
28	1136	12,47	0,152	3,38/10
29	31	12,49	0,054	0,70/10
30	1285	12,50	0,135	2,49/10
31	1190	13,41	0,130	3,37/10
32	154	13,75	0,097	1,48/10
33	119	13,87	0,089	1,60/10
34	1182	14,43	0,167	4,56/10
35	1127	14,51	0,185	5,22/10

36	420	14,77	0,076	0,90/10
37	150	15,51	0,137	2,87/10
38	20	15,81	0,076	1,27/10
39	1264	15,97	0,126	1,79/10
40	36	18,97	0,067	0,76/10
41	1207	19,16	0,206	4,84/10
42	292	19,38	0,148	3,05/10

Analizując dane zawarte w Tab. 5.3, szczególnie w odniesieniu do dawki wibracji *VDV*, należy zauważyć, iż zestawione w normatywach wartości progowe *VDV* odnoszą się do narażenia całodziennego. W związku z powyższym należy przeliczyć uzyskane współczynniki zgodnie ze wzorem (2.8). Wykonano także obliczenia dla ok. 1000 zdarzeń, które wystąpiły w ciągu doby, i w wyniku obliczeń uzyskano wartość $VDV_{\text{dzień/noc}}$ (wzór 2.8) wynoszącą 1,24, co wskazuje nie tylko na przekroczenie poziomu niskiego prawdopodobieństwa wystąpienia skarg, ale także na przekroczenie progu możliwości wystąpienia skarg i to zarówno zgodnie z polskimi normatywami (Tab. 2.7), jak i z normą brytyjską (Tab. 2.6). Decydująca była tu liczba zdarzeń, w których współczynnik szczytu był większy od wartości 12. Wydaje się, że to ta wartość, a nie wartość 9, ma wpływ na zwiększenie dawki wibracji *VDV* w porównaniu z pojedynczym zdarzeniem (Rys. 5.15). Chociaż nie udało się wyznaczyć zależności funkcyjnej pomiędzy wartościami *CF* a *VDV*, która byłaby dobrze skorelowana, to jednak widoczny jest trend wznoszący dla tej zależności.

Podsumowaniem rozważań dotyczących wpływu współczynnika szczytu na wartość wskaźnika *WODL* i na wartość dawki wibracji *VDV* jest stwierdzenie, że *VDV* jest lepiej skorelowana z *CF* niż *WODL* (Rys. 5.16 i Rys. 5.17). Choć zależność ta nie jest silna (współczynnik determinacji wynosi $R^2 = 0,624$), to widoczne jest wyraźne zwiększenie wartości *VDV* wraz ze wzrostem wartości *CF*. Podobnie wskaźnik *WODL* zwiększa swoją wartość wraz ze wzrostem *CF*, ale w tym przypadku widoczny jest większy rozrzut tych wyników ($R^2 = 0,4872$). Jako krzywą korelacji wykorzystano aproksymację wykładniczą.

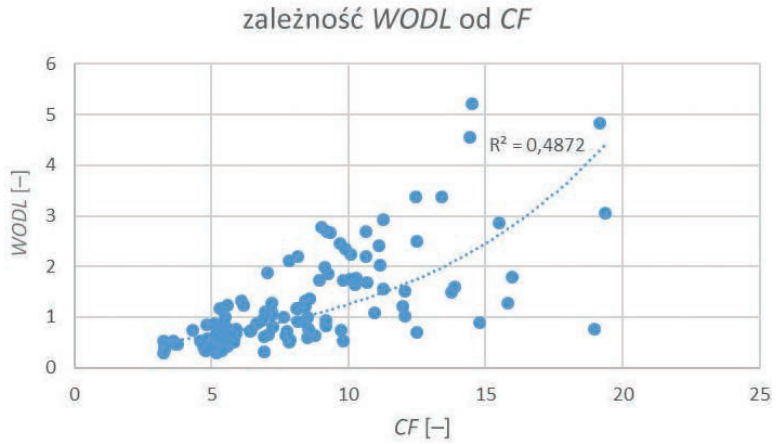


Rys. 5.15. Zależność pomiędzy VDV a CF

(rys. A. Kowalska-Koczwara)

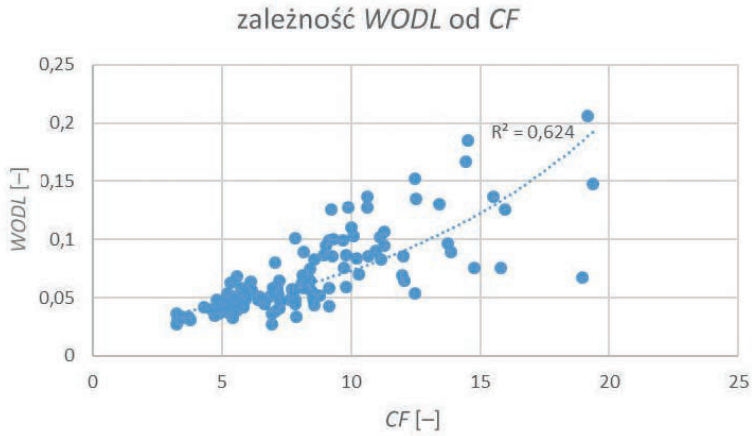
Rys. 5.16. Korelacja wykładnicza pomiędzy wskaźnikiem WODL a współczynnikiem szczytu CF

(rys. A. Kowalska-Koczwara)



Rys. 5.17. Korelacja wykładnicza pomiędzy VDV a współczynnikiem szczytu CF

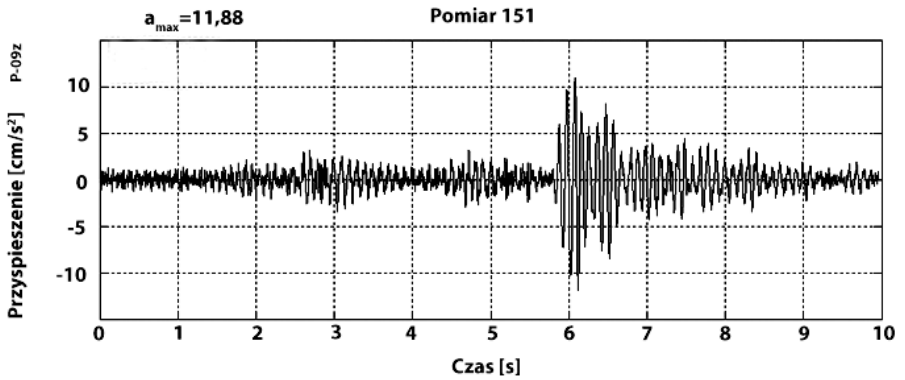
(rys. A. Kowalska-Koczwara)



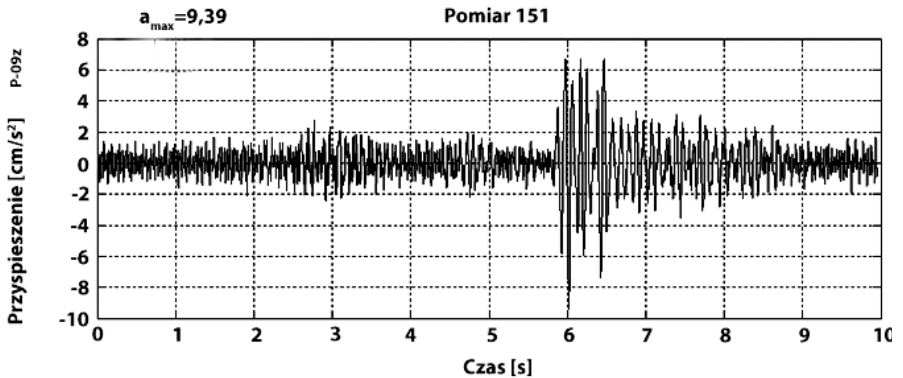
6. WPŁYW MIEJSCA USYTUOWANIA CZUJNIKA NA WYNIK OCENY WPŁYWU DRGAŃ NA LUDZI W BUDYNKACH

W różnych normatywach międzynarodowych podawane są wytyczne doboru miejsca usytuowania czujnika stosowanego w pomiarach drgań odbieranych przez ludzi. Już w rozdziale 2 zwrócono uwagę na to, że obowiązkowa lokalizacja punktu pomiarowego, z którego pozyskuje się informacje do oceny wpływu drgań na ludzi, zmieniała się. Lokalizacja punktu pomiarowego wskazywana jest: od ścisłego środka geometrycznego stropu [95], poprzez uwzględnienie lekkiej tolerancji ± 10 cm [45] do strefy od 1/3 do 2/3 rozpiętości stropu [11]. W trakcie pomiarów przeprowadzonych podczas 24-godzinnego monitoringu drgań w budynku MLBE w 2017 roku potwierdzono, że miejsce usytuowania czujnika nie jest bez znaczenia w ocenie wpływu drgań na ludzi (Rys. 6.1 i Rys. 6.2).

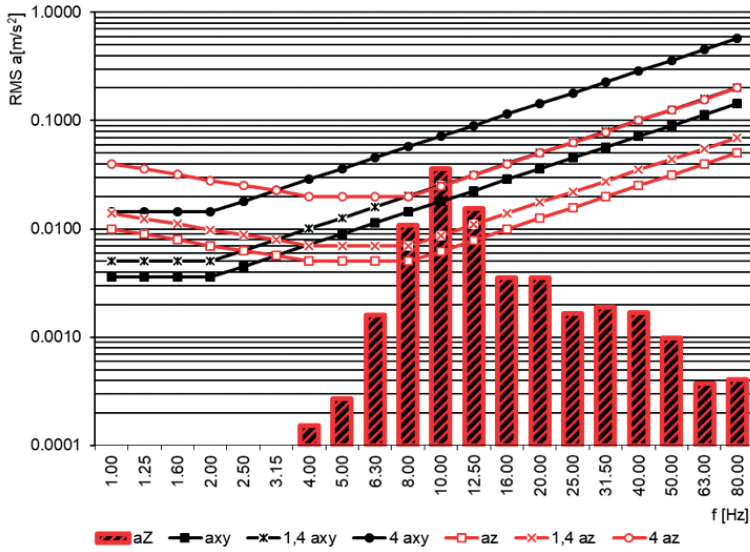
Rys. 6.1. Pomiar drgań od przejazdu samochodu uzyskany w punkcie znajdującym się w środku stropu
(rys. A. Kowalska-Koczwara)



Rys. 6.2. Pomiar drgań od przejazdu samochodu uzyskany w punkcie znajdującym się w 2/3 rozpiętości stropu
(rys. A. Kowalska-Koczwara)



Wyniki uzyskane podczas pomiarów poddano analizie metodą *RMS*. Rozpatrywano pojedyncze zdarzenia w celu sprawdzenia, czy różnice w wartościach szczytowych drgań będą wpływały na wynik oceny wpływu drgań na ludzi w budynku. Na Rys. 6.3 i Rys. 6.4 oraz w Tab. 6.1 i Tab. 6.2 zestawiono wyniki analizy dotyczące zdarzeń podanych na Rys. 6.1 i Rys. 6.2.



Rys. 6.3. Wynik analizy metodą RMS wibrogramu z Rys. 6.1 (rys. A. Kowalska-Koczwara)

Tabela 6.1

Wartości WODL i odpowiadające im częstotliwości w pasmach, w których nastąpiło przekroczenie progu odczuwalności drgań (por. Rys. 6.3)

WODL [-]	Częstotliwość f [Hz]
5,77	10,0
2,16	8,0
1,99	12,5

Rys. 6.4. Wynik analizy metodą RMS wibrogramu z Rys. 6.2
(rys. A. Kowalska-Koczwarą)

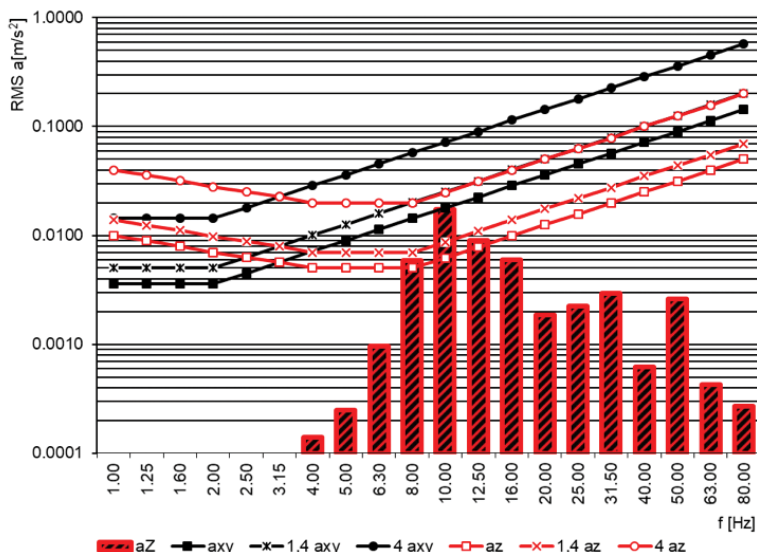


Tabela 6.2

Wartości WODL i odpowiadające im częstotliwości w pasmach, w których nastąpiło przekroczenie progu odczuwalności drgań (por. Rys. 6.4)

WODL [-]	Częstotliwość f [Hz]
2,81	10,0
1,17	8,0
1,16	12,5

Wyniki uzyskane metodą RMS świadczą o tym, że miejsce usytuowania czujnika ma istotne znaczenie w ocenie wpływu drgań na ludzi przebywających w budynku. W przypadku pomiaru wykonanego w środku rozpiętości stropu wskaźnik WODL osiąga wartość 5,77, co oznacza naruszenie warunków

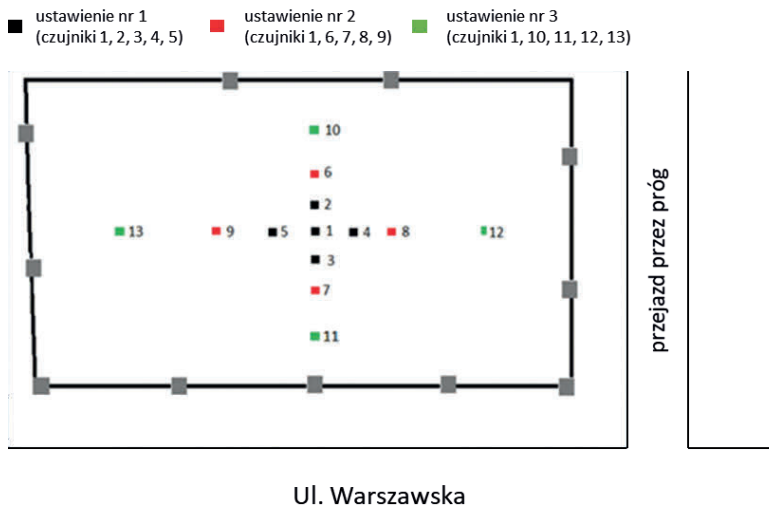
niezbędnego komfortu wibracyjnego w pomieszczeniu mieszkalnym, natomiast w przypadku punktu pomiarowego zlokalizowanego w punkcie o $2/3$ rozpiętości stropu, dla którego maksymalna wartość *WODL* wynosi 2,81 w ocenie wykazane będzie przekroczenie progu odczuwalności drgań, ale nie wystąpiło naruszenie warunków komfortu dla ludzi w budynku (por. Rozdz. 5).

Nie było to jedyne zarejestrowane zdarzenie, w którym stwierdzono rozbieżność w ocenie wpływu drgań na ludzi wykonanej na podstawie wyników pomiarów uzyskanych w dwóch lokalizacjach punktów pomiarowych na stropie. W związku z tym zaplanowano pomiary, których celem było wyznaczenie strefy, która gwarantuje niezmiennosc oceny wpływu drgań na ludzi. Pomiary przeprowadzono w 2018 roku w budynku MLBE na tym samym stropie, na którym prowadzono wcześniej monitoring drgań (por. Rozdz. 5). Ze względu na ograniczenia sprzętowe wynikające z konieczności równoczesnej rejestracji przyspieszeń drgań w wybranych punktach stropu, przy równoczesnej kontroli drgań w poziomie budynku, zaplanowano 3 ustawienia czujników, z których wyniki posłużą do oceny wpływu drgań na ludzi w budynku (Rys. 6.5):

- ustawienie 1 – czujnik referencyjny w centrum stropu (pkt 1 na Rys. 6.5) oraz cztery czujniki umiejscowione wzdłuż obwodu w odległości $1/6$ rozpiętości stropu (pkt 2–5 na Rys. 6.5),

- ustawienie 2 – czujnik referencyjny w centrum stropu (pkt 1 na Rys. 6.5) oraz cztery czujniki umiejscowione wzdłuż obwodu w odległości 1/3 rozpiętości stropu (pkt 6–9 na Rys. 6.5),
- ustawienie 3 – czujnik referencyjny w centrum stropu (pkt 1 na Rys. 6.5) oraz cztery czujniki umiejscowione wzdłuż obwodu w odległości 2/3 rozpiętości stropu (pkt 10–13 na Rys. 6.5).

Rys. 6.5. Rozmieszczenie punktów pomiarowych na stropie budynku MLBE (pomiary w 2018 roku)
(rys. A. Kowalska-Koczwarą)



W trakcie pomiarów realizowano zarówno eksperyment czynny polegający na przejeździe samochodu dostawczego przez zainstalowany obok budynku próg (Rys. 6.6), jak i eksperyment bierny, w trakcie którego rejestrowano przez ok. 2 godziny przejazdu samochodów po pobliskiej jezdni (Rys. 5.2).

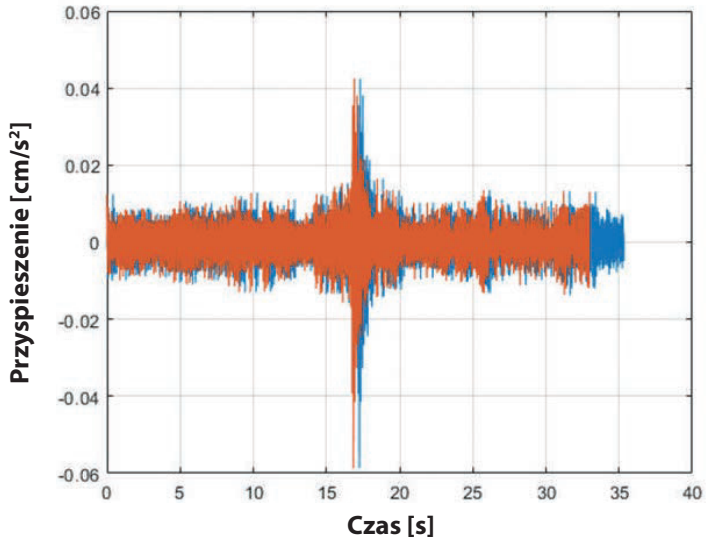


Rys. 6.6. Eksperyment czynny – drgania wywołane przejazdem samochodu przez próg (fot. A. Kowalska-Koczwarą)

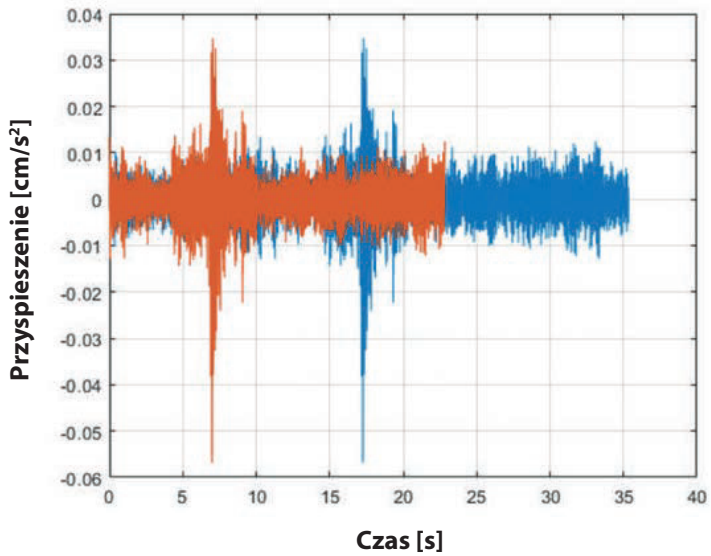
6.1. Wyniki eksperymentu czynnego

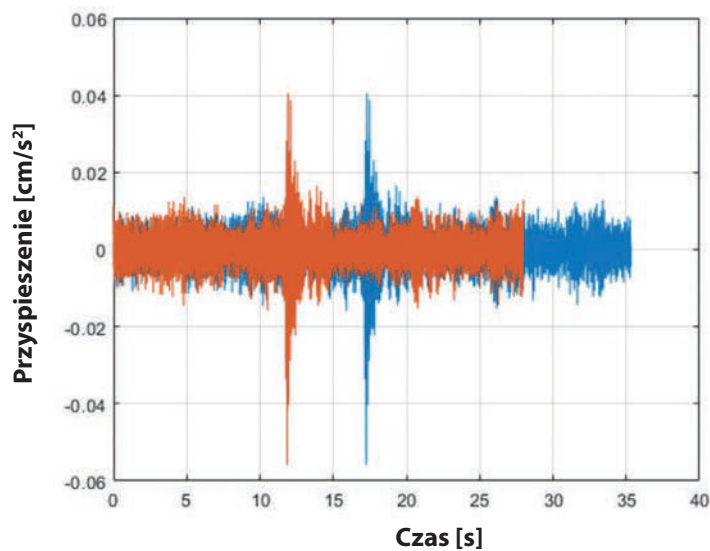
W każdym z trzech ustawień czujników zrealizowano po trzy przejazdy przez próg samochodu dostawczego. Czas rejestracji każdorazowo trwał 160 s, natomiast w analizie wibrogram o czasie trwania drgań zgodnie z [95] (por. Rys. 2.2). Przykładowe wibrogramy drgań w ustawieniu nr 1 przed i po uwzględnieniu czasu trwania drgań pokazano na Rys. 6.7–6.11.

Rys. 6.7. Wibrogram w pkt 1 w ustawieniu 1 przed (kolor niebieski) i po odcięciu zgodnie z [95] (kolor pomarańczowy)
(rys. A. Kowalska-Koczwarą)

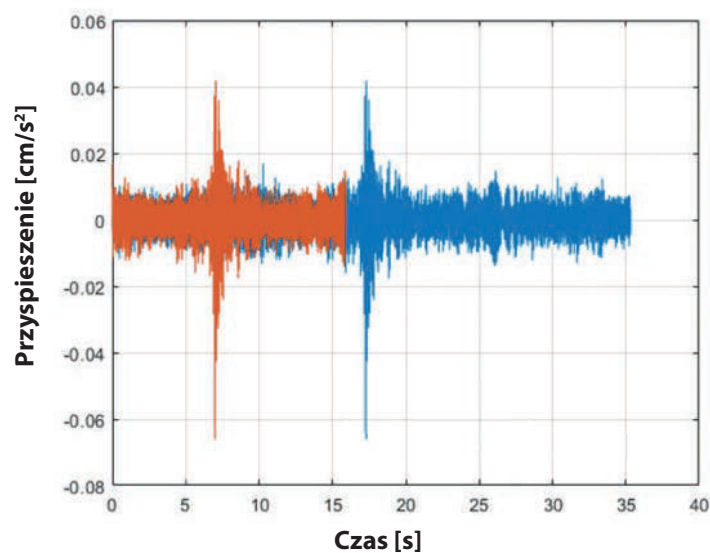


Rys. 6.8. Wibrogram w pkt 2 w ustawieniu 1 przed (kolor niebieski) i po odcięciu zgodnie z [95] (kolor pomarańczowy)
(rys. A. Kowalska-Koczwarą)



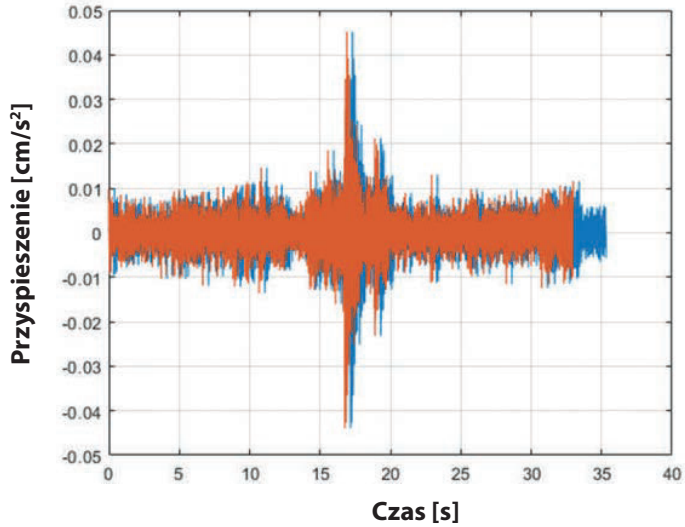


Rys. 6.9. Wibrogram w pkt 3 w ustawieniu 1 przed (kolor niebieski) i po odcięciu zgodnie z [95] (kolor pomarańczowy)
(rys. A. Kowalska-Koczwarą)



Rys. 6.10. Wibrogram w pkt 4 w ustawieniu 1 przed (kolor niebieski) i po odcięciu zgodnie z [95] (kolor pomarańczowy)
(rys. A. Kowalska-Koczwarą)

Rys. 6.11. Wibrogram w pkt 5 w ustawieniu 1 przed (kolor niebieski) i po zgodnie z [95] (kolor pomarańczowy) (rys. A. Kowalska-Koczwara)



Wykonano zarówno analizę metodą *RMS*, jak i metodą *VDV*. Wyniki analiz metodą *RMS* przedstawiono zbiorczo za pomocą wskaźnika *WODL*. Punktem kontrolnym, do którego odnoszono wyniki z innych punktów pomiarowych, był punkt nr 1. W Tab. 6.3–6.5 przedstawiono wyniki analizy metodą *RMS* wraz z różnicą procentową obliczoną w stosunku do punktu środkowego stropu. Różnice procentowe wyznaczano zgodnie ze wzorem 6.1:

$$r = \left| 1 - \frac{WODL_i}{WODL_1} \right| \cdot 100\% \quad (6.1)$$

gdzie: r – różnica w stosunku do wartości bazowej [%],
 i – indeks kolejnego punktu pomiarowego.

Występujące w Tab. 6.3–6.5 różnice w wartościach *WODL* odnoszące się do tych samych punktów pomiarowych wynikają z warunków eksperymentu czynnego. Zmienna była bowiem prędkość przejazdu przez próg oraz dokładność najazdu na próg ustawiony na drodze dojazdowej.

Tabela 6.3

Wartości *WODL* w poszczególnych punktach przy ustawieniu nr 1

Nr	f [Hz]	$WODL_1$ [-]	$WODL_2$ [-]	r [%]	$WODL_3$ [-]	r [%]	$WODL_4$ [-]	r [%]	$WODL_5$ [-]	r [%]
1.1	10	0,5368	0,5826	8,5	0,5247	2,3	0,5520	2,9	0,5720	6,6
1.2	10	0,8124	0,7923	2,5	0,7808	3,9	0,7917	2,5	0,8021	1,3
1.3	10	0,8063	0,8362	3,7	0,7591	5,8	0,7797	3,3	0,7553	6,3

Różnice w wartościach maksymalnych *WODL*, które są podstawą oceny wpływu drgań na ludzi w budynkach nie przekraczają w przypadku punktów w ustawieniu 1 (1/6 odległości od środka stropu) wartości 10%.

W przypadku punktów oddalonych o 1/3 rozpiętości stropu różnice są znaczące i sięgają ponad 70%. Ocena wpływu drgań na ludzi w budynku wykonana za pomocą punktów 6, 7 i 9 wskazuje na wartości poniżej progu odczuwalności drgań. Jedynie wartości otrzymane w pkt nr 8 dają wynik oceny taki sam jak punkt środkowy stropu.

Tabela 6.4

Wartości *WODL* w poszczególnych punktach przy ustawieniu nr 2

Nr	f [Hz]	$WODL_1$ [-]	$WODL_{10}$ [-]	r [%]	$WODL_{11}$ [-]	r [%]	$WODL_{12}$ [-]	r [%]	$WODL_{13}$ [-]	r [%]
3.1	10	0,3687	0,2056	44	0,1455	61	0,1030	72	0,2697	27
3.2	10	0,6547	0,4454	32	0,2924	55	0,1846	72	0,4101	37
3.3	10	1,122	0,9092	19	0,6574	42	0,1506	87	0,9529	15

Tabela 6.5

Wartości *WODL* w poszczególnych punktach przy ustawieniu nr 3

Nr	f [Hz]	$WODL_1$ [-]	$WODL_6$ [-]	r [%]	$WODL_7$ [-]	r [%]	$WODL_8$ [-]	r [%]	$WODL_9$ [-]	r [%]
2.1	10	2,3707	0,8211	65	0,6216	74	2,0749	12	0,6565	72
2.2	10	1,5156	1,3489	11	0,9465	38	1,5938	5,2	1,2222	19
2.3	10	1,1502	0,9533	17	0,7789	32	1,0301	10	1,1353	1,3

Podobnie w przypadku punktów oddalonych od środka o 2/3 rozpiętości stropu maksymalne wartości *WODL* różnią się w stosunku do punktu środkowego znacząco i różnica ta przekracza 70%.

Wykonana została także analiza VDV , której zbiorcze wyniki pokazano w Tab. 6.6. Różnica procentowa r była wyznaczana analogicznie jak dla $WODL$ (wzór 6.1).

Tabela 6.6

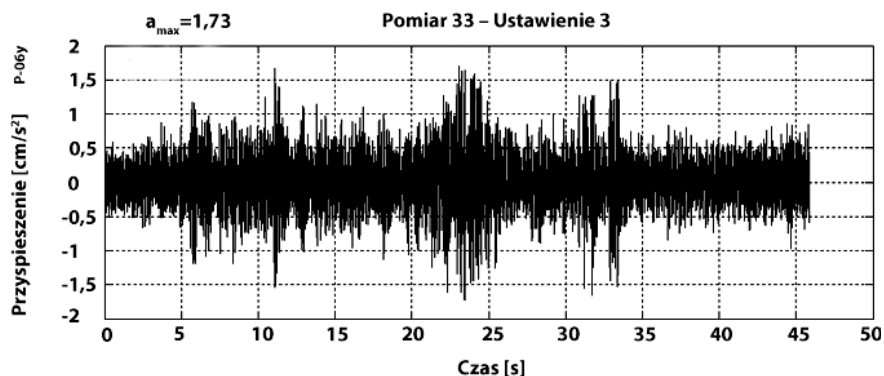
Wartości VDV w poszczególnych punktach w 3 ustawieniach

USTAWIENIE NR 1									
Nr	VDV_1 [m/s ^{1,75}]	VDV_2 [m/s ^{1,75}]	r [%]	VDV_3 [m/s ^{1,75}]	r [%]	VDV_4 [m/s ^{1,75}]	r [%]	VDV_5 [m/s ^{1,75}]	r [%]
1.1	0,0762	0,0836	9,8	0,0806	5,9	0,0871	14,3	0,0757	0,6
1.2	0,0639	0,0706	10,5	0,0587	8,1	0,0639	0	0,0611	4,4
1.3	0,0684	0,0779	14	0,0610	11	0,0754	10	0,0631	8
USTAWIENIE NR 2									
Nr	VDV_1 [m/s ^{1,75}]	VDV_6 [m/s ^{1,75}]	r [%]	VDV_7 [m/s ^{1,75}]	r [%]	VDV_8 [m/s ^{1,75}]	r [%]	VDV_9 [m/s ^{1,75}]	r [%]
2.1	0,2280	1,0360	354	0,0742	67	0,2514	10	0,0722	68
2.2	0,0750	0,0702	6,4	0,0636	15	0,0898	32	0,0727	3,1
2.3	0,0809	0,0785	3	0,0578	28,5	0,1118	38	0,0680	16
USTAWIENIE NR 3									
Nr	VDV_1 [m/s ^{1,75}]	VDV_{10} [m/s ^{1,75}]	r [%]	VDV_{11} [m/s ^{1,75}]	r [%]	VDV_{12} [m/s ^{1,75}]	r [%]	VDV_{13} [m/s ^{1,75}]	r [%]
3.1	0,0617	0,0388	37	0,0353	43	0,0642	4	0,0662	7
3.2	0,0484	0,0401	17	0,0349	28	0,0469	3	0,0559	15,5
3.3	0,1022	0,1067	4,4	0,0920	10	0,0502	51	0,1797	176

Ustawienie nr 1 (1/6 odległości od środka) ponownie jest najlepszym ustawieniem. Tym razem różnice procentowe przekraczają 10%, aczkolwiek nie zmieniają oceny wpływu drgań na ludzi przebywających w budynku. Ustawienia nr 2 i 3 (1/3 i 2/3 rozpiętości stropu) powodują znaczące różnice wyników oceny w stosunku do pomiaru z punktu kontrolnego.

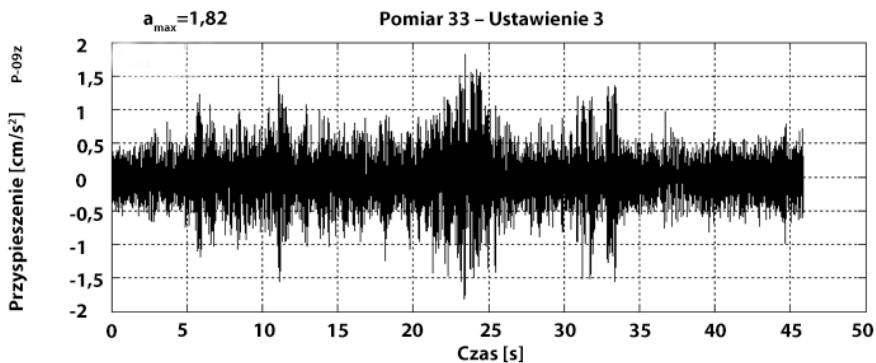
6.2. Wyniki eksperymentu biernego

W każdym ustawieniu czujników (Rys. 6.5) wykonano rejestrację drgań trwających dwie godziny każdy. Uzyskano w ten sposób łącznie 47 zarejestrowanych zdarzeń: 15 w ustawieniu nr 1, 18 w ustawieniu nr 2 i 14 w ustawieniu nr 3. Przykładowe wibrogramy w ustawieniu nr 1 zamieszczono na Rys. 6.12–6.16.



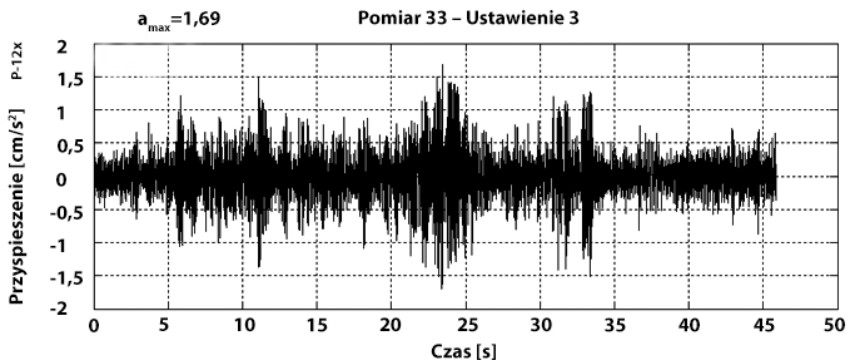
Rys. 6.12. Wibrogram w pkt 1 w ustawieniu 1 podczas eksperymentu biernego

(rys. A. Kowalska-Koczwara)



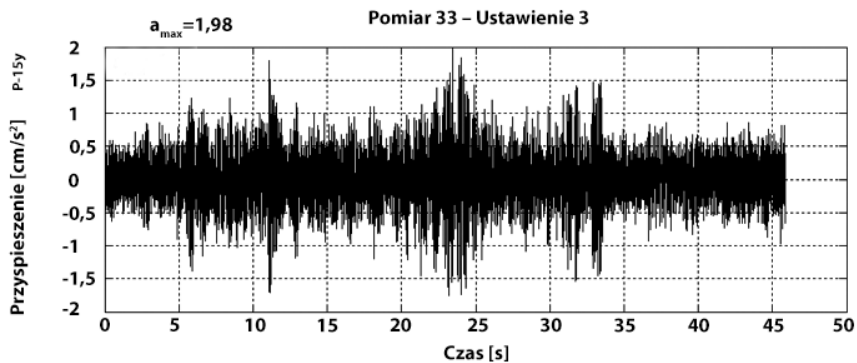
Rys. 6.13. Wibrogram w pkt 2 w ustawieniu 1 podczas eksperymentu biernego

(rys. A. Kowalska-Koczwarą)



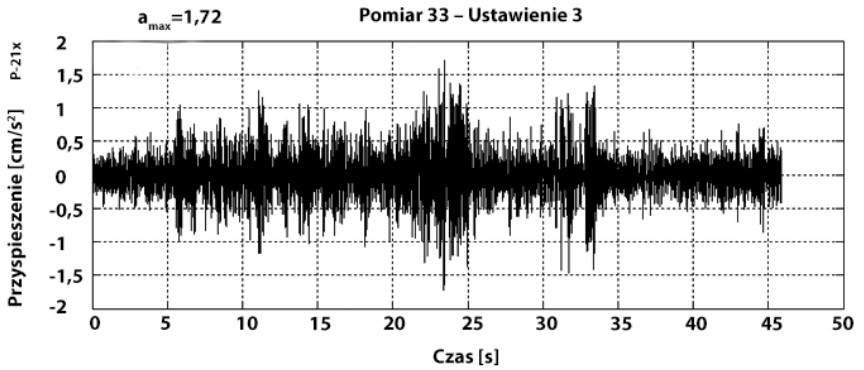
Rys. 6.14. Wibrogram w pkt 3 w ustawieniu 1 podczas eksperymentu biernego

(rys. A. Kowalska-Koczwarą)



Rys. 6.15. Wibrogram w pkt 4 w ustawieniu 1 podczas eksperymentu biernego

(rys. A. Kowalska-Koczwarą)



Rys. 6.16. Wibrogram
w pkt 5 w ustawieniu
1 podczas ekspery-
mentu biernego

(rys. A. Kowalska-Koczwara)

W Tab. 6.7 zestawiono wyniki zbiorcze analizy metodą *RMS* przedstawionej w formie wskaźnika *WODL* we wszystkich trzech ustawieniach czujników.

Tabela 6.7

Wartości *WODL* w poszczególnych punktach w 3 ustawienia

USTAWIENIE NR 1										
Nr	f [Hz]	$WODL_1$ [-]	$WODL_2$ [-]	r [%]	$WODL_3$ [-]	r [%]	$WODL_4$ [-]	r [%]	$WODL_5$ [-]	r [%]
1.1	10	0,4525	0,4481	1,0	0,4234	6,4	0,3939	12,9	0,4781	5,6
1.2	10	0,4399	0,4446	1,1	0,4109	6,6	0,3758	14,6	0,4815	9,4
1.3	10	0,4345	0,4355	0,2	0,4070	6,3	0,3699	14,8	0,4750	9,3
1.4	10	0,5649	0,5149	8,8	0,4811	14,8	0,4912	13,0	0,5583	1,1
1.5	10	0,4252	0,4266	0,3	0,3989	6,2	0,3633	14,5	0,4620	8,6
1.6	10	0,3195	0,3206	0,3	0,2988	6,4	0,2767	13,4	0,3541	10,8
1.7	10	0,4151	0,4164	0,3	0,3888	6,3	0,3706	10,7	0,4556	9,7
1.8	10	0,5055	0,5048	0,1	0,4716	6,7	0,4360	13,7	0,5513	9

USTAWIENIE NR 2										
Nr	f [Hz]	$WODL_1$ [-]	$WODL_6$ [-]	r [%]	$WODL_7$ [-]	r [%]	$WODL_8$ [-]	r [%]	$WODL_9$ [-]	r [%]
2.1	10	0,3698	0,3488	5,7	0,2840	23	0,2430	34	0,4110	11
2.2	10	0,4280	0,4011	6,3	0,3301	23	0,2831	34	0,4700	9,8
2.3	10	0,6240	0,5430	13	0,4401	29,5	0,3692	41	0,6384	2,3
2.4	10	1,1925	0,8714	27	0,8431	29	0,6042	50	1,2691	6,4
2.5	10	0,4076	0,3876	4,9	0,3089	24	0,2608	36	0,4643	14
2.6	10	0,3114	0,2915	6,4	0,2405	23	0,2067	34	0,3498	12
2.7	10	0,2582	0,2412	6,6	0,1993	23	0,1745	32	0,2816	9
2.8	10	0,5298	0,5026	5	0,4053	23,5	0,3387	36	0,5985	13
2.9	10	0,1980	0,1830	7,6	0,1545	22	0,1276	36	0,2248	14
2.10	10	0,4301	0,4069	5,4	0,3283	24	0,2749	36	0,4866	13
2.11	10	0,2440	0,2269	7	0,1895	23	0,1634	33	0,2668	9
2.12	10	0,3743	0,3522	6	0,2882	23	0,2499	33	0,4167	11
2.13	10	0,2733	0,2570	6	0,2104	23	0,1825	33	0,3040	11
2.14	10	0,5656	0,5376	5	0,4322	24	0,3623	36	0,6389	13
2.15	10	0,3187	0,2935	8	0,2373	26	0,2088	35	0,3409	7
2.16	10	0,4716	0,4498	4,6	0,3619	23	0,2910	38	0,5481	16
2.17	10	0,4622	0,4347	6	0,3562	23	0,3058	34	0,5038	9
2.18	10	0,4891	0,3602	26	0,2959	39	0,2665	45	0,4199	14
3.11	10	0,2788	0,1837	34	0,1128	59,5	0,0737	73	0,2290	18
3.12	10	0,3491	0,2348	33	0,1374	61	0,0867	75	0,2833	19
3.13	10	0,4786	0,3013	37	0,1852	61	0,0980	79,5	0,3534	26
3.14	10	0,4700	0,3185	32	0,1847	61	0,1098	77	0,3681	22

USTAWIENIE NR 3										
Nr	f [Hz]	$WODL_1$ [-]	$WODL_{10}$ [-]	r [%]	$WODL_{11}$ [-]	r [%]	$WODL_{12}$ [-]	r [%]	$WODL_{13}$ [-]	r [%]
3.1	10	0,4474	0,2976	35	0,1814	59	0,1133	75	0,3358	25
3.2	10	0,2693	0,1721	36	0,1114	57	0,0721	73	0,2025	25
3.3	10	0,5009	0,3005	40	0,1802	64	0,1160	77	0,3197	36
3.4	10	0,3282	0,2210	33	0,1298	60	0,0824	75	0,2458	25
3.5	10	0,5190	0,3540	32	0,2030	61	0,1157	78	0,3938	24
3.6	10	0,5763	0,3826	34	0,2265	61	0,1297	78	0,4472	22
3.7	10	0,3305	0,2143	35	0,1348	59	0,0716	78	0,2480	25
3.8	10	0,4165	0,2505	40	0,1438	65	0,0787	81	0,3016	28
3.9	10	0,3922	0,2624	33	0,1572	60	0,1120	71	0,3053	22
3.10	10	0,4024	0,2678	33	0,1560	61	0,1031	74	0,3051	24

Ustawienie czujników w odległości 1/6 od środka geometrycznego stropu (ustawienie nr 1) w eksperymencie biernym jest ustawieniem najlepszym z punktu widzenia analizy *RMS* i różnice w wartościach *WODL* w tych punktach są najmniejsze w stosunku do innych ustawień i nie przekraczają 15%. Ponadto widoczny jest wpływ nieregularności konstrukcji tego stropu na wyniki i tendencje na poszczególnych czujnikach. Wyniki w punkcie 4 cechuje mniejsza zgodność wartości *WODL* w odniesieniu do punktu środkowego niż ma to miejsce w przypadku punktów 2, 3 i 5.

W ustawieniu nr 2 (w odległości 1/3 od środka stropu) występują różnice w wartościach *WODL* względem punktu 1 sięgające nawet 50%, a w ustawieniu nr 3 (w odległości 2/3

od środka stropu) różnice te przekraczają 80%. Uwidacznia się również wpływ nieregularnego podparcia stropu: wyniki w punktach 7 i 8 w ustawieniu nr 2 oraz 11 i 12 w ustawieniu nr 3 odbiegają od wyników z punktu środkowego bardziej niż wyniki otrzymane z punktów 6 i 9 czy 10 i 13.

Wyniki analizy metodą *RMS* zilustrowane wartościami wskaźników *WODL* świadczą o tym, że strefa wyznaczona przez punkty oddalone o 1/6 od środka stropu może być tą strefą, w której pozyskane wyniki pomiaru można wykorzystać w ocenie wpływu drgań na ludzi w budynkach, bez obawy o zaburzenie wyników oceny.

Wykonano także analizy metodą *VDV* tych samych wibrogramów. a wyniki zestawiono w Tab. 6.8.

Tabela 6.8

**Wartości *VDV* w poszczególnych punktach
w trzech ustawieniach czujników**

USTAWIENIE NR 1									
Nr	VDV_1 [m/s ^{1,75}]	VDV_2 [m/s ^{1,75}]	<i>r</i> [%]	VDV_3 [m/s ^{1,75}]	<i>r</i> [%]	VDV_4 [m/s ^{1,75}]	<i>r</i> [%]	VDV_5 [m/s ^{1,75}]	<i>r</i> [%]
1.1	0,0327	0,0377	15	0,0359	10	0,0309	5	0,0383	17
1.2	0,0297	0,0351	18	0,0335	13	0,0273	8	0,0364	23
1.3	0,0294	0,0351	19	0,0329	12	0,0274	7	0,0362	23
1.4	0,0299	0,0338	13	0,0302	1,3	0,0276	7,5	0,0345	16
1.5	0,0263	0,0315	20	0,0280	7	0,0239	9	0,0324	23
1.6	0,0231	0,0281	22	0,0248	7	0,0214	7	0,0283	23
1.7	0,0252	0,0305	21	0,0266	5	0,0227	10	0,0308	22
1.8	0,0313	0,0370	18	0,0339	8	0,0296	5	0,0379	21

1.9	0,0475	0,0464	2	0,0437	8	0,0405	15	0,0476	0
1.10	0,0473	0,0476	0,6	0,0423	10	0,0403	15	0,0487	3
1.11	0,0306	0,0342	11	0,0302	1,3	0,0287	6	0,0345	13
1.12	0,0313	0,0347	11	0,0309	1,4	0,0294	6	0,0353	13
1.13	0,0271	0,0321	18	0,0288	6	0,0252	7	0,0324	19
1.14	0,0289	0,0343	19	0,0309	7	0,0266	8	0,0348	20
1.15	0,0295	0,0352	19	0,0322	9	0,0276	7	0,0350	18
USTAWIENIE NR 2									
Nr	VDV_1 [m/s ^{1,75}]	VDV_6 [m/s ^{1,75}]	r [%]	VDV_7 [m/s ^{1,75}]	r [%]	VDV_8 [m/s ^{1,75}]	r [%]	VDV_9 [m/s ^{1,75}]	r [%]
2.1	0,0257	0,0301	17	0,0260	1,3	0,0237	7,7	0,0323	26
2.2	0,0299	0,0340	14	0,0296	1	0,0285	4,5	0,0361	21
2.3	0,0332	0,0352	6	0,0292	12	0,0252	24	0,0381	15
2.4	0,0487	0,0440	9,7	0,0398	18	0,0326	33	0,0551	13
2.5	0,0280	0,0313	12	0,0273	2,5	0,0255	9	0,0341	22
2.6	0,0231	0,0266	15	0,0223	4	0,0204	12	0,0282	22
2.7	0,0287	0,0309	7,5	0,0251	12,5	0,0236	18	0,0329	14,5
2.8	0,0342	0,0382	12	0,0320	6,4	0,0285	17	0,0412	20
2.9	0,0222	0,0257	16	0,0218	2	0,0195	12	0,0294	32
2.10	0,0366	0,0377	3	0,0307	16	0,0287	22	0,0394	7,6
2.11	0,0221	0,0262	18	0,0228	3	0,0198	10,5	0,0274	24
2.12	0,0255	0,0295	16	0,0249	2,3	0,0224	12	0,0318	25
2.13	0,0236	0,0267	13	0,0223	6	0,0200	15	0,0278	17
2.14	0,0333	0,0385	16	0,0327	2	0,0294	12	0,0407	22
2.15	0,0231	0,0269	16,5	0,0224	3	0,0204	12	0,0279	21

2.16	0,0414	0,0364	12	0,0337	18,5	0,0324	22	0,0455	10
2.17	0,0348	0,0375	8	0,0305	12	0,0281	19	0,0380	9
2.18	0,0301	0,0301	0,2	0,0245	18,5	0,0224	26	0,0300	0,2
USTAWIENIE NR 3									
Nr	VDV_1 [m/s ^{1,75}]	VDV_{10} [m/s ^{1,75}]	r [%]	VDV_{11} [m/s ^{1,75}]	r [%]	VDV_{12} [m/s ^{1,75}]	r [%]	VDV_{13} [m/s ^{1,75}]	r [%]
3.1	0,0301	0,0287	5	0,0260	14	0,0179	41	0,0318	5,5
3.2	0,0234	0,0228	3	0,0222	5	0,0158	33	0,0258	10
3.3	0,0291	0,0257	12	0,0222	24	0,0156	46	0,0282	3
3.4	0,0285	0,0273	4	0,0248	13	0,0188	34	0,0303	6
3.5	0,0288	0,0278	3,5	0,0214	26	0,0160	44	0,0303	5,5
3.6	0,0327	0,0295	10	0,0226	31	0,0176	46	0,0338	3
3.7	0,0254	0,0255	0,2	0,0220	13	0,0180	29	0,0278	9
3.8	0,0264	0,0250	5	0,0216	18	0,0169	36	0,0282	7
3.9	0,0253	0,0249	1,4	0,0198	22	0,0165	35	0,0278	10
3.10	0,0274	0,0256	6,7	0,0223	18,5	0,0161	42	0,0284	3,6
3.11	0,0213	0,0211	0,8	0,0188	12	0,0126	41	0,0236	11
3.12	0,0273	0,0256	6	0,0214	22	0,0166	39	0,0295	8
3.13	0,0320	0,0269	16	0,0230	28	0,0182	43	0,0318	0,6
3.14	0,0362	0,0352	2,7	0,0312	14	0,0240	34	0,0360	0,6

Wyniki analizy metodą VDV są nieco inne niż wyniki analizy RMS . Ustawienie nr 1 jest nadal najlepszym ustawieniem czujników, a różnice w wynikach w tym ustawieniu sięgają 23%. Natomiast ustawienie nr 2 tylko nieznacznie odbiega od ustawienia nr 1. Można to przyjąć jako uzasadnienie zapisów

w normie brytyjskiej odnoszących się do lokalizacji punktu pomiarowego służącego do oceny wpływu drgań na ludzi przebywających w budynkach [11]. Norma brytyjska posługuje się tylko metodą *VDV*. W opisanych badaniach poziom zarejestrowanych drgań był bardzo niski i trudno na podstawie tych pomiarów stwierdzić, że usytuowanie czujników w strefie $1/3$ odległości od środka geometrycznego stropu dostarcza wystarczająco dokładnych danych do oceny wpływu drgań na ludzi w budynkach za pomocą metody *VDV*.

7. ZAKOŃCZENIE

7.1. Podsumowanie

W pracy analizowano wybrane aspekty wpływu drgań transportowych na ludzi przebywających w budynkach. Opracowano i przedstawiono metodykę pomiarowo-interpretacyjną wyznaczania parametrów służących do oceny wpływu drgań na ludzi w budynkach. Metodyka ta została opracowana w odniesieniu do dwóch głównych, funkcjonujących obecnie w normatywach międzynarodowych, metod oceny: metody *RMS* i metody *VDV*. Metoda *MTVV* bardzo zbliżona do metody *RMS* nie wymaga oddzielnej analizy. Wytyczne zamieszczone w rozdziale 2 niniejszego opracowania mogą stanowić zbiór dobrych praktyk w zakresie pomiarów dynamicznych dostarczających informacji do oceny wpływu drgań na ludzi w budynkach.

Badania wykonano na czterech wybranych budynkach znajdujących się w strefie oddziaływań transportu drogowego i szynowego (tramwaj i pociągi metra). W odniesieniu do każdego budynku analizowano minimum 20 zdarzeń. Główny wpływ na wynik oceny miała odległość od źródła drgań i był

to wpływ wyraźnie większy od rodzaju tego źródła. Warto tu zaznaczyć, że przy ustawionej czułości urządzeń pomiarowych rejestrowane były zdarzenia znaczące, wśród których przekroczenia poziomu komfortu wibracyjnego występowały przy przejazdach pojazdów szynowych oraz samochodów ciężarowych, nie odnotowano natomiast naruszeń warunków niezbędnego komfortu podczas przejazdów samochodów osobowych (liczne przejazdy nie rejestrowane podczas pomiarów z uwagi na poziom drgań) i autobusów, co może oznaczać, że drgania pochodzące od stosunkowo lekkich pojazdów kołowych mają mniejszy wpływ na ludzi znajdujących się w budynkach.

W pracy badano istotny, szczególnie w kontekście dwóch różnych metod oceny, wpływ czasu trwania drgań na wynik oceny. Należy tu pamiętać, że dawka wibracji *VDV* zdefiniowana jako ekspozycja na drgania uwzględnia czas trwania drgań już w formule służącej do jej wyznaczania. Natomiast metoda *RMS* w niewielkim stopniu uwzględnia liczbę zdarzeń występujących w ciągu doby (poprzez współczynnik korekcyjny n). Stąd istotny jest wpływ czasu analizowanego sygnału na wynik oceny przeprowadzony obydwoma metodami. Wykazano, że czas trwania pojedynczego zdarzenia nie ma znaczącego wpływu na wynik oceny przeprowadzonej każdą z metod. Znaczenie ma natomiast to, czy analizie danych zostanie poddany cały wibrogram z kilkoma zdarzeniami, czy poszczególne zdarzenia będą analizowane oddzielnie. W odniesieniu do zdarzeń analizowanych zgodnie z polską normą (czas

trwania drgań wyznaczany wg [95]) wskaźniki *WODL* związane z analizą metodą *RMS* i wartości dawki wibracji *VDV* są każdorazowo wyższe od wyników uzyskanych w ocenie całego zarejestrowanego sygnału. Można więc uznać, że zawarta w polskiej normie definicja czasu trwania drgań jest po „bezpiecznej” stronie oceny.

Na podstawie zapisów normatywnych innych krajów, w tym głównie Australii, próbowano ustalić wpływ współczynnika szczytu na wynik oceny wpływu drgań na ludzi w budynkach, wykonanej za pomocą obydwu metod. Nie udało się wyznaczyć konkretnej zależności w odniesieniu do wskaźnika *WODL*, natomiast stwierdzono pewną zależność wartości dawki wibracji od współczynnika szczytu *CF*. Nie jest to mocna relacja, a raczej pewien trend, który pokazuje, że im większa jest wartość *CF*, tym większa jest wartość dawki wibracji *VDV*.

Kolejnym zagadnieniem podjętym w pracy był wpływ miejsca usytuowania czujnika służącego do pomiarów drgań na ludzi w budynkach na wynik oceny wykonanej obydwoma metodami. Celem analizy było ustalenie, czy można wskazać strefę, w której bez wpływu na wynik oceny można umiejscowić czujnik pomiarowy. Badania przeprowadzone w dwóch kolejnych latach na tym samym obiekcie, poddanych zarówno czynnemu, jak i biernemu eksperymentowi, wykazały, że jest możliwe wyznaczenie takiej strefy. W przypadku analizy *RMS* najbardziej odpowiednią strefą jest zbiór punktów w odległości mniejszej bądź równej $1/6$ odległości od środka rozpiętości

stropu. W przypadku analizy metodą *VDV* strefą taką może być powierzchnia nie większa niż $1/3$ odległości od środka stropu, aczkolwiek, ze względu na niski poziom przyspieszeń zarejestrowanych zdarzeń, kwestia wyznaczenia strefy umieszczenia czujnika w celu pozyskania danych do analizy metodą *VDV* wymaga dalszych badań.

Praktycznym rezultatem pracy jest metodyka pomiarowo-interpretacyjna oceny wpływu drgań na ludzi oraz wyznaczona zależność pomiędzy wskaźnikiem *WODL* a dawką wibracji *VDV*, która w sposób uproszczony pozwala oszacować poprawność otrzymanych wyników. Dodatkową praktyczną wskazówką przydatną przy pomiarach drgań jest wskazanie lokalizacji punktu pomiarowego na stropie pomieszczenia w jego geometrycznym środku, a jeśli jest to niemożliwe, to co najwyżej w odległości $1/6$ rozpiętości stropu od tego środka.

7.2. Nowe elementy pracy i kierunki dalszych badań

Innowacją w stosunku do zagadnień opisanych w literaturze przedmiotu jest wyznaczenie zależności pomiędzy wartością dawki wibracji *VDV* a wskaźnikiem odczuwalności drgań przez ludzi *WODL* w odniesieniu do pojedynczych zdarzeń. Należy pamiętać, że kryteria oceny według metody *VDV* odnoszą się do narażenia całodziennego lub całonocnego. Celem będzie pogłębienie analiz w celu wyznaczenia zależności

między wynikiem oceny wpływu drgań na ludzi przeprowadzonej obydwoma metodami we wszystkich trzech pozycjach ułożenia ciała człowieka przy występowaniu pojedynczych zdarzeń o różnym stopniu ich intensywności. W tym celu należałoby przeprowadzić badania z udziałem ludzi (co wymaga uzyskania stosownej zgody komisji bioetyki).

W pracy określono, że czas trwania pojedynczego zdarzenia wyznaczony zgodnie z polską normą można przyjąć za ujęcie obiektywne. Dzięki temu jednoznaczny sposób określania czasu trwania drgań nie będzie wpływał na wynik oceny. Decydującym czynnikiem będzie więc intensywność drgań. Nie określono jednak, jaki wpływ na wynik oceny będzie miała analiza wibrogramu, który został zarejestrowany i nieobcięty zgodnie z zasadą podaną w [95]. Interesującym zagadnieniem będzie porównanie wpływu czasu trwania drgań wyznaczanego zgodnie z [95] i wyznaczanego zgodnie z zasadą przyjętą w [48] (czas trwania drgań jest to przedział, w którym wartości szczytowe są większe od 0,1 maksymalnej amplitudy) na wynik oceny wpływu drgań na ludzi w budynkach.

Ważnym rezultatem badań jest wyznaczenie wpływu wartości współczynnika szczytu CF na wynik oceny wpływu drgań na ludzi w budynkach. Wyniki tej analizy można przyjąć jako uzasadnienie do prowadzenia szerszych badań na ten temat i to z udziałem ludzi.

Istotnym elementem pracy są rezultaty dotyczące wyznaczenia strefy, w której należy umieszczać punkty pomiarowe

w celu pozyskania informacji do oceny wpływu drgań na ludzi przebywających w budynkach i w bierny sposób odbierających drgania. Próbę tę podjęto, przeprowadzając badania na budynku o konstrukcji żelbetowej i nieregularnym rozstawie słupów. Pomimo różnych ograniczeń udało się ustalić strefę, poza którą nie należy umieszczać czujnika w pomiarach, których wyniki mają służyć do oceny wpływu drgań na ludzi. Kierunkiem dalszych prac w tym zakresie będzie wykonanie i analiza pomiarów przeprowadzonych na większej liczbie budynków żelbetowych o stropach regularnych oraz próba wyznaczenia takiej strefy dla budynków o stropach drewnianych. Planowane pomiary, ze względu na ograniczenia sprzętowe, będą musiały odbywać się etapami, tym razem jednak proponowane są dwa ustawienia czujników. Każdorazowo punktem stałym będzie punkt środka geometrycznego stropu. Wymuszenie dynamiczne powinno być na tyle duże, aby wynik oceny wpływu drgań na ludzi przekraczał wartości progowe. Źródłem drgań dającym taki poziom wymuszenia dynamicznego jest przejazd pojazdów szynowych w bliskiej odległości od budynku.

LITERATURA

1. Alem N., *Application of the New ISO 2631-5 to Health Hazard Assessment of Repeated Shocks in U.S. Army Vehicles*, Industrial Health, Vol. 43, 2005, pp. 403–412.
2. Architectural Institute of Japan (AIJ), *Guidelines for the Evaluation of Habitability to Building Vibration*, 2004.
3. Arnberg P.W., Bennerhult O., Eberhardt J.L., *Sleep disturbances caused by vibrations from heavy road traffic*, The Journal of the Acoustical Society of America, 88(3), 1990, pp. 1486–1493.
4. AS 2670.2: Evaluation of human exposure to whole-body vibration – Continuous and shock-induced vibration in buildings (1 Hz to 80 Hz), 1990.
5. Bachmann H. et al., *Vibration Problems in Structures*, Birkhäuser Verlag, Basel 1995.
6. Bachmann H., Amman W., *Vibrations in Structures: Induced by Man and Machines*, International Association for Bridge and Structural Engineering, 1987.
7. Bendat J., Piersol A., *Metody analizy i pomiaru sygnałów losowych*, PWN, Warszawa 1979.

8. Bernardini E., Spence S.M.J., Kwon D.K., Kareem A., *Performance-Based Design of High-Rise Buildings for Occupant Comfort*, Journal of Structural Engineering, Vol. 141, Issue 10, October 2015.
9. Boggs D., *Acceleration Indexes for Human Comfort in Tall Buildings – Peak or RMS? CTBUH Monograph Chpt. 13: Motion Perception Tolerance and Mitigation*, 1997.
10. British Standard BS 6472 (1992), Guide to evaluation of human exposure to vibration in buildings (1 Hz to 80 Hz).
11. British Standard BS 6472-1 (2008), Guide to evaluation of human exposure to vibration in buildings. Part 1: Vibration sources other than blasting.
12. Brzakala W., Herbut A., Rybak J., *Recommendations for ground vibrations survey in course of geotechnical works*, Paper presented at the International Multidisciplinary Scientific GeoConference: SGEM: Surveying Geology & mining Ecology Management, Vol. 2, Sofia 2014, pp. 747–754.
13. Burton M.D., Kwok K.C.S., Hitchcock P.A., *visual cues influencing the perception of wind-induced tall building motion*, [in:] Proceedings of Fourth International Conference on Advances in Wind and Structures, Jeju, Korea, 28–30 May 2008, pp. 368–380.
14. Burton M.D., Kwok K.C.S., Hitchcock P.A., Roberts R.D., *Acceptability curves derived from motion simulator*

- investigations and previous experience with building motion*, [in:] Proceedings of 10th Americas Conference on Wind Engineering, Baton Rouge, Louisiana, USA, 31 May–4 June 2005, pp. 286–287.
15. Cann A.P., Salmoni A.W., Vi P., Eger T.R., *An Exploratory Study of Whole-Body Vibration Exposure and Dose While Operating Heavy Equipment in the Construction Industry*, Applied Occupational and Environmental Hygiene, 18:12, 2003, pp. 999–1005.
 16. Caprioli A., Reynolds P., Vanali M., *Evaluation of serviceability assessment measures for different stadia structures and different live concert events*, IMAC XXV, Orlando, Florida 2007.
 17. Ciesielski R., *Próba klasyfikacji szkodliwości wpływów drgań i wstrząsów na ludzi znajdujących się w budynkach*, Zeszyty Naukowe Politechniki Krakowskiej, nr 1, Kraków 1966.
 18. Ciesielski R., Kawecki J., Maciąg E., *Ocena wpływu wibracji na budowle i ludzi w budynkach*, ITB, Warszawa 1993.
 19. Coermann R.R., *The Mechanical Impedance of the Human Body in Sitting and Standing Position at Low Frequencies*. Human Factors, The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society, Vol. 4, October 1962, pp. 227–253.
 20. Cowley D.M., *International Standards in the Vibration Field*, [in:] *Infrasound and Low Frequency Vibration*, Academic Press, London 1976.

21. Croy I., Smith M.G., Persson Waye K., *Effects of Train Noise and Vibration on Human Heart Rate During Sleep: an Experimental Study*, *BMJ Open* 2013, 3:e002655.
22. Degrande G., Schevenels M., Chatterjee P., Van de Velde W., Hölscher P., Hopman V., Wang A., Dadkash N., *Vibrations due to a test train at variable speeds in a deep bored tunnel embedded in London clay*, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 293, Issues 3–5, 2006, pp. 626–644.
23. DIN 4150-2, *Structural vibration, Part 2: Human exposure to vibration in buildings*, 1999.
24. Edwards J., *Survey of environmental noise and vibration from London Underground trains*, International congress, Noise control engineering Internoise, Liverpool 1996.
25. Eger T., Stevenson J., Boileau P.-É., Salmoni A., *VibRG, Predictions of health risks associated with the operation of load-haul-dump mining vehicles: Part 1 – Analysis of whole-body vibration exposure using ISO 2631-1 and ISO-2631-5 standards*, *International Journal of Industrial Ergonomics*, vol. 38, Issues 9–10, September–October 2008, pp. 726–738.
26. Els P.S., *The applicability of ride comfort standards to off-road vehicles* *Journal of Terramechanics*, Vol. 42, Issue 1, January 2005, pp. 47–64.
27. Fields J., *Railway noise and vibration annoyance in residential areas*, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 66(3), 1979, pp. 445–458.

28. Findeis H., Peters E., *Disturbing Effects of Low Frequency Sound Immissions and Vibrations in Residential Buildings*, Noise and Health, Vol. 6, 23, 2004, pp. 29–35.
29. Goto T., *Studies on wind-induced motion of tall buildings based on occupant's reactions*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 13, 1983, pp. 241–252.
30. Griffin M.J., *A comparison of standardized methods for predicting the hazards of whole-body vibration and repeated shocks*, Journal of Sound and Vibration, Vol. 215, 1998, pp. 883–914.
31. Griffin M.J., *Handbook of Human Vibration*, Academic Press, London 1990.
32. Griffin M.J., *Evaluation of Vibration with Respect to Human Response*, SAE Paper 860047, 1986.
33. Gunston T.P., Rebelle J., Griffin M.J., *A comparison of two methods of simulating seat suspension dynamic performance*, Journal of Sound and Vibration, Vol. 278, Issues 1–2, 22 November 2004, pp. 117–134.
34. Hao H., Ang T.C., Shen J., *Building vibration to traffic-induced ground motion*, Building and Environment, Vol. 36, Issue 3, 1 April 2001, pp. 321–336.
35. Howarth H., Griffin M.J., *Subjective response to combined noise and vibration: summation and interaction effects*, Journal of Sound and Vibration, 143(3), 1990, pp. 443–454.

36. Howarth H., Griffin M.J., *Human response to simulated intermittent railway-induced building vibration*, Journal of Sound and Vibration, 120(2), 1988, pp. 413–420.
37. Howarth H.V.C., Griffin M.J., *The Annoyance Caused by Simultaneous Noise and Vibration from Railways*, Journal of the Acoustical Society of American, 89(5), 1991, pp. 2317–2323.
38. Howarth H.V.C., Griffin M.J., *The Relative Importance of Noise and Vibration from Railways*, Applied Ergonomics, 21(2), 1990, pp. 129–134.
39. Howarth H.V.C., Whitham E.M., *Human Response to Simulated Intermittent Railway Induced Building Vibration*, Journal of Sound and Vibration, 120(2), 1988, pp. 413–420.
40. Huang Y., Griffin M.J., *The effects of sound level and vibration magnitude on the relative discomfort of noise and vibration*, The Journal of the Acoustical Society of America, 131, 4558, 2012.
41. Hunaidi O., Tremblay M., *Traffic-induced building vibrations in Montréal*. Canadian Journal of Civil Engineering, 1997, 24(5), pp. 736–753.
42. International Organization for Standardization ISO 2631 (1974), *Evaluation of Human Exposure to Whole-Body Vibration*.
43. International Organization for Standardization ISO 2631-1 (1985), *Evaluation of Human Exposure to Whole-Body Vibration Part 1: General requirements*.

44. International Organization for Standardization ISO 2631-2 (1989), Evaluation of Human Exposure to Whole-Body Vibration Part 2: Human Exposure to Continuous and Shock-Induced Vibrations in Buildings (1 to 80 Hz).
45. International Organization for Standardization, ISO 2631-1 (1997), Mechanical vibration and shock: Evaluation of human exposure to whole-body vibration – Part 1: General requirements.
46. International Organization for Standardization, ISO 2631-2 (2003), Mechanical vibration and shock – Evaluation of human exposure to whole-body vibration – Part 2: Vibration in buildings (1 Hz to 80 Hz).
47. International Organization for Standardization, ISO 6897 (1984), Guidelines for the evaluation of the response of occupants of fixed structures, especially buildings and off-shore structures, to low frequency horizontal motion (0.063 to 1 Hz).
48. International Organization for Standardization, ISO 2631-5 (2004), Mechanical vibration and shock: evaluation of human exposure to whole-body vibration – part 5: method for evaluation of vibration containing multiple shocks.
49. Irwin A.W., *Motion in Tall Buildings*, [in:] Beedle L.S. (eds.) *Second Century of the Skyscraper*, Springer, Boston, MA 1988, pp. 759–778.
50. Irwin A.W., *Human Response to Dynamic Motion of Structures*, *The Structural Engineer*, Vol. 56A, No. 9, 1978, pp. 237–244.

51. Jakubczyk-Gałczyńska A., Jankowski R., *Traffic-induced vibrations. The impact on buildings and people*, The 9th Conference Environmental Engineering, Vilnius, Lithuania, 22–23 May 2014.
52. Jeary A.P., Morris R.G., Tomlinson R.W., *Perception of vibration-tests in tall buildings*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 28, 1988, pp. 361–370.
53. Johannig E., *Vibration and shock exposure of maintenance-of-way vehicles in the railroad industry*, Applied Ergonomics, Vol. 42, Issue 4, May 2011, pp. 555–562.
54. Johannig E., Fischer S., Christ E., Göres B., Landsbergis P., *Whole-Body Vibration Exposure Study in U.S. Railroad Locomotives – An Ergonomic Risk Assessment*, AIHA Journal, 63:4, 2002, pp. 439–446.
55. Kanda J., Tamura Y., Fujii K., Ohtsuki T., Shioya K., Nakata S., *Probabilistic evaluation of human perception threshold of horizontal vibration of buildings (0.125 to 6.0 Hz)*, [in:] Proceedings of Structure Congress XII, Vol. 1, 1994, pp. 648–653.
56. Kawecki J., *Diagnostyka wpływu drgań komunikacyjnych na budynki i ludzi w budynkach*, Transport Miejski i Regionalny, Vol. 11, 2006, pp. 17–27.
57. Kawecki J., Kowalska A., *Analysis of influence of vibrations on humans in buildings in standards approach*, Archives of Civil Engineering, LVIII, 2, 2012, pp. 223–239.

58. Kawecki J., Stypuła K., *Błędy w prognozowaniu i diagnostyce wpływów dynamicznych na budynki*, Czasopismo Techniczne, z. 1-M/2008, pp. 127–136.
59. Kawecki J., Stypuła K., *Designing Roads Near the Buildings Providing the Necessary Vibrational Comfort for the Residents*, Procedia Engineering, Vol. 57, 2013, pp. 549–556.
60. Kawecki J., Stypuła K., *Zapewnienie komfortu wibracyjnego ludziom w budynkach narażonych na oddziaływania komunikacyjne*, Wydawnictwo PK, Kraków 2013.
61. Kawecki J., Kowalska-Koczwara A., Stypuła K., *Consideration of criteria of vibration comfort of people in diagnosis and design of buildings*, World Academy of Science, Engineering and Technology 59, Venice, Italy, November 2011, pp. 1496–1502.
62. Klæboe R., Fyhri, A., *People's reactions to Vibrations in Dwellings from Road and Rail*, TØI report, 443, 1999.
63. Klæboe R. et al., *Vibration in dwellings from road and rail traffic – Part II: exposure-effect relationships based on ordinal logit and logistic regression models*, Applied Acoustics, 64(1), 2003, pp. 89–109.
64. Knall V., *Railway noise and vibration: effects and criteria*, Journal of Sound and Vibration, 1996, 193(1), pp. 9–20.
65. Kowalska-Koczwara A., Stypuła K., *Analiza porównawcza dwóch metod określania wpływu drgań na ludzi w budynkach*, Czasopismo Techniczne 1/2017, pp. 53–64.

66. Kwok K., Buñon M., Abdelrazaq A., *Wind-Induced Motion of Tall Buildings: Designing for Habitability*, American Society of Civil Engineers (ASCE), USA 2015.
67. Lawther A., Griffin M.J., *Prediction of the incidence of motion sickness from the magnitude, frequency, and duration of vertical oscillation*, The Journal of the Acoustical Society of America 82, 1987, 957.
68. Lee P.J., Lee B.K., Griffin M.J., *Evaluation of floor vibrations induced by walking in reinforced concrete buildings*, [in:] Proc. of Inter Noise Conference, Innsbruck/Austria, 15–18 September 2013, pp. 1–6.
69. Lee P.J., Lee B.K., Griffin M.J., *Evaluation of Floor Vibrations Induced by Walking Barefoot in Heavyweight Buildings*, Acta Acustica united with Acustica, Vol. 101, Number 6, November/December 2015, pp. 1199–1210(12).
70. Lenzen K.H., *Vibration of Steel Joist-Concrete Slab Floors*, AISC. Engineering Journal, Vol. 3, 1966, pp. 133–136.
71. Lewis C.H., Griffin M.J., *A comparison of evaluations and assessments obtained using alternative standards for predicting the hazards of whole-body vibration and repeated shocks*, Journal of Sound and Vibration, Vol. 215, 1998, pp. 915–926.
72. Licitra G., Fredianelli L., Petri D., Vigotti M.A., *Annoyance evaluation due to overall railway noise and vibration in Pisa urban areas*, Science of The Total Environment, Vol. 568, 15 October 2016, pp. 1315–1325.

73. Lines J., Stiles M., Whyte R., *Whole Body Vibration During Tractor Driving*, Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control, 1995, Vol. 14, Issue 2, pp. 87–10.
74. Mansfield N.J., Holmlund P., Lundstrom R., *Comparison of subjective responses to vibration and shock with standard analysis. Methods and absorbed power*, Journal of Sound and Vibration, 2000, Vol. 230(3), pp. 477–491.
75. Matsumoto Y., Kunimatsu S., Ishikawa T., Hirao Y., *Recent reseacrh activities for the assesment of vibration in living environment with respect to human perception in Japan*, Conference Acoustics'08 Paris, 29 June–4 July 2008.
76. McCormick M.M., *Office Floor Vibration: Design Criteria and Tests*, Melbourne Research Laboratories, The Broken Hill Proprietary Company Lmt., Melbourne, Australia 1974.
77. Mendis P., Ngo T., Haritos N., Hira A, Samali B., Cheung J., *Wind Loading on Tall Buildings*, EJSE Special Issue: Loading on Structures, 2007.
78. Menzies D, Bourbeau J., *Building-Related Illnesses*, The New England Journal of Medicine, 1997.
79. Miwa T., *Evaluation methods for vibration effect: part 8. The vibration greatness of random waves*, Industrial Health, Vol. 6, 1969, p. 11.
80. Miwa T., Yonekawa Y. *Evaluation methods for vibrations*, Applied Acoustics, Vol. 7, No. 2, 1974, pp. 83–101.

81. Murray T.M., *Acceptability Criterion for Occupant-Induced Floor Vibrations*, Engineering Journal, American Institute of Steel Construction, 2nd Otr., 1981, pp. 62–70.
82. Murray T.M., *Acceptability criterion for occupant-induced floor vibrations*, Sound and Vibration, 13, 1979, pp. 24–30.
83. Nader M., Purta E., *Wpływ metra warszawskiego na ludzi w budynkach mieszkalnych*, Czasopismo Techniczne, 3-M/2005, pp. 217–224.
84. Noguchi K., Hiwatashi A., Kobayashi A., Tsujita O., Goto T., *Human response to horizontal motion of tall buildings*, [in:] Proceedings of International Colloquium on Structural Serviceability of Buildings, IABSE Reports, Vol. 69, Goteborg, Sweden 1993, pp. 53–58.
85. Öhrström E., Skånberg A.-B., *A field survey on effects of exposure to noise and vibration from railway traffic, part I: annoyance and activity disturbance effects*, Journal of Sound and Vibration, Vol. 193, 1996, pp. 39–47.
86. Öhrström E., *Effects of exposure to railway noise—a comparison between areas with and without vibration*. Journal of Sound and Vibration, 205(4), 1997, pp. 555–560.
87. Pachla F., Radecki-Pawlik B., Tatara T., Stypuła K., *Optymalizacja zabezpieczeń przed drganiami kolejowymi na przykładzie nastawni w Białej Rawskiej*, Przegląd Komunikacyjny, 2017, Vol. 72, nr 6, pp. 2–8.

88. Paddan G.S., Griffin M.J., *Evaluation of whole-body vibration in vehicles*, Journal of Sound and Vibration, Vol. 253, Issue 1, 23 May 2002, pp. 195–213.
89. Paschold H.W., Mayton A.G., *Whole-Body Vibration: Building Awareness in SH&E*, Professional Safety, Vol. 56, Issue 4, 2011.
90. Paulsen R., Kastka J., *Effects of combined noise and vibration on annoyance*, Journal of Sound and Vibration, Vol. 181, 1995, pp. 295–314.
91. Peris E., Woodcock J., Sica G., Sharp C., Moorhouse A.T., Waddington D.C., *Effect of situational, attitudinal and demographic factors on railway vibration annoyance in residential areas*, The Journal of the Acoustical Society of America 135, 194, 2014.
92. Peris E., Woodcock J., Sica G., Sharp C., Moorhouse A.T., Waddington D.C., *Annoyance due to railway vibration at different times of the day*, The Journal of the Acoustical Society of America 131, EL191, 2012.
93. Peris E. et al., *Factors influencing the human response to vibration from railways in residential environments*, [in:] IoA Noise in the Built Environment, 2010.
94. PN-88/B-02171 (1988), *Ocena wpływu na ludzi w budynkach* (in Polish).
95. PN-B-02171:2017-06 (2017), *Evaluation of vibrations influence on people in buildings* (in Polish).

96. Pool T.W.III, Murray T.M., *Human response to structure-born vibrations: a literature review*, University of Research Oklahoma Institute, 1972.
97. Pradko F., Lee R., Kaluza V., *Theory of human vibration response*, S&T Reports, 1966.
98. Randall J.M. , Matthews R.T., Stiles M.A., *Resonant frequencies of standing humans*, Ergonomics, Vol. 40, 1997, Issue 9, pp. 879–886.
99. Reiher H., Meister F.J., *The effect of vibration on people. Forsch Gebeite Ingenieurwes 1931; 2:381-6* (in German) English Translation: Report No. F-TS-616-RE, Headquarters Air Material Command, Wright Field, Ohio, 1946.
100. Richter J., Meister A., Bluethner R., Seidel H., *Subjective evaluation of isolated and combined exposure to whole-body vibration and noise by means of crossmodality matching*, *Activitas Nervosa Superior* (Prag, CS) Vol. 30, 1988, pp. 47–51.
101. Różowicz J., Korzeb J., *Analiza wpływu oddziaływań dynamicznych na budynki i ludzi w nich przebywających w strefie oddziaływania środków transportu*, Logistyka, 2011.
102. Setareh M., *Vibration Serviceability of a Building Floor Structure. II: Vibration Evaluation and Assessment*, *Journal of Performance of Constructed Facilities* Vol. 24, Issue 6, December 2010.
103. Speckhart F.H., Harrison E., *Design of shock absorber to improve ride comfort by reducing jerk*, SAE Meeting Society of Automotive Engineers (SAE), 1968, pp. 73–80.

104. Stypuła K. *Drgania wywołane eksploatacją miejskiego transportu szynowego – badania i zapobieganie*, Transport Miejski i Regionalny, Vol. 10, 2006, pp. 2–11.
105. Stypuła K., *Wpływ drgań komunikacyjnych na budynki i przebywających w nich ludzi*, Materiały Budowlane, Vol. 3, 2009, pp. 120–131.
106. Stypuła K., *Vibrations caused by train passages in metro tunnel compared with vibrations from surface transportation*, [in:] Proc. of the 6th International Conference on Structural Dynamics EURODYN 2005, C. Soize, G.I. Schuëller (eds.), Millpress, Rotterdam, Vol. 3, pp. 2059–2064.
107. Tamura Y., Kawana S., Nakamura O., Kanda J., Nakata S., *Evaluation perception of wind-induced vibration in buildings*, Structures & Buildings, Vol. 159, 2006, pp. 1–11.
108. Thompson D., *Railway noise and vibration: mechanisms, modelling and means of control*, Elsevier 2009.
109. Trollé A., Marquis-Favre C., Parizet E., *Perception and Annoyance Due to Vibrations in Dwellings Generated from Ground Transportation: A Review*. Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control, Vol. 34, 2015, pp. 413–457.
110. Turunen-Rise I.H., Brekke A., Hårvik L., Madshus C., Klæboe R., *Vibration in dwellings from road and rail traffic – Part I: a new Norwegian measurement standard*

- and classification system*, Applied Acoustics, Vol. 64, Issue 1, 2003, pp. 71–87.
111. Waddington D.C., Woodcock J., Peris E., *Human response to vibration in residential environments*, The Journal of the Acoustical Society of America 135, 182, 2014.
 112. Wikstrog B.O., Kjellberg A., Dallner M., *Whole-body vibration: a comparison of dilerent methods for the evaluation*, International Journal of Industrial Ergonomics, Vol. 7, 1991, pp. 41–52.
 113. Willford M., Field C., Young P., *Improved Methodologies for the Prediction of Footfall-Induced Vibration*, Architectural Engineering Conference (AEI) 2006.
 114. Wiss J.F., Parmelee R.A. *Human perception of transient vibrations*, Journal of the Structural Division, Vol. 4, 1974, pp. 773–787.
 115. Woodcock J., Peris E., Condie J., Sica G., Koziel K., Evans T., Moorhouse A., Steele A., Waddington D., *Human Response to Vibration in Residential Environments* (NANR209), Technical Report 6: Determination of exposure-response relationships, Defra, London 2011.
 116. Woodcock J., Moorhouse A.T., Waddington D.C., *A Multidimensional Evaluation of the Perception and Annoyance Caused by Railway Induced Groundborne Vibration*, Acta Acustica united with Acustica, Vol. 100, No. 4, July/August 2014, pp. 614–627(14).

117. Wu J.C., Cheng C.M., Chen J.T., *Tentative results on wind-induced comfort threshold based on a newly constructed motion simulator*, [in:] Proceedings of Fourth International Conference on Advances in Wind and Structures, Jeju, Korea, 28–30 May 2008.
118. Xu L., *Floor vibration in cold-formed steel buildings*, Recent Trends in Cold-Formed Steel Construction, 2016, pp. 183–201.
119. Zapfe J.A., Saurenman H., Fidell, S., *Ground-Borne Noise and Vibration in Buildings Caused by Rail Transit*, Transit Cooperative Research Program (TCRP) Web-Only Document 48, 2009.
120. <http://mlbe.pk.edu.pl>

STRESZCZENIE

Wpływ drgań transportowych na ludzi przebywających w budynkach w aspekcie wybranych kryteriów ewaluacyjnych

W pracy przeanalizowano wybrane aspekty wpływu drgań na ludzi przebywających w budynkach poddanych wymuszeniu pochodzącemu od środków transportu miejskiego. Przedstawiono i opisano najbardziej rozpowszechnione metody ewaluacji wpływu drgań na ludzi odbierających je w sposób bierny. Omówiono metodykę pomiarowo-interpretacyjną stosowaną w pomiarach wpływu drgań na ludzi przebywających w budynkach. Pokazano także obecny stan wiedzy z zakresu tematu wraz z rysem historycznym.

Przeanalizowane zostały cztery główne aspekty wpływu drgań na ludzi w budynkach. Pierwszym analizowanym zagadnieniem był wpływ rodzaju źródła drgań transportowych. Z analizy wynika, że wymuszenia spowodowane przejazdem lekkich pojazdów kołowych mają mniejszy wpływ na odbiór drgań przez ludzi niż drgania wywołane przejazdem ciężkich

pojazdów szynowych. Następnymi zagadnieniami rozważanymi w pracy były: wpływ czasu trwania drgań oraz wpływ wartości współczynnika szczytu. Dzięki analizie tych zagadnień wyznaczono relację pomiędzy wskaźnikiem wpływu odczuwalności drgań przez ludzi (*WODL*) a wartością dawki wibracji (*VDV*). Ostatnim aspektem wpływu drań na ludzi przebywających w budynkach, który rozważano w pracy, był wpływ lokalizacji punktu pomiarowego na wynik oceny. W wyniku badania tego zagadnienia zaproponowano strefę, w której możliwa jest ocena wpływu drgań na ludzi przy zastosowaniu metody *RMS* bez znaczącej zmiany na jej wynik.

Zagadnieniem nowatorskim było ustalenie zależności pomiędzy wskaźnikiem *WODL* a wartością *VDV* dla pojedynczych zdarzeń.

Bardzo ważnym i praktycznym wynikiem pracy jest ustalenie strefy możliwej lokalizacji czujnika pomiarowego służącego do oceny wpływu drgań na ludzi w budynkach.

Zaproponowano również kierunki dalszych prac.

ABSTRACT

Influence of transport vibrations on humans in buildings in the aspect of selected evaluation criteria

The work presents selected aspects of the influence of urban transport vibrations on humans in buildings. The most common methods of evaluation of the influence of vibrations on people receiving them passively are presented and described. The measurement and interpretation methodology used in evaluation methods of the influence of vibrations on people in buildings was discussed. The current state of knowledge in the subject was also shown along with the historical feature.

Four main aspects of the influence of vibrations on people in buildings were analysed. The first analyzed Issue was the influence of the type of source of transport vibrations on the results. The analysis shows that the excitation caused by the passage of light wheeled vehicles have a smaller impact on the perception of human vibrations than the vibrations caused by the passage of heavy rail vehicles. The next Issues considered in the work were: the influence of vibration duration and

the impact of the crest factor value. Thanks to the analysis of these Issues, the relation between the human perception vibration ratio (*HPVR*) and the vibration dose value (*VDV*) was determined. The last aspect of the influence of vibrations on people in buildings, which was considered in the work, is the influence of localization of measurement point. A zone in which it is possible to assess the influence of vibrations on people using the *RMS* method without affecting its result was proposed.

An innovative Issue, not occurring in the literature in the realized scope, was to determine the relationship between the *HPVR* and the *VDV* for individual dynamical events.

A very important and practical result of the work was to determine the zone of the possible location of the measurement sensor used for evaluation of the influence of vibrations on people in buildings.

Directions for further research were also proposed.

ZUSAMMENFASSUNG

Der Einfluss der Transportschwingungen auf die Menschen, die in den Gebäuden sein, im Aspekt gewählter Auswertungskriterien

In der Arbeit wurden gewählte Aspekte des Einflusses der Schwellungen auf die Menschen analysiert, die in den Gebäuden sein, die dem Erzwingen unterliegen, das aus den Mitteln des Stadttransports stammt. Am meisten verbreitete Methoden der Auswertung des Einflusses der Schwingungen auf die Menschen, die sie auf passive Weise empfangen, wurden dargestellt und beschrieben. Die Messinterpretationsmethodik, die bei den Messungen der Schwellungen auf die Menschen angewandt wird, die in den Gebäuden sein, wurde besprochen. Auch wurde aktueller Stand des Wissens aus dem Feld des Themas zusammen mit historischem Umriss gezeigt.

Vier Hauptaspekte des Einflusses der Schwellungen auf die Menschen in den Gebäuden wurden analysiert. Erste analysierte Frage war der Einfluss der Art der Quelle der Transportschwellungen auf das Ergebnis der Bewertung des

Einflusses der Schwellungen auf die Menschen. Aus der Analyse resultiert es, dass die Erzwungen, die durch die Fahrt leichter Straßenfahrzeuge verursacht werden, kleineren Einfluss auf den Empfang der Schwellungen durch die Menschen als die Schwellungen haben, die durch die Fahrt schwerer Schienenfahrzeuge hervorgerufen werden. Nächste Fragen, die in der Arbeit erwägt wurden, waren: der Einfluss der Dauer der Schwellungen, die Werte des Koeffizienten der Spitze auf das Ergebnis der Auswertung des Einflusses der Schwellungen auf die Menschen in den Gebäuden. Dank der Analyse dieser Fragen wurde die Beziehung zwischen dem Richtwert der Bemerkbarkeit der Schwellungen durch die Menschen (*WODL*) und dem Wert der Dose der Vibrationen (*VDV*) bestimmt. Letzter Aspekt des Einflusses der Schwellungen auf die Menschen, die in den Gebäuden sein, der in der Arbeit erwägt wurde, ist der Einfluss des Standorts des Messpunktes, der zum Empfang der Schwellungen durch die Menschen, auf das Ergebnis der Bewertung. Infolge der Forschung dieser Frage wurde die Zone vorgeschlagen, in der die Bewertung des Einflusses der Schwellungen auf die Menschen bei der Anwendung der Methode *RMS* ohne den Einfluss auf ihr Ergebnis möglich ist.

Innovative Frage, die in der Literatur in durchgeführtem Bereich nicht auftritt, war die Festlegung der Beziehung zwischen dem Richtwert *WODL* und dem Wert *VDV* für einzelne Ereignisse.

Sehr wichtiges und praktisches Ergebnis der Arbeit ist die Festlegung der Zone des möglichen Standorts des Messensors, der zur Bewertung des Einflusses der Schwellungen auf die Menschen in den Gebäuden dient.

Die Richtungen weiterer Arbeiten wurden auch vorgeschlagen.

