

Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki  
Wydział Inżynierii Lądowej  
Instytut Mechaniki Budowli  
Katedra Statyki i Dynamiki Budowli



mgr inż. Krzysztof Nering

Streszczenie rozprawy doktorskiej pod tytułem:

***Analiza wpływu drgań i hałasu na mieszkańców  
w budynkach***

Promotor:

prof. dr hab. inż. Krzysztof Stypuła

Promotor pomocniczy:

dr hab. inż. Alicja Kowalska-Koczvara, prof. PK

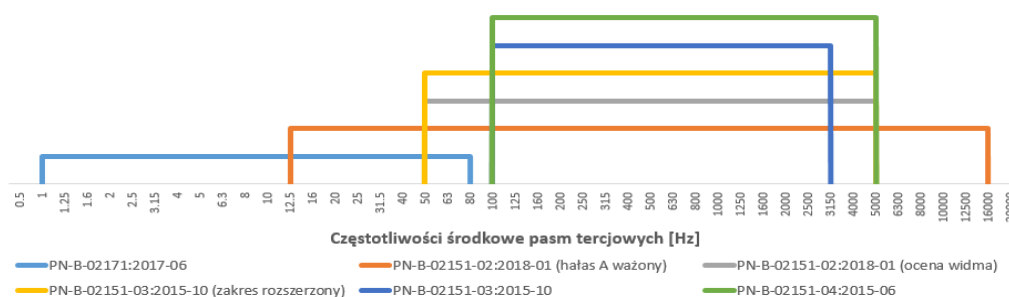
KRAKÓW, 2020r.

## 1. Wstęp

### 1.1. Geneza tematu

Wibracje i hałas to czynniki, które mają istotny wpływ na odczucie komfortu podczas przebywania ludzi w budynkach. Obecnie w warunkach technicznych jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie [1], powołane normy [2-5] określają dopuszczalne wartości wielkości wibroakustycznych. Fakt ten oznacza, że te normy muszą być stosowane. Wymagania stawiane przez te normy określa się jako warunki zapewnienia komfortu w pomieszczeniach przeznaczonych na stały pobyt ludzi.

Z podanego zakresu oceny komfortu wibroakustycznego w wielu normach, który został pokazany na Rys. 1.1 i górnej granicy analizowanych częstotliwości podawanej w literaturze [6-8] można wywnioskować, że tylko norma [3] mogłaby służyć pośrednio do oceny hałasu niskoczęstotliwościowego pochodzącego od ruchu pojazdów. Należy też pamiętać, że norma [2] mówi tylko o drganiach mechanicznych i bez odpowiedniego zaplecza matematycznego w postaci modelu lub uproszczonych formuł nie jest możliwe dopasowanie kryteriów tej normy do kryterium dopuszczalnego hałasu.



Rys. 1.1. Obowiązujące w polskim prawie [1] normy odnoszące się do klimatu wibroakustycznego pomieszczenia. Normy wskazane na wykresie [2-5]

### 1.2. Teza naukowa

Bazując na rozpoznaniu obecnego stanu wiedzy w zakresie opisanym w temacie niniejszej rozprawy stawia się następujące tezy naukowe:

- Można określić poziom drgań przegród budowlanych, przy którym rozpoczyna się emisja hałasu o danym stopniu uciążliwości.
- Kryteria komfortu wibroakustycznego powinny być analizowane na poziomie oddziaływania drgań jak i również na poziomie ekspozycji na hałas.

### 1.3. Cel i zakres pracy

Celem pracy jest przeanalizowanie istniejących metod pozwalających na prognozowanie poziomu hałasu towarzyszącego drganiom i ich wpływu na komfort osób przebywających w pomieszczeniach oraz zaproponowanie kompleksowego sposobu oceny klimatu wibroakustycznego. Drugim celem jest wykazanie, że przeprowadzając analizy dynamiczne na potrzeby spełnienia wymagań np. [2], można do pewnego stopnia przewidywać poziom hałasu niskoczęstotliwościowego np. od ruchu pojazdów oraz innych źródeł niskoczęstotliwościowych. W wyniku realizacji celów możliwe było zaproponowanie kryteriów wibroakustycznych do oceny komfortu ludzi przebywających w budynkach. Przedstawione badania dotyczą pomiarów in-situ wybranych obiektów.

Zakres pracy obejmuje:

- analizę obecnego stanu wiedzy, który porusza problematykę sprzężenia mechanoakustycznego pod kątem pomiarów i modeli obliczeniowych,
- opracowanie metodyki pomiarowo-interpretacyjnej oddziaływań wibroakustycznych,
- wykonanie pomiarów poligonowych widma drgań i ich przyspieszeń, wartości szczytowych oraz poziomu hałasu towarzyszącemu tym drganiom w celu dokonania kalibracji wzorcowego modelu obliczeniowego,
- przeprowadzenie pomiarów poziomu hałasu i drgań na wybranych obiektach, a następnie określenie możliwości zaistnienia empirycznej zależności pomiędzy zmierzonymi wartościami.

Na podstawie badań własnych (pomiarów i obliczenia) oraz analizy dostępnych wyników badań innych autorów sformułowano wnioski, uzasadniające postawione na wstępie tezy (por. p. 1.3). Na zakończenie wskazano kierunki dalszych badań, które mogłyby wzbogacić wiedzę w zakresie rozważanej tematyki.

## **2. Stan wiedzy**

### **2.1. Postrzeganie bodźców symultanicznych**

Niewątpliwie ocena wpływu drgań na ludzi w budynkach jak i ich ekspozycja na hałas są rozbudowane i są dobrze umocowane w normach opartych na badaniach. Normatywy nie są jednak tak hojne w przypadku postrzegania jednocześnie dwóch bodźców jakimi są hałas i drgania.

Problematykę komfortu wibroakustycznego można odnaleźć w pracach naukowych już w latach 70. XX wieku. Praca [9] stanowi poruszenie zagadnienie subiektywnego postrzegania równoważności hałasu i drgań.

Podsumowanie prac nad równoważnością hałasu i drgań miało miejsce na początku lat 90. XX wieku, gdzie w pracy [10] zestawiono dotychczasowe badania [9, 11-14] związane z problematyką równoważności bodźca oraz dominującej uciążliwości hałasu lub drgań.

W roku 2005 problem jednoczesności występowania hałasu i drgań poruszony został w normie ISO [15], która traktuje o hałasie generowanym przez drgania i o samych drganiach pochodzących od przejazdu pojazdu szynowego. Norma jednak nie posiada jasnego kryterium do oceny ogólnej uciążliwości bodźców symultanicznych. Posiada jednak wytyczne dotyczące diagnostyki stanu istniejącego torów. Ocena wpływu drgań na ludzi realizowana jest przez normę ISO [16], natomiast ocena hałasu jest zalecana przez adekwatne do zjawiska normy krajowe (jeśli istnieją). Norma [15] nie podaje wytycznych ani kryteriów do oceny jednoczesności występowania bodźców związanych z drganiami i hałasem. Przykładem normy krajowej służącej do oceny hałasu w pomieszczeniu pochodzącego od pojazdów czynowych jest norma norweska [17] z 2012 roku. Wciąż jednak norma nie traktuje o jednoczesnym występowaniu dwóch bodźców - drgań i hałasu.

### **2.2. Sposoby powiązania drgań i hałasu, modele fizyczne, matematyczne, komputerowe, pomiary**

Sposoby powiązania poziomu hałasu z drganiami mechanicznymi oddziałującymi na człowieka przebywającego w budynku w sposób bierny można podzielić na dwa typy:

- przeliczanie wielkości opisujące drgania na poziom hałasu panujący w pomieszczeniu np. wykorzystując współczynnik promieniowania dźwięku lub wzory empiryczne,

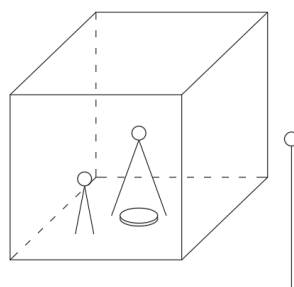
- modelowanie komputerowe z wykorzystaniem różnych metod np. metody elementów skończonych, metody elementów brzegowych.

Konsekwencją wyboru metody jest dokładność otrzymanych wyników z rzeczywistymi wartościami odwrotnie proporcjonalna do czasu niezbędnego do przeprowadzenia pełnych obliczeń. W niniejszym podrozdziale zostaną omówione metody obecne w literaturze naukowej.

### 3. Metodyka i program badań

#### 3.1. Metodyka pomiarowa i ogólny opis przeprowadzonych pomiarów

Na Rys. 3.1 przedstawiono schemat stanowiska pomiarowego in-situ do oceny komfortu wibroakustycznego. Prócz wcześniej wspomnianych aspektów związanych z oceną komfortu akustycznego i wibracyjnego należy wziąć pod uwagę różnicę poziomów hałasu pomiędzy badanym pomieszczeniem, a hałasem na zewnątrz budynku. Zdecydowano się na wykorzystanie wskaźników  $D_{tr,2m,nT,w}$  lub  $D_{rt,2m,nT,w}$  [18]. Niskie wartości wskaźników ( $\sim 30\text{dB}$ ) mogą wskazywać, że głównym źródłem hałasu w pomieszczeniu jest hałas przechodzący z powietrza zewnętrznego. Wysoka wartość ( $\sim 60\text{dB}$ ) pozwala wykluczyć ścieżkę powietrzną związaną z izolacyjnością akustyczną przegrody zewnętrznej. W ramach programu badań zdecydowano się na pomiar hałasu poprzez pomiar ciśnienia akustycznego oraz drgań poprzez przyspieszenia drgań. Do parametrów oceny komfortu przyjęto dawkę wibracji  $VDV$  oraz ekspozycyjny poziom dźwięku  $A_{SEL}$ . Jako kryterium oceny komfortu wibroakustycznego określono odpowiednie wartości całkowitego poziomu uciążliwości  $\psi_{tot}$ .



Rys. 3.1 Schemat umiejscowienia mikrofonu oraz akcelerometru w celu oceny klimatu wibroakustycznego pomieszczenia

#### 3.2. Metodyka opracowania modelu obliczeniowego

Ze względu na złożoność problematyki interakcji materiał sztywny – powietrze modelowanie hałasu pochodzącego drgań mechanicznych przegród ograniczających pomieszczenie zdecydowano się podzielić na dwa sposoby modelowania: uproszczony i dokładny.

Modele uproszczone zaproponowano na podstawie pracy Kurweila [19] oraz prac innych autorów [20, 21]. Model polega na obliczaniu mocy akustycznej drgających przegród pomieszczenia na podstawie drgań. W przypadku metody z wykorzystaniem wzoru Kurweila poziom hałasu w pomieszczeniu w poszczególnych pasmach częstotliwościowych jest oszacowywany na podstawie przyspieszeń drgań.

Model dokładny jest modelem, który w całości opiera się na modelowaniu przy użyciu elementów skończonych. Metoda modelowania wzorowana jest na modelach w publikacjach [22, 23].

### 3.3. Metodyka oceny komfortu wibroakustycznego

W ramach pracy wprowadzono metodykę opartą o literaturę i normy przedstawione w rozdziale 2. niniejszej pracy. Drgania mechaniczne są ewaluowane za pomocą metody VDV [2, 24] przy użyciu odpowiednich krzywych ważenia  $W_d$  (kier. Z) i  $W_b$  (kier. X i Y). Hałas ocenia się za pomocą poziomu ekspozycyjnego dźwięku *SEL*, przy pomocy ważenia częstotliwościowego krzywą A. Całkowity efekt od sumarycznego działania bodźca opracowano na podstawie [10].

Poziom uciążliwości wykorzystany do oceny wyników pomiaru hałasu i drgań został opracowany na podstawie [10] i przedstawiony za pomocą wzoru (3.1) z wykorzystaniem sumowania logarytmicznego poziomów uciążliwości od poszczególnych bodźców określonych wzorami (3.2) i (3.3.).

$$\psi_{tot} = 10 \log_{10} \left( 10^{0,1\psi_n} + 10^{0,1\psi_v} \right) \quad (3.1)$$

$$\psi_n = 10 \log_{10} \left( 10^{0,036SEL-0,512} \right) \quad (3.2)$$

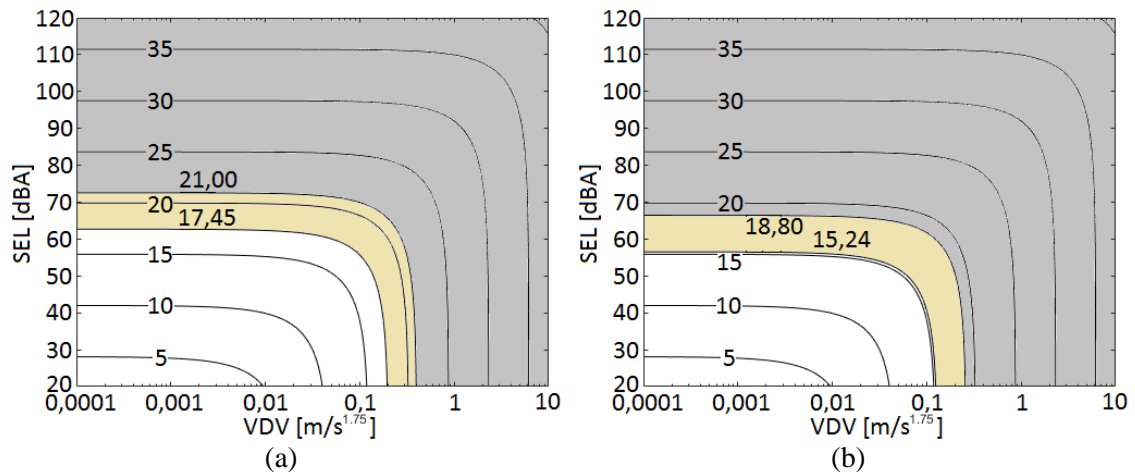
$$\psi_v = 10 \log_{10} \left( 10^{1,18 \log_{10}(VDV)+2,57} \right) \quad (3.3)$$

Bazując na wymaganiach określonych w normie polskiej [2] można określić wartości progowe poziomu uciążliwości, wykorzystując drgania jako warunek brzegowy dla poszczególnych wartości. Wartości progowe całkowitego poziomu uciążliwości wraz z proponowanymi klasami wibroakustycznymi przedstawiono w Tab. 3.1.

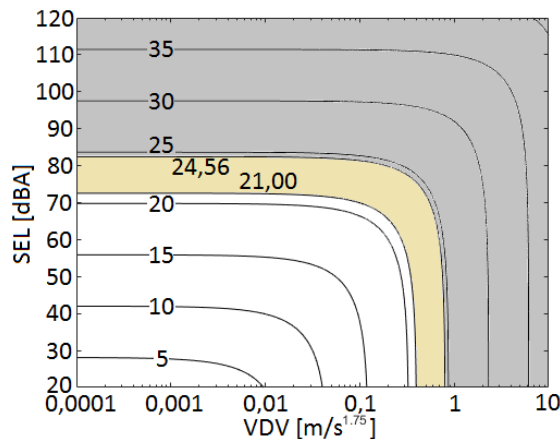
Tab. 3.1 Proponowane klasy komfortu wibroakustycznego ocenianego na podstawie wartości całkowitego poziomu uciążliwości.

Miejsce odbioru drgań i hałasu	Pora dnia	Całkowity poziom uciążliwości		
		Niskie prawdopodobieństwo wystąpienia skarg użytkowników	Możliwe wystąpienie skarg użytkowników	Użytkownicy ekspozowani na niebezpieczną dla zdrowia dawkę bodźca
		KLASA A	KLASA B	KLASA Z
		[-]	[-]	[-]
Sale lekcyjne	Dzień i noc	$\leq 21,00$	$\leq 24,56$	$> 24,56$
Mieszkania	Dzień	$\leq 17,45$	$\leq 21,00$	$> 21,00$
	Noc	$\leq 15,24$	$\leq 18,80$	$> 18,80$

Na Rys. 3.2 oraz Rys. 3.3 przedstawiono graficzną interpretację poziomu uciążliwości wraz z naniesionymi wartościami dla poszczególnych klas i funkcji pomieszczeń.



Rys. 3.2 Wartość całkowitego poziomu uciążliwości (izolinie) w zależności od dawki wibracji VDV i ekspozycyjnego poziomu dźwięku SEL wraz z naniesionymi obszarami klas wibroakustycznych dla pomieszczeń mieszkalnych w porzei dziennej (a) i porzei nocnej (b)



Rys. 3.3 Wartość całkowitego poziomu uciążliwości (izolinie) w zależności od dawki wibracji VDV i ekspozycyjnego poziomu dźwięku SEL wraz z naniesionymi obszarami klas wibroakustycznych dla sali lekcyjnych w porzei dziennej i nocnej

### 3.4. Przyjęty program badań

Celem przeprowadzonych badań jest określenie poziomu komfortu wibroakustycznego w pomieszczeniu oraz próba powiązania wielkości opisujących drgania oraz hałas oddziałujących na człowieka. W związku z tym zdecydowano się na następujący program badań:

- oszacowanie wpływu ustawienia membrany mikrofonu względem powierzchni podłogi.
- określenie wpływu mod pomieszczenia na poziom hałasu w pomieszczeniu.
- określenie korelacji pomiędzy wielkościami opisującymi drgania i hałas.
- opisanie sposobu oceny komfortu wibroakustycznego wraz z zaproponowaniem kryterium.

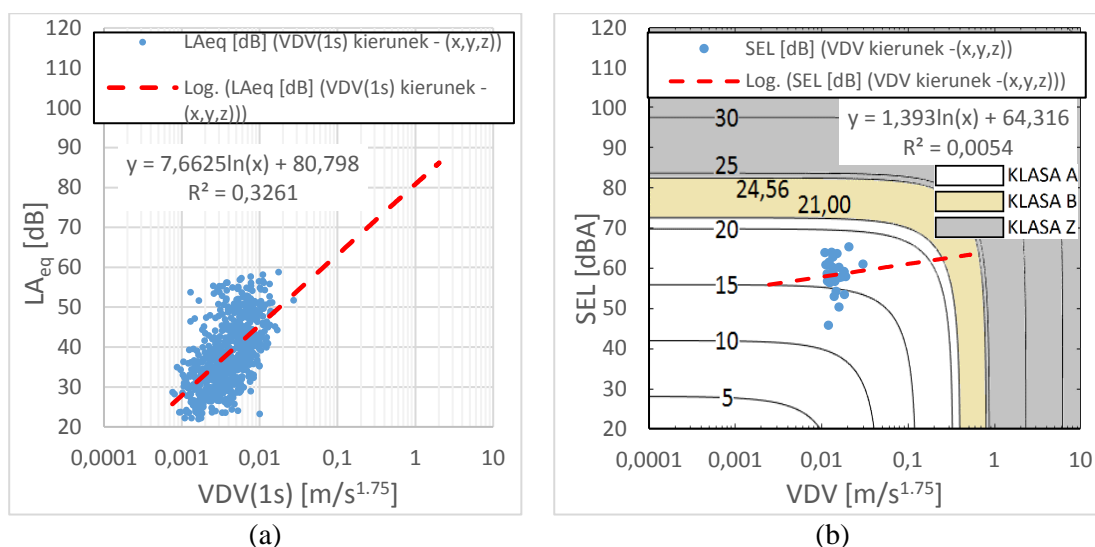
W ramach programu badań zdecydowano się na pomiar hałasu poprzez pomiar ciśnienia akustycznego oraz drgań poprzez przyspieszenia drgań. Do parametrów oceny komfortu przyjęto dawkę wibracji VDV oraz ekspozycyjny poziom dźwięku A SEL. Jako kryterium oceny komfortu wibroakustycznego określono odpowiednie wartości całkowitego poziomu uciążliwości  $\psi_{tot}$ .

## 4. Opis i wyniki przeprowadzonych pomiarów

### 4.1. Etap 1. badań. Badania in-situ w wybranych pomieszczeniach od wymuszeń transportowych.

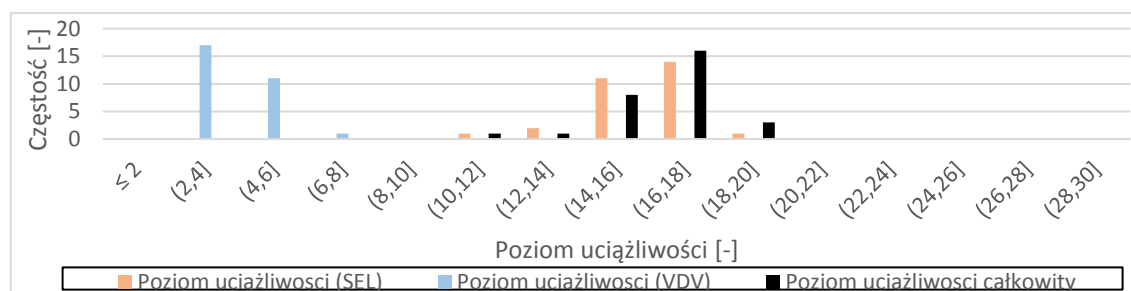
Analizy zależności poziomu ekspozycyjnego dźwięku (SEL) od dawki wibracji (VDV) zostały przeprowadzone ze względu na fakt, że drgający strop w pomieszczeniu jest przyczyną odbioru drgań w sposób bierny oraz jednocześnie, wraz z innymi przegrodami pomieszczenia, jest źródłem hałasu niskoczęstotliwościowego. Istnieje zatem przesłanka, że pewne wielkości dynamiczne i akustyczne mogą być skorelowane.

W ramach pierwszych pomiarów zmierzono hałas i drgania od przejazdu tramwaju. Zarejestrowano 29 zdarzeń. Pomieszczenie znajdowało się od strony torowiska tramwajowego. Na Rys. 4.1 przedstawiono wyniki pomiaru zdarzenia z krokiem jednosekundowym i całkowite wartości dla poszczególnych zdarzeń. Nie zaobserwowano istotnej korelacji w obu przypadkach.



Rys. 4.1 Poziom dźwięku A-ważony  $L_{Aeq}$  w zależności od odpowiadającej jednosekundowej dawki wibracji  $VDV_{1s}$  od zdarzenia (a). Poziom ekspozycyjny dźwięku A-ważony SEL w zależności od dawki wibracji VDV zdarzenia wraz z naniesionymi kolorem czarnym izoliniami poziomu uciążliwości i klasami wibroakustycznymi (b). Zdarzeniem jest przejazd tramwaju. Pomiar uśredniony ze wszystkich kierunków. Wartość wskaźnika izolacyjności akustycznej zewnętrznej od zdarzeń  $D_{tr,2m,nT,w}$  wynosi 26dB

Na Rys. 4.2 przedstawiono na histogramie zestawienie poziomów uciążliwości dla poszczególnych przejazdów tramwajów. W obserwowanej sytuacji pomiarowej można wywnioskować, że to hałas jest znacząco dominującym bodźcem i analiza łącznie z drganiami nie zmienia końcowego rezultatu poziomu uciążliwości.

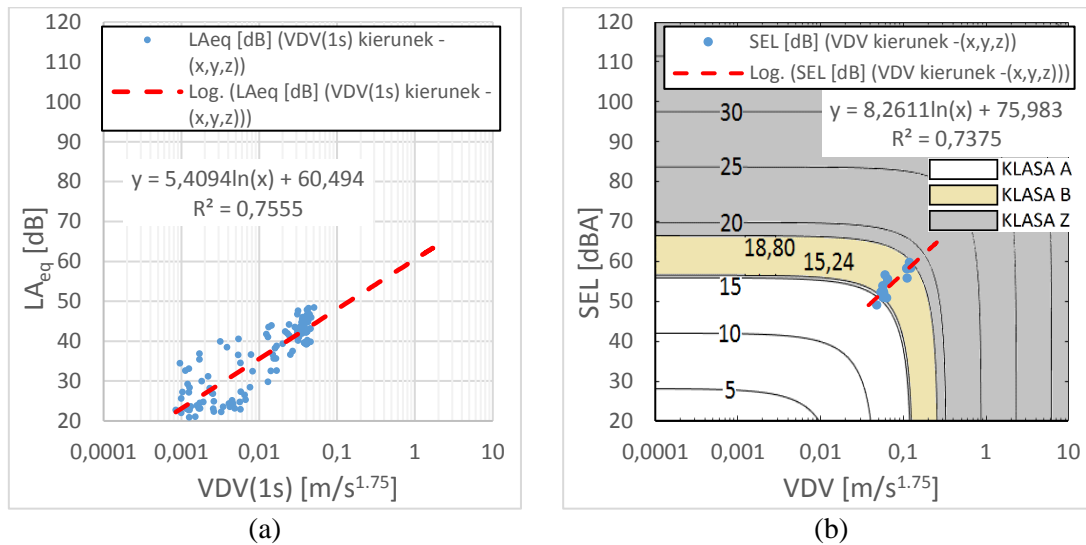


Rys. 4.2 Histogram poziomów uciążliwości od poszczególnych bodźców i całkowity poziom uciążliwości dla przejazdów tramwaju

Poziom uciążliwości dla badanego pomieszczenia, jakim jest pomieszczenie mieszkalne mieści się w zakresie 10-20. Wymaganiem dla klasy szkolnej jest poziom uciążliwości równy 21 niezależnie od pory, przy zachowaniu niskiego prawdopodobieństwa wystąpienia skarg użytkowników. Poszczególne bodźce nie przekraczają dopuszczalnych wartości.

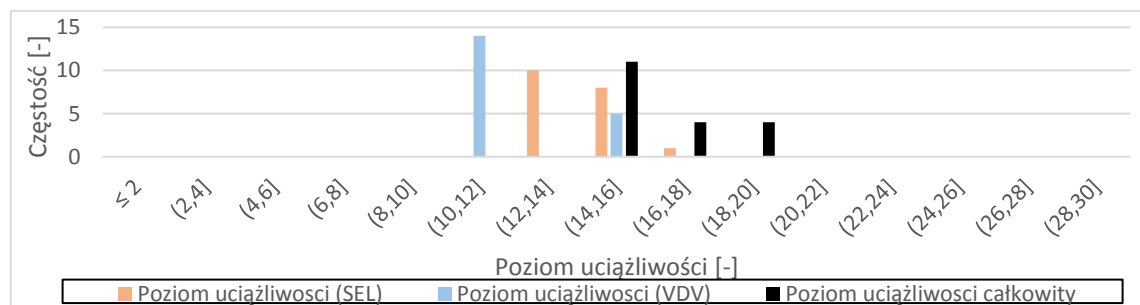
W ramach drugich pomiarów rejestrowano drgania i towarzyszący hałas od przejazdów pociągów. Pomieszczenie nie przylegało do ściany zewnętrznej od strony torów. Na Rys. 4.3 zaprezentowano wyniki w analogiczny sposób jak w pierwszym pomiarze – uwzględniono 19

zdarzeń z wartościami całkowitymi dla zdarzeń i z krokiem jednosekundowym. Zaobserwowano istotną korelację.



Rys. 4.3 Poziom dźwięku A-ważony  $L_{Aeq}$  w zależności od odpowiadającej jednosekundowej dawki vibracji  $VDV_{1s}$  od zdarzenia (a). Poziom ekspozycyjny dźwięku A-ważony  $SEL$  w zależności od dawki vibracji  $VDV$  zdarzenia wraz z naniesionymi kolorem czarnym izoliniami poziomu uciążliwości z klasami wibroakustycznymi dla pory nocnej (b). Zdarzeniem jest przejazd pociągu. Pomiar uśredniony ze wszystkich kierunków. Wartość wskaźnika izolacyjności akustycznej zewnętrznej od zdarzeń  $D_{Tr,2m,nT,w}$  wynosi 58dB

Na Rys. 4.4 zaprezentowano na histogramie zestawienie poziomów uciążliwości dla poszczególnych przejazdów pociągów. W sytuacji pomiarowej można wywnioskować, że to hałas jest w niewielkim stopniu bodźcem dominującym. To przekłada się na fakt, że zsumowania oddziaływania drgań i vibracji istotnie zwiększa otrzymany poziom uciążliwości.

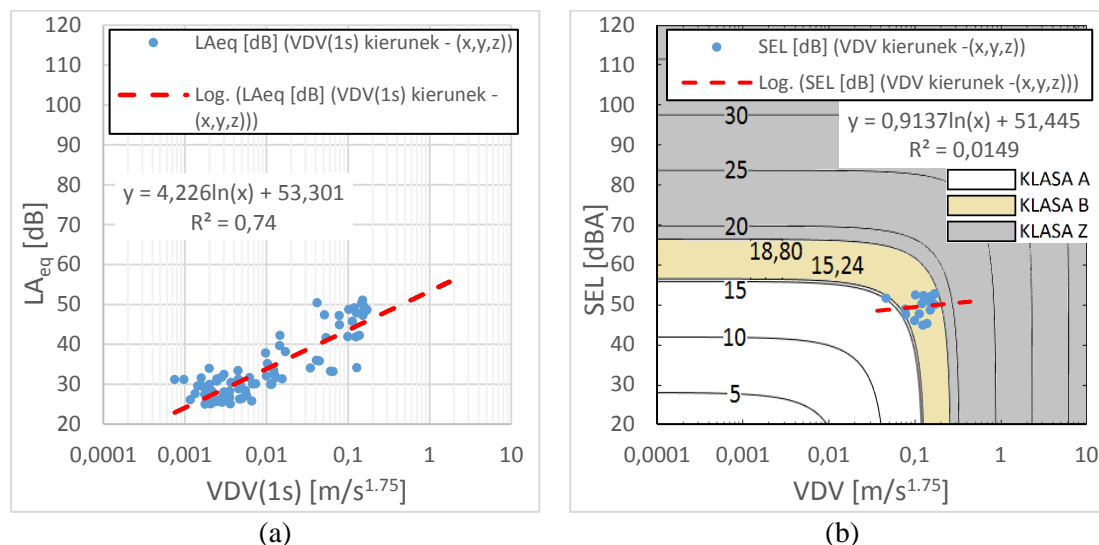


Rys. 4.4 Histogram poziomów uciążliwości od poszczególnych bodźców i całkowity poziom uciążliwości dla przejazdów pociągów

Poziom uciążliwości dla badanego pomieszczenia, jakim jest pomieszczenie mieszkalne mieści się w zakresie 14-20. Wymaganiem dla pomieszczenia mieszkalnego jest poziom uciążliwości równy 17,45 w porze dziennej i 15,24 w porze nocnej, przy zachowaniu niskiego prawdopodobieństwa wystąpienia skarg użytkowników (klasa A). Poszczególne bodźce nie przekraczają dopuszczalnych w porze dziennej, przekraczają jednak w porze nocnej dla klasy A. Dodanie dwóch rejestrowanych bodźców w znaczącym stopniu zwiększa takowe przekroczenia.

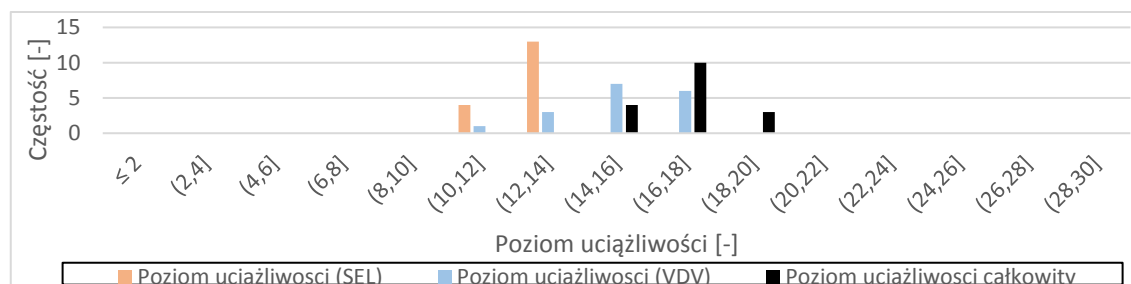
W ramach trzech pomiarów rejestrowano drgania i hałas od uderzenia lemiem koparki. Pomieszczenie nie przylegało do ściany zewnętrznej od wymuszenia dynamicznego. Na Rys. 4.5 przedstawiono wyniki w analogiczny sposób jak przy poprzednich pomiarach – uwzględniono 16 zdarzeń z wartościami całkowitymi dla zdarzeń i z krokiem jednosekundowym. Zaobserwowano istotną korelację tylko dla zdarzeń rejestrowanych z krokiem jednosekundowym. Nie zaobserwowano korelacji w przypadku zestawienia całkowitych wartości dla zdarzeń.





Rys. 4.5 Poziom dźwięku A-ważony  $LA_{eq}$  w zależności od odpowiadającej jednosekundowej dawki vibracji  $VDV_{1s}$  od zdarzenia (a). Poziom ekspozycyjny dźwięku A-ważony SEL w zależności od dawki vibracji  $VDV$  zdarzenia wraz z naniesionymi kolorem czarnym izoliniami poziomu uciążliwości z klasami wibroakustycznymi dla pory nocnej (b). Zdarzeniem jest uderzenia lemieszem w drogę gruntową. Pomiar uśredniony ze wszystkich kierunków. Wartość wskaźnika izolacyjności akustycznej zewnętrznej od zdarzeń  $D_{Ir,2m,nT,w}$  wynosi 49dB

Na Rys. 4.6 na histogramie zestawiono poziomy uciążliwości dla poszczególnych uderzeń lemieszem koparki. Z przedstawionych wyników można wywnioskować, że to vibracje są do pewnego stopnia bodźcem dominującym. Towarzyszący hałas ma jednak istotny wpływ na całkowity poziom uciążliwości.



Rys. 4.6 Histogram poziomów uciążliwości od poszczególnych bodźców i całkowity poziom uciążliwości dla uderzeń lemieszem koparki

Poziom uciążliwości dla badanego pomieszczenia, jakim jest pomieszczenie mieszkalne mieści się w zakresie 14-20. Wymaganiem dla pomieszczenia mieszkalnego jest poziom uciążliwości równy 17,45 w porze dziennej i 15,24 w porze nocnej, przy zachowaniu niskiego prawdopodobieństwa wystąpienia skarg użytkowników. Daje to wniosek, że zarejestrowane zdarzenia mogą przekraczać wartości postulowane w pracy dla klasy A, a co za tym idzie możliwe jest wystąpienie skarg użytkowników. Co więcej, wiele zdarzeń przekracza wartości progowe komfortu wibracyjnego. Pomimo niskiego poziomu uciążliwości hałasu, dodanie go do oceny zwiększa liczbę zdarzeń przekraczających dopuszczalny poziom komfortu dla klasy A.

W ramach podsumowania etapu pierwszego pomiarów na potrzeby niniejszej pracy w Tab. 4.1 i Tab. 4.2 przedstawiono ocenę i liczbę zdarzeń mieszczących się w wymaganiach dla klasy A i B w zależności od pory doby. W ramach oceny na potrzeby klasy A (por. Tab. 4.1) widać, że liczba zdarzeń spełniających wymagania klasy A w kontekście całkowitego poziomu uciążliwości  $\psi_{tot}$  jest zawsze niższa od liczby zdarzeń spełniających wymagania tej klasy w kontekście poziomów uciążliwości od poszczególnych bodźców  $\psi_v$  (drgań) i  $\psi_n$  (hałas). W przypadku oceny dla klasy B (por. Tab. 4.2) powyższe stwierdzenia nie są jawnie widoczne ze względu na

znacznie bardziej liberalne kryteria. W przypadku klasy B wszystkie zdarzenia zarejestrowane w trakcie pomiarów mieszczą się w wymaganiach dla tej klasy.

Tab. 4.1 Ocena badanych obiektów w odniesieniu do klasy A komfortu wibroakustycznego

Lokalizacja (wymuszenie)	ZST2 Chorzów (tramwaj)			Zawiercie (pociąg)			Libertów (lemiesz)		
Badana wielkość	$\Psi_n$	$\Psi_v$	$\Psi_{tot}$	$\Psi_n$	$\Psi_v$	$\Psi_{tot}$	$\Psi_n$	$\Psi_v$	$\Psi_{tot}$
Liczba zdarzeń	29	29	29	19	19	19	17	17	17
Liczba zdarzeń spełniających wymagania w porze dziennej	29	29	29	19	19	14	17	17	9
Liczba zdarzeń spełniających wymagania w porze nocnej	29	29	29	14	19	1	17	9	1

Tab. 4.2 Ocena badanych obiektów w odniesieniu do klasy B komfortu wibroakustycznego

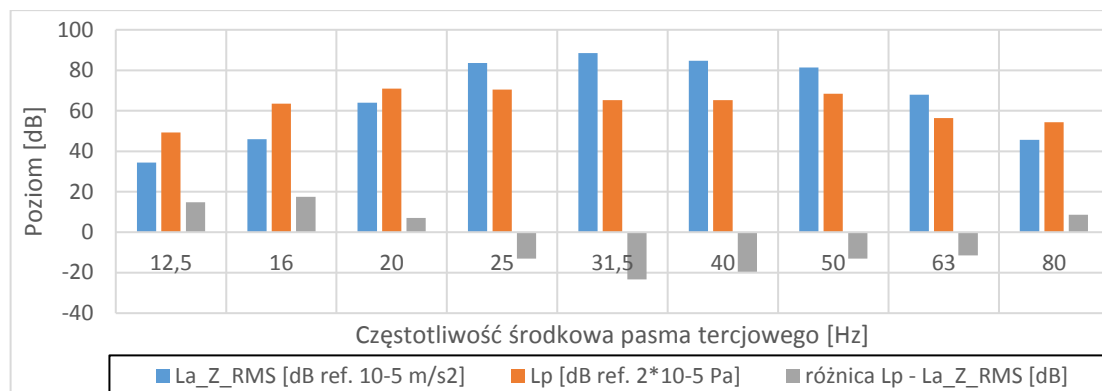
Lokalizacja (wymuszenie)	ZST2 Chorzów (tramwaj)			Zawiercie (pociąg)			Libertów (lemiesz)		
Badana wielkość	$\Psi_n$	$\Psi_v$	$\Psi_{tot}$	$\Psi_n$	$\Psi_v$	$\Psi_{tot}$	$\Psi_n$	$\Psi_v$	$\Psi_{tot}$
Liczba zdarzeń	29	29	29	19	19	19	17	17	17
Liczba zdarzeń spełniających wymagania w porze dziennej	29	29	29	19	19	19	17	17	17
Liczba zdarzeń spełniających wymagania w porze nocnej	29	29	29	19	19	19	17	17	17

Podsumowując można jednoznacznie stwierdzić, że przeprowadzone pomiary i ich analiza dowodzą tezie o konieczności analizy komfortu wibroakustycznego z uwzględnieniem wzajemnego wpływu bodźców drgań i hałasu na człowieka.

#### 4.2. Etap 2. badań. Pomiary z użyciem wzbudnika – sygnał sinusoidalny o zmiennej częstotliwości

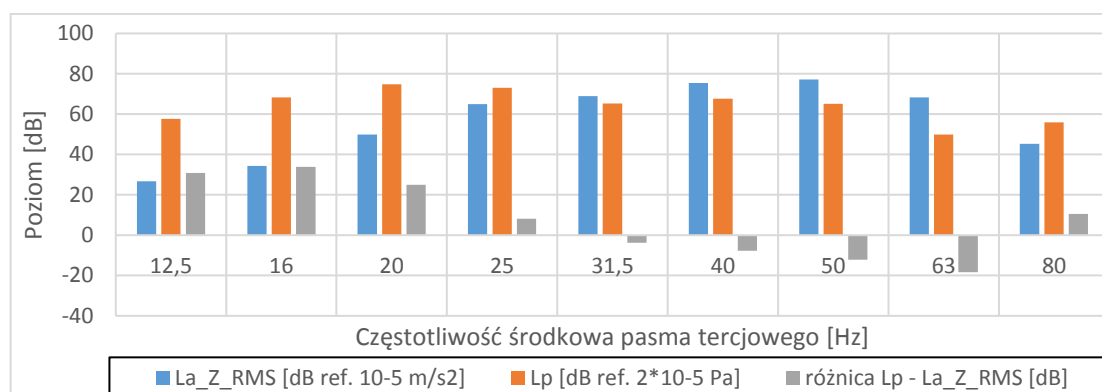
Badaniami w ramach etapu drugiego objęto 2 pomieszczenia. W jednym z pomieszczeń zamocowano wzbudnik, który generował siłę harmoniczną z zakresu 10-100Hz oraz w wybranych węższych zakresach w celu dokładniejszego zbadania pojawiających się częstotliwości rezonansowych konstrukcji w podanym wyżej zakresie. Pomiarami objęto strop bez warstw wykończeniowych oraz strop z podłogą posadowioną na kostkach maty wibroizolacyjnej. Etap drugi analizy w Libertowie różni się diametralnie od pozostałych analiz. W tym przypadku wymuszenie dynamiczne w postaci wzbudnika znajduje się w obrębie budynku. Wymuszenie ma przebieg sinusoidalny ze zmienną częstotliwością w sposób ciągły.

Na Rys. 4.7 przedstawiono poziom ciśnienia akustycznego  $L_p$  dla tercji z zakresu 12,5-80Hz oraz poziom wartości skutecznej przyspieszeń drgań nieważonych na kierunku Z  $L_{a,Z,RMS}$  wraz z różnicą arytmetyczną pomiędzy tymi poziomami. Na wykresach widać, że różnica pomiędzy tymi poziomami zależy od wartości poziomu drgań. W wyniku analizy otrzymano korelację potwierdzającą to stwierdzenie na poziomie  $R^2=0,71$ .



Rys. 4.7 Poziom wartości skutecznej przyspieszeń drgań  $L_{a,Z,RMS}$  oraz poziom ciśnienia akustycznego  $L_p$  w pasmach tercjowych 12,5-80Hz wraz z różnicą  $L_p - L_{a,Z}$  dla pomiaru w zakresie częstotliwości 10-100Hz. Pomiar bezpośrednio na stopnie na kierunku Z

Na Rys. 4.8 pokazano poziom ciśnienia akustycznego  $L_p$  dla tercji z zakresu 12,5-80Hz oraz poziom drgań nieważonych na kierunku Z  $L_{a,Z}$ . Przedstawiono również różnicę arytmetyczną pomiędzy tymi poziomami. Zdaje się potwierdzać fakt z pomiarów na samym stopnie, iż różnica pomiędzy tymi poziomami zależy od wartości poziomu drgań. W wyniku analizy otrzymano bardzo słabą korelację potwierdzającą to stwierdzenie na poziomie  $R^2=0,40$ .



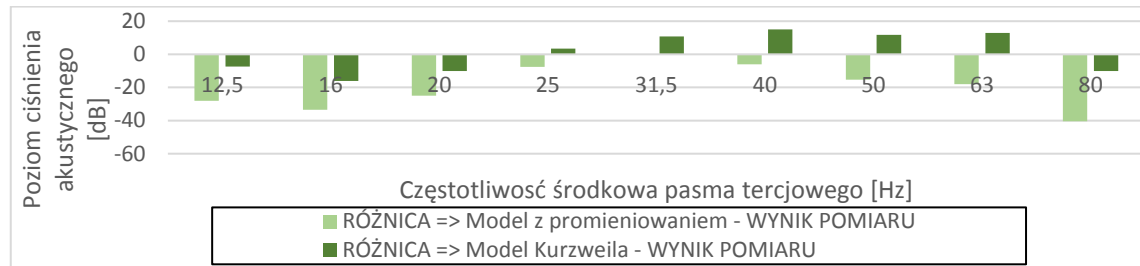
Rys. 4.8 Poziom wartości skutecznej przyspieszeń drgań  $L_{a,Z,RMS}$  oraz poziom ciśnienia akustycznego  $L_p$  w pasmach tercjowych 12,5-80Hz wraz z różnicą  $L_p - L_{a,Z}$  dla pomiaru w zakresie częstotliwości 10-100Hz. Pomiar na podłodze opartej na elastomerach na kierunku Z

## 5. Wyniki analizy modelu obliczeniowego

Celem wykonania modelu obliczeniowego przedstawionego w tej pracy jest sprawdzenie, czy na podstawie oceny wpływu drgań na ludzi [2] w niekorzystnych obliczeniowo warunkach tj. w pomieszczeniu, w którym przegrody je ograniczające mają wysoki stopień złożoności (np. ściany szkieletowe, słupowo-ryglowe, stropy oparte na belkach).

### 5.1. Modele uproszczone i ich weryfikacja

Pierwszym modelem jest model oparty na formule Kurzweila [19]. W tym bierze pod uwagę tylko i wyłącznie na przyspieszenia drgań (ich poziom) i częstotliwości (częstotliwości środkowe pasm oktaowych). Na potrzeby niniejszej pracy zdecydowano się wykorzystać wzór Kurzweila w pasmach tercjowych. Drugim modelem uproszczonym jest model z wykorzystaniem współczynnika promieniowania dźwięku [8]. Na Rys. 5.1 przedstawiono różnice pomiędzy wynikami otrzymanymi z modeli uproszczonych, a pomiarem poziomów ciśnienia akustycznego in-situ.



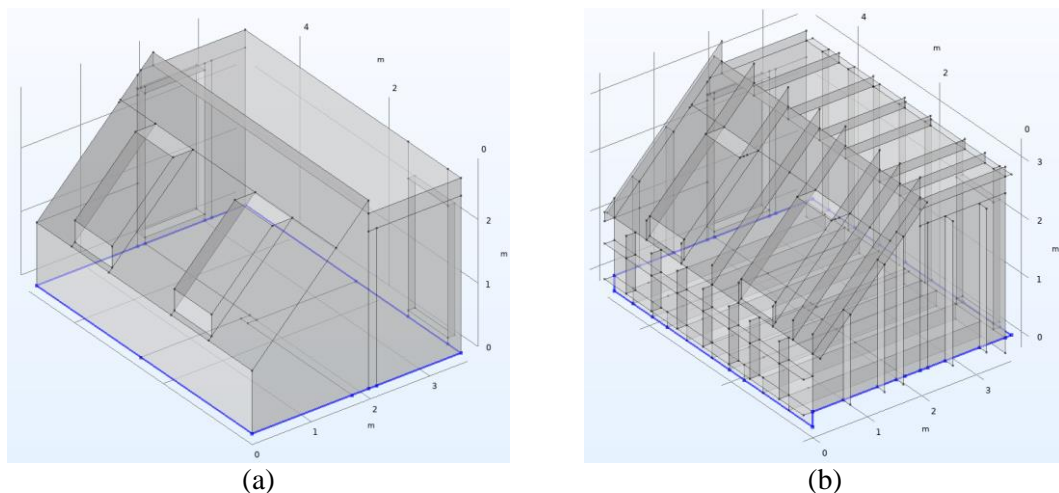
Rys. 5.1 Różnice pomiędzy wynikami modeli uproszczonych a pomiarami in-situ

Na podstawie wyników otrzymanych w wyniku obliczeń numerycznych i pomiarów in-situ można wyciągnąć następujące wnioski:

- model Kurzweila przy bardzo niskim nakładzie obliczeniowym daje zaskakująco dobre oszacowanie poziomu hałasu w pasmach tercjowych,
- model wykorzystujący współczynnik promieniowania dźwięku wraz z dokonanymi założeniami spełnia rolę oszacowania od dołu poziomu hałasu panującego w pomieszczeniu.

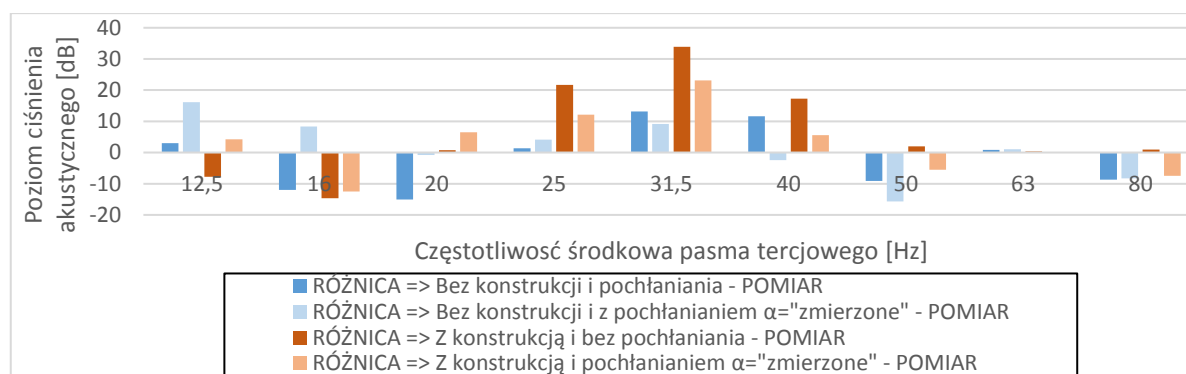
## 5.2. Model obliczeniowy dokładny

W ramach dokładnego modelowania numerycznego wykonano dwa modele w wykorzystaniu metod elementów skończonych w dziedzinie częstotliwości. Pierwszy model złożony jest z elementów bezpośrednio graniczących z pomieszczeniem (opłytywanie ścian), bez konstrukcji ścian (słupki drewniane). W drugim modelu wykonano elementy konstrukcyjne ścian i stropu. Widok aksonometryczny modelu pokazano na Rys. 5.2



Rys. 5.2 Widok aksonometryczny modelu (a) bez elementów konstrukcyjnych przegród (b) z elementami konstrukcyjnymi przegród wraz z umiejscowieniem podparcia (linia niebieska)

Na Rys. 5.3 można zauważyć, że model bez konstrukcji ściany daje wyniki bliższe tym, które otrzymano w toku pomiarów in situ. Co więcej zadanie chłonności akustycznej do przegrody pomieszczenia ma istotny wpływ na wartości otrzymane z symulacji.



Rys. 5.3 Różnica poziomu ciśnienia akustycznego otrzymany w punktach pomiarowych z modelu względem pomiaru in-situ

W ramach podsumowania w Tab. 5.1 zestawiono wyniki poziomu uciążliwości dla hałasu i całkowitych otrzymanych z przeanalizowanych modeli obliczeniowych. Można zauważyć, że wszystkie modele prawidłowo przewidziały dominację bodźca, czyli to, że drgania są bardziej uciążliwe na badanym obiekcie. Wyniki poziomu uciążliwości od hałasu  $\psi_n$  mieszczą się w przedziale  $\langle -3,85 ; +7,13 \rangle$ . Generalnie modele zawyżają poziom uciążliwości od hałasu  $\psi_n$  z wyjątkiem modelu wykorzystującego współczynnik promieniowania dźwięku i modelu bez konstrukcji przegród pomieszczenia z uwzględnieniem chłonności akustycznej. Zawyżenie wyników poziomu uciążliwości w modelach numerycznych może wynikać z błędów numerycznych.

Tab. 5.1 Zestawienie wyników poziomu uciążliwości od hałasu  $\psi_n$  i całkowitych poziomów uciążliwości  $\psi_{tot}$  otrzymanych z modeli obliczeniowych przy założonej wartości poziomu uciążliwości od drgań  $\psi_v$

	$\Psi_n$ [-]	$\Psi_v$ [-]	$\Psi_{tot}$ [-]
Modele uproszczone			
Model z promieniowaniem	15,36	29,99	30,14
Model Kurzweila	23,39		30,85
Modele MES			
Bez konstrukcji i pochłaniania	20,63	29,99	30,47
Bez konstrukcji i z pochłanianiem $\alpha$ ="zmierzone"	18,40		30,28
Z konstrukcją i bez pochłaniania	26,35		31,55
Z konstrukcją i pochłanianiem $\alpha$ ="zmierzone"	22,53		30,71
WYNIK POMIARU	19,22	29,99	30,34

## 6. Wnioski końcowe

W pracy analizowano problematykę hałasu w aspekcie kryteriów komfortu wibroakustycznego. Celem pracy było zaproponowanie kompleksowego sposobu oceny klimatu wibroakustycznego oraz przeanalizowanie istniejących metod prognozowania poziomu hałasu od drgających przegród pomieszczenia. Cel osiągnięto poprzez zaproponowanie kryterium całkowitego poziomu uciążliwości  $\psi_{tot}$  opartego na zjawisku sumowania odbioru bodźców – hałasu i vibracji oraz przeprowadzenie analiz sposobów prognozowania hałasu z określeniem ich skali dokładności.

Teza pierwsza odnosząca się do możliwości określenia poziomu drgań, przy którym rozpoczyna się emisja hałasu o danym stopniu uciążliwości została potwierdzona w wyniku przeprowadzonych pomiarów in-situ i wyznaczenie zależności pomiędzy wielkościami opisującymi hałas i drgania. Zaobserwowana korelacja pomiędzy tymi wielkościami pozwala, przy analogicznym wymuszeniu dynamicznym i dla danego pomieszczenia, określić poziom hałasu i towarzyszące mu drgania o danym poziomie uciążliwości. Potwierdzeniem tezy jest

również wykonanie obliczeń numerycznych, które w ramach metody jakościowej pozwolą wstępnie oszacować skalę bodźca hałasu i jego uciążliwość. Teza druga natomiast odnosi się do konieczności analizy kryteriów komfortu wibroakustycznego na poziomie oddziaływania drgań i hałasu i została wykazana w wyniku zaproponowania kryterium całkowitego poziomu uciążliwości  $\psi_{tot}$ . Analiza z wykorzystaniem poziomów uciążliwości od hałasu  $\psi_n$  oraz drgań  $\psi_v$  pokazuje, że spełnienie wymagań komfortu dla poszczególnych bodźców może nie być wystarczające, gdy do oceny weźmie się pod uwagę ich symultaniczne działanie poprzez całkowity poziom uciążliwości  $\psi_{tot}$ .

Innowacją w stosunku do metodyki oceny wpływu hałasu ocenianego równocześnie z drganiami transportowymi opisaną w literaturze jest to, że pojęcie poziomu uciążliwości pozwala na określenie względnego znaczenia bodźców (hałasu i wibracji) oraz ich wzajemnego sumowania mającego bezpośrednio wpływ na komfort ludzi przebywających w budynkach. Dzięki temu można bardziej kompleksowo podejść do oceny komfortu wibroakustycznego ludzi przebywających w budynku, co pozwala na określenie klasy komfortu wibroakustycznego (por. Tab. 3.1)

## 7. Kierunki przyszłych prac

Celowym wydaje się być pogłębienie zagadnień objętych niniejszą pracą, w szczególności opracowanie przejrzystych, możliwych do implementacji wytycznych, które pozwolą na wspólną ocenę wpływu czynników dokuczliwych jakimi są hałas i drgania generowane poprzez różne środki transportu.

Dalsze badania mają odpowiedzieć na pytanie, przy jakim stopniu złożoności konstrukcji można mówić o ilościowym przewidzeniu poziomu hałasu wypromieniowywanego z drgających przegród pomieszczenia. Modelowanie numeryczne w tym zakresie wymaga więc także poszerzenia o różne konstrukcje pomieszczenia, ale także i przeznaczenie pomieszczenia. Przeznaczenie pomieszczenia ma bowiem wpływ na odczuwalność czynników niekorzystnych. W pomieszczeniach warsztatowych czy biurowych dominującym czynnikiem negatywnym może okazać się hałas, w tym materiałowy, a w przypadku pomieszczeń mieszkalnych z uwagi na ułożenie ciała człowieka, a w szczególności na odbiór drgań w kierunku prostopadłym lub równoległym do linii kręgosłupa dominującym mogą być drgania. Warto tu zaznaczyć, że nie bez znaczenia pozostaje pora występowania czynnika drażniącego. Jest to bardzo często podejmowana dyskusja w literaturze tematu czy można prowadzić badania w porze dziennej i stosować dla takich rejestracji kryteria oceny stosowane w porze nocnej. Warto pochylić się nad tym tematem, ponieważ w praktyce pomiarowej, w budynkach zamieszkałych przez lokatorów dostęp do pomieszczeń w porze nocnej jest mocno utrudniony.

Wszystkie wyżej wymienione zagadnienia wymagają pogłębionej analizy, ale możliwe jest także, że część z nich będzie musiała być zbadana przy udziale ludzi.

## 8. Bibliografia

- [1] Dz.U. 2002 nr 75 poz. 690 „Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie.” Z późniejszymi zmianami., 2018.
- [2] PN-B-02171:2017-06 Ocena wpływu drgań na ludzi w budynkach, 2017.
- [3] PN-B-02151-2:2018-01 Akustyka budowlana -- Ochrona przed hałasem w budynkach -- Część 2: Wymagania dotyczące dopuszczalnego poziomu dźwięku w pomieszczeniach, 2018.

- [4] PN-B-02151-3:2015-10 Akustyka budowlana -- Ochrona przed hałasem w budynkach -- Część 3: Wymagania dotyczące izolacyjności akustycznej przegród w budynkach i elementów budowlanych, 2018.
- [5] PN-B-02151-4:2015-06 Akustyka budowlana -- Ochrona przed hałasem w budynkach -- Część 4: Wymagania dotyczące warunków pogłosowych i zrozumiałości mowy w pomieszczeniach oraz wytyczne prowadzenia badań, 2015.
- [6] Z. Engel, Ochrona środowiska przed drganiami i hałasem, Warszawa: PWN, 1993.
- [7] PN-B-02153:2002 Akustyka budowlana -- Terminologia, symbole literowe i jednostki, 2002.
- [8] L. Cremer, M. Heckl i B. Petersson, Structure-Borne Sound - Structural Vibrations and Sound Radiation at Audio Frequencies, 3rd edition, Berlin: Springer-Verlag, 2005.
- [9] D. Fleming i M. Griffin, „A study of the subjective equivalence of noise and whole-body vibration,” *Journal of Sound and Vibration*, tom 42, nr 4, pp. 453-461, 1975.
- [10] H. V. Howarth i M. J. Griffin, „The annoyance caused by simultaneous noise and vibration from railways,” *Journal of Acoustic Society of America*, nr 89(5), pp. 2317-2323, 1991.
- [11] T. Hempstock i D. Saunders, „Cross modality determination of the vibration growth function,” *U.K. Informal Group Meeting on Human Response To Vibration*, 1973.
- [12] A. Kjellberg, B. Wikstrom i U. Dimberg, „Whole-body vibration: exposure time and acute effects - experimental assessment of discomfort,” *Ergonomics*, tom 28, nr 3, pp. 545-554, 1985.
- [13] H. Howarth i M. Griffin, „The relative importance of noise and vibration from railways,” *Applied Ergonomics*, tom 21, nr 2, pp. 129-134, 1990.
- [14] H. Howarth i M. Griffin, „Subjective Response to Combined Noise and Vibration: Summation and Interaction Effects,” *Journal of Sound and Vibration*, tom 143, nr 3, pp. 443-454, 1990.
- [15] ISO 14837-1-2005 Mechanical vibration — Ground-borne noise and vibration arising from rail systems, 2005.
- [16] ISO 2631-2:2003 Mechanical vibration and shock — Evaluation of human exposure to whole-body vibration — Part 2: Vibration in buildings (1 Hz to 80 Hz), 2003.
- [17] NS 8175:2012 Acoustic Conditions In Buildings - Sound Classification Of Various Types Of Buildings, 2012.
- [18] ISO 140-5:1998 Acoustics — Measurement of sound insulation in buildings and of building elements — Part 5: Field measurements of airborne sound insulation of façade elements and façades, 1998.
- [19] L. G. Kurzweil, „Ground-borne noise and vibration from underground rail systems,” *Journal of Sound and Vibration*, nr 66, pp. 363-370, 1979.
- [20] A. B. Nagy, P. Fiala, F. Marki, F. Augusztinovicz, G. Degrande, S. Jacobs i D. Brassenx, „Prediction of interior noise in buildings generated by underground rail traffic,” *Journal of Sound and Vibration*, nr 293, pp. 680-690, 2006.
- [21] A. Szeląg, K. Stypuła i T. Kamiński, „Sound Radiation by Vibrating Building Partitions in Terms of Acceptable Vibration Values,” *Acta Physica Polonica A*, nr 125, pp. 122-126, 2014.

- [22] A. Colaço, P. A. Costa, P. Amado-Mendes, F. Magalhães i L. Godinho, „Experimental validation of a FEM-MFS hybrid numerical approach for vibroacoustic prediction,” *Applied Acoustics*, nr 141, pp. 79-92, 2018.
- [23] P. Fiala, S. Gupta, G. Degrande i F. Augusztinovicz, „A numerical model for re-radiated noise in buildings from underground railway,” *Noise and Vibration Mitigation for Rail Transportation Systems*, pp. 115-121, 2008.
- [24] BS 6841:1987 Guide to measurement and evaluation of human exposure to wholebody mechanical vibration and repeated shock, 1987.