



Prof. dr hab. inż. Janusz KAWECKI, [jkawec@usk.pk.edu.pl](mailto:jkawec@usk.pk.edu.pl)  
Dr hab. inż. Krzysztof STYPUŁA, prof. PK, [kstypula@usk.pk.edu.pl](mailto:kstypula@usk.pk.edu.pl)  
Politechnika Krakowska

## BŁĘDY W DIAGNOZACH DOTYCZĄCYCH OCENY WPŁYWÓW DYNAMICZNYCH NA BUDYNKI

### FAULTS IN DIAGNOSES CONCERNING EVALUATION OF DYNAMIC INFLUENCES ON BUILDINGS

**Streszczenie** Skale SWD są stosunkowo prostym kryterium oceny wpływu drgań na budynki. Zapewne dlatego prace diagnostyczne z zastosowaniem tych skal podejmują również osoby nie posiadające wykształcenia z zakresu budownictwa. Na podstawie przeglądu wielu opracowań diagnostycznych oraz publikacji opisujących ich wyniki zestawiono najczęściej występujące błędy w ocenach. Niekiedy błędy te mogą przyczyniać się do wystąpienia stanów przedawaryjnych budowli.

**Abstract** SWD scales are a relatively simple evaluation criterion of vibration influence on buildings. Due to it people without building engineering education undertake diagnostic evaluations with application of these scales. Basing on the review of a number of diagnostic elaborations as well as publications presenting their results a list of the most frequent faults in evaluation was elaborated. Sometimes these faults can contribute to pre-break down of structures.

### 1. Wstęp

Coraz częściej w opracowaniach diagnostycznych dotyczących budynków i ludzi w nich przebywających trzeba sięgnąć po kryteria uwzględniające wpływy dynamiczne. Wynika to przede wszystkim ze zwiększenia liczby i intensywności źródeł działań dynamicznych sytuujących się w budynkach i w ich sąsiedztwie (por. [2]) oraz z formułowania coraz bardziej ostrych wymagań w zakresie ochrony budowli przed wpływami dynamicznymi.

Opracowanie diagnostyczne (najczęściej jest to diagnoza przyczynowo-skutkowa [4]) wymaga przyjęcia kryterium diagnostycznego. Kryteria stosowane w diagnostyce dynamicznej mogą być podane bezpośrednio (w postaci zadanych wartości dopuszczalnych) albo pośrednio (odniesione do takich wielkości podstawowych jak: naprężenie, odkształcenie). W diagnozie dynamicznej odnoszącej się do konstrukcji budowlanych zwykle kryteria diagnostyczne wywodzi się z warunków wytrzymałości i sztywności. Opracowanie diagnozy dynamicznej w odniesieniu do budynku wymaga wyznaczenia sił bezwładności generowanych podczas drgań budynku i uwzględnienia ich działania w przyjętym kryterium diagnostycznym. Do wykonywania takich zadań przygotowani są absolwenci kierunku kształcenia „budownictwo”.

W odniesieniu do pewnej klasy typowych budynków murowanych w [1] sformułowano kryteria diagnostyczne w postaci tzw. skal wpływów dynamicznych: SWD-I i SWD-II.

Po wieloletniej weryfikacji aplikacyjną wersję tych skal wprowadzono do normy PN-85/B-02170 („Ocena szkodliwości drgań przekazywanych przez podłoże na budynki”). Diagnozę dynamiczną w odniesieniu do budynków objętych zakresem stosowania skal SWD przeprowadza się na podstawie odpowiednio zebranych i opracowanych wyników pomiarów dynamicznych. Stosunkowo prosta procedura diagnostyczna uwzględniająca kryterium oceny podane w postaci skal SWD wzbudza zainteresowanie nie tylko specjalistów z zakresu budownictwa, ale również osób przygotowywanych do zupełnie innych zadań technicznych, dysponujących wiedzą z zakresu pomiarów wielkości fizycznych oraz aparaturą pomiarową. Okazuje się, że pomimo prostoty procedury diagnostycznej stosowanie jej przez osoby nie posiadające wiedzy technicznej z zakresu budownictwa popartej doświadczeniem w dziedzinie dynamiki budowli prowadzi do diagnoz obarczonych błędami. Bywa też, iż w wyniku błędnych diagnoz nie są podejmowane odpowiednie działania techniczne w stosunku do obiektu objętego diagnozą i zwiększa się stan zagrożenia tego obiektu awarią.

Autorzy normy PN-85/B-02170 przewidując tego typu zagrożenia wprowadzili w przedmowie następujące zobowiązanie: „Do wykorzystania normy, szczególnie w przypadku diagnostyki, potrzebne są pomiary drgań. Mogą je wykonywać jednostki naukowo- badawcze lub służby techniczne dysponujące sprzętem pomiarowym i obsługującą go ekipą specjalistów, w której skład powinien wchodzić inżynier budownictwa”.

Pomimo tak sprecyzowanych wymagań oraz stosunkowo szczegółowych zapisów odnoszących się do metodyki pomiarowo- interpretacyjnej coraz częściej pojawiają się opracowania diagnostyczne, w których formułowane są wnioski i zalecenia na podstawie błędnie prowadzonych pomiarów oraz źle opracowywanych wyników diagnozy. Bywa również, że takie opracowania diagnostyczne i ich wyniki są upowszechniane w publikacjach a nawet wykorzystywane w prognozowaniu wpływów dynamicznych na budynki.

Zauważone przez nas błędy występujące coraz częściej w diagnozach dynamicznych przeprowadzonych z zastosowaniem skal SWD i w publikacjach opisujących wyniki owych prac diagnostycznych były inspiracją do opracowania niniejszego referatu na konferencję dotyczącą awarii budowlanych.

## 2. Błędy w ocenie wpływów dynamicznych na budynki

### • Stosowanie skal SWD do budowli spoza zakresu objętego tym kryterium

Już w [1] R. Ciesielski- autor skal SWD- wyraźnie zaznaczył, iż wszystkie analizy, które posłużyły do skonstruowania tych skal, zostały przeprowadzone na dwóch budynkach wzorcowych. Obydwa były budynkami o konstrukcji murowej i warunki odpowiadające tworzeniu linii rozgraniczających strefy wpływów dynamicznych uwzględniały wytrzymałość, sztywność i stateczność takich właśnie konstrukcji (por. [4]). Wymagania odnośnie do budynków, do których odnoszą się skale SWD podane są w p. 5.2 normy PN-85/B-02170. Nie można więc stosować tych skal do budynków o konstrukcji żelbetowej (ścianowych i szkieletowych) i stalowej.

Okazuje się jednak, że autorzy diagnoz dotyczących nawet takich obiektów jak hale produkcyjne o konstrukcji stalowej w kryterium diagnostycznym wykorzystują skale SWD. Nie zauważają, iż nie tylko układ konstrukcyjny i materiał, z którego konstrukcja została wykonana zasadniczo odbiegają od budynków, które posłużyły jako wzorce przy opracowywaniu skal, ale również znacząco różnią się wartości współczynnika opisującego tłumienie stalowej hali i budynku murowanego, co ma istotny wpływ na reakcję dynamiczną budowli.

Występują również opracowania diagnostyczne dotyczące takich budowli murowych jak kościoły. Ich autorzy upraszczając analizy, które powinny towarzyszyć diagnozie

wykorzystują skale SWD do oceny wpływu drgań na te obiekty budowlane. I chociaż konstrukcja tych budowli jest wykonywana z elementów murowych jednak jej układ znacząco różni się od konstrukcji budynków. W tych ostatnich występują stropy nie tylko wydzielające w przestrzeni poszczególne kondygnacje, ale również usztywniające cały obiekt. Ta różnica w konstrukcji istotnie wpływa na wartości sił bezwładności generowanych podczas drgań i na rozkład sił przekrojowych w elementach konstrukcji. Nie można więc na podstawie pomierzonych wartości parametrów drgań fundamentu kościoła oceniać skutków działania dynamicznego na ten obiekt za pomocą skal SWD.

- **Błędne usytuowanie punktu pomiarowego**

Przy stosowaniu skal SWD w ocenie wpływu drgań na budynek wykorzystuje się wyniki pomiarów uzyskane w punkcie pomiarowym umieszczonym od strony źródła drgań na fundamencie budynku lub ścianie nośnej w poziomie otaczającego terenu. Pomiar dotyczy składowych poziomych przyspieszenia drgań. Takie wymaganie zapisano w p. 3.1.c załącznika 2 do normy, w którym to załączniku zestawiono wytyczne wykonania pomiarów drgań. Już z tego zapisu wynika wyraźnie żądanie, aby pomiar dotyczył wymuszenia kinematycznego budynku.

Jeśli jednak wykonujący pomiar nie ma wiedzy z zakresu konstrukcji obiektów budowlanych, to sytuuje punkt pomiarowy w miejscu, w którym występują duże amplitudy drgań. I takie miejsce odnajduje np. na murku pod spocznikiem schodów wejściowych do budynku. Najczęściej ta część obiektu jest oddylatowana od budynku.

W innym opracowaniu diagnostycznym przyjęto punkt pomiarowy na stropie nad piwnicą i wyniki uzyskane w tym miejscu wykorzystano do oceny wpływu drgań na budynek stosując skale SWD. Przeważnie pomierzone w ten sposób parametry charakteryzują się większymi wartościami a na wykresach skal SWD punkty odpowiadające pomierzonym wartościom (częstotliwość, maksymalne przyspieszenie odpowiadające tej częstotliwości) sytuują się w wyższej strefie szkodliwości. i wówczas wyniki diagnozy nie odpowiadają zidentyfikowanym podczas wizji lokalnej skutkom działań dynamicznych.

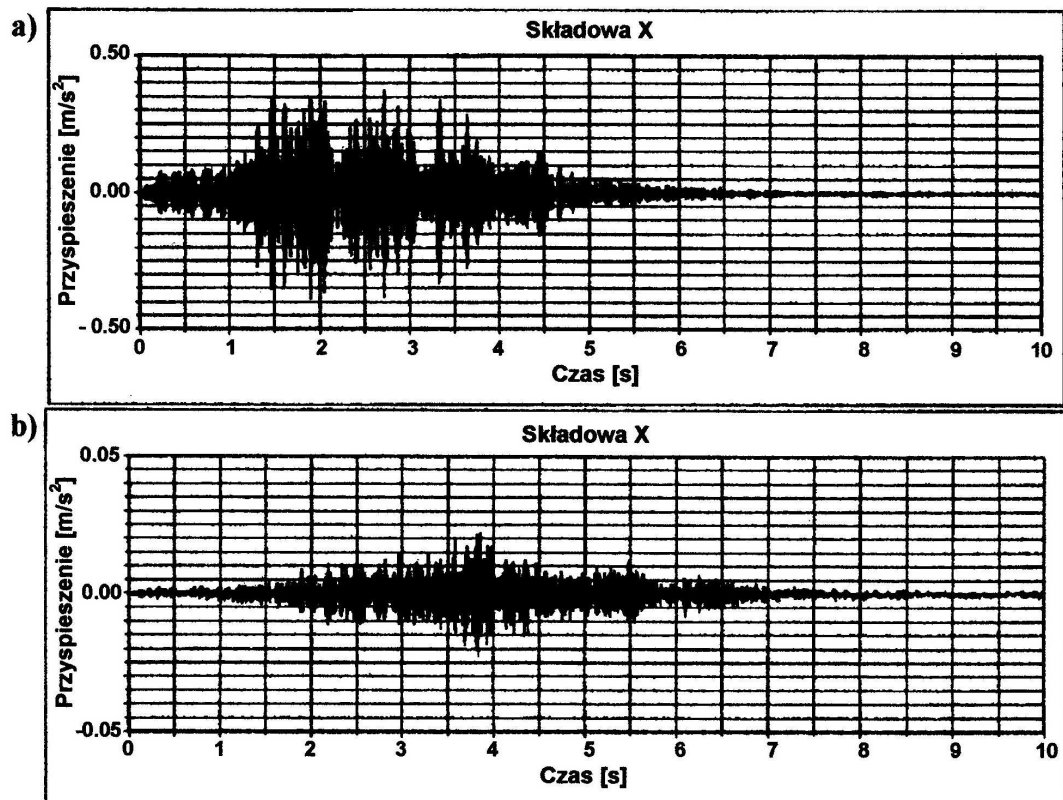
Przeglądając różne opracowania diagnostyczne spotkaliśmy się i z takimi wynikami, w których - stosując skale SWD- przyjmowano za podstawę oceny wyniki pomiarów drgań poziomych budynku zarejestrowanych na wyższej kondygnacji.

- **Błędna interpretacja możliwości pominięcia wpływu drgań przekazywanych na budynek przez podłoże**

W normie PN-85/B-02170, w punkcie 4.3 sformułowano warunki, których spełnienie umożliwi pominięcie w obliczeniach wpływu drgań przekazywanych na obiekt przez podłoże. Bardzo często podane tam odległości budynku od źródła drgań przyjmowane są również w opracowaniach diagnostycznych jako wiążące. A tak nie jest. Wyraźnie bowiem już w tytule tego punktu zaznaczono, że owe „pominięcie” dotyczy obliczeń tzn. fazy projektowania, kiedy jeszcze budynek lub źródło drgań nie występuje i nie jest możliwe wykonanie diagnozy przyczynowo-skutkowej. Podane w normie odległości powinny być traktowane jako orientacyjne i tak jest to w normie zapisane. Podczas diagnozy przeprowadzonej w stosunku do budynku zrealizowanego i działającego źródła drgań jest możliwe bezpośrednie ocenienie wpływu działań dynamicznych na obiekt i wynik oceny może być inny od podanego w normie jako „orientacyjny”.

Niekiedy autorzy diagnoz korzystając z pomiarów dynamicznych w punkcie pomiarowym na zrealizowanym budynku (ściana piwniczna w poziomie terenu, fundament) stosują zapis podany w punkcie 4.3. normy i na tej podstawie stwierdzają, że drgania nie wpływają na budynek, gdyż maksymalna wartość pomierzonego przyspieszenia jest mniejsza od 0,005 g (por. wzór 11 w normie). Tak właśnie postąpili np. autorzy diagnozy, którą przedstawili w [6]. W normie zaś zaznaczono wyraźnie, że wartość  $a_p$  występująca we wzorze (11) to „amplituda przyspieszenia ruchu poziomego podłoża”, nie zaś konstrukcji nośnej ściany

piwnicznej budynku. Występują bowiem znaczące różnice między drganiami podłoża w miejscu przyszłego posadowienia budynku a drganiami jego fundamentu. Przedstawiono to m.in. w [3, 4]. Tu zaś na rys. 1 zamieszczono wibrogramy uzyskane z pomiaru składowej poziomej drgań na podłożu (rys. 1a) i na fundamencie budynku (rys. 1b) wywołane przejazdem pociągu metra. Redukcja amplitud drgań przy przejściu z podłoża na fundament wyniosła w tym przypadku około 92%. Tak więc wynik diagnozy budynków opisanych w [6] wyrażony stwierdzeniem, iż „*obciążenia budynku wywołane przez podłoże mogą być w obliczeniach dynamicznych pomijane*”, nie ma żadnego uzasadnienia w przywołanych w pracy analizach.

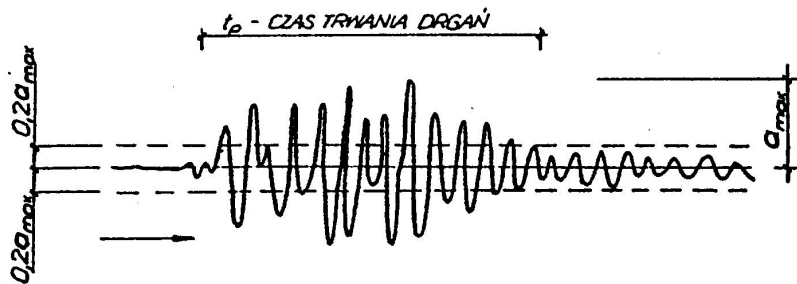


Rys. 1. Wibrogramy składowej poziomej drgań podłoża (a) oraz drgań fundamentu budynku (b) wywołanych przejazdem pociągu metra

Całkowicie błędne były również przedstawione w [6] analizy dotyczące dwóch wysokich (9- i 10- kondygnacyjnych) budynków i na tej podstawie wyrażenie opinii o przyczynie odpadania płyt elewacyjnych występujących w tych budynkach. Jako kryterium oceny przyjęto tu warunki zapisane w p. 6.1 normy dotyczące urządzeń bardzo wrażliwych (I klasa wrażliwości) usytuowanych w budynkach.

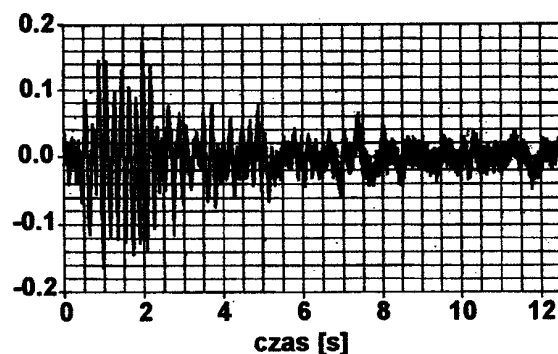
- **Błędne opracowanie wyników pomiarów**

Zarejestrowane drgania budynku w punkcie obranym według zasad podanych w rozdziale 3.1.c załącznika 2 do normy należy poddać analizie w pasmach 1/3- oktaowych w przedziale częstotliwości od 1 Hz do 100 Hz. W każdym punkcie pomiarowym można zarejestrować ruch tego punktu nawet wówczas, gdy poziom drgań jest bardzo mały. Trzeba, więc, jednoznacznie określić czas trwania drgań i analizę przeprowadzić w odniesieniu do tego czasu. W normie jednoznacznie zdefiniowano czas trwania drgań (por. p. 1.3.3 normy oraz rys. 2): analiza poszczególnych składowych wibrogramu powinna dotyczyć tego wycinka, w którym wartości amplitud ocenianego parametru ruchu są większe niż 0,2 wartości maksymalnej.

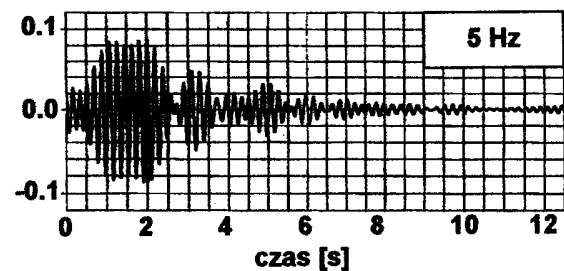
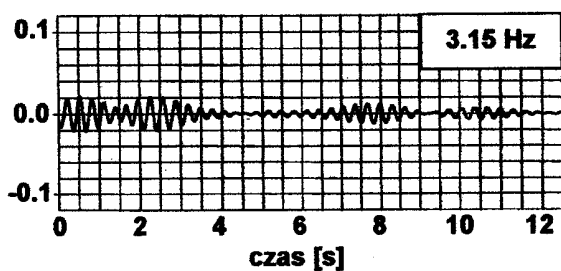


Rys. 2. Interpretacja czasu trwania drgań

Na rys. 3 zamieszczono wibrogram zarejestrowany na fundamencie budynku murowanego. Z rejestracji obejmującej ponad 12 s w dalszej analizie uwzględniono początkowe 8 s. Na podstawie analizy częstotliwościowej wybranej części wibrogramu uzyskano informacje o zawartości w łącznym sygnale drgań o zadanych częstotliwościach z przedziałów odpowiadających kolejnym częstotliwościom środkowym. Przykładowo na rys. 4 podano wykresy odpowiadające pasmom o częstotliwościach środkowych 3,15 Hz i 5,00 Hz. Wartości maksymalne przyspieszenia drgań występujące w każdym z takich wykresów będą przypisane częstotliwościom środkowym każdego z pasm częstotliwości.



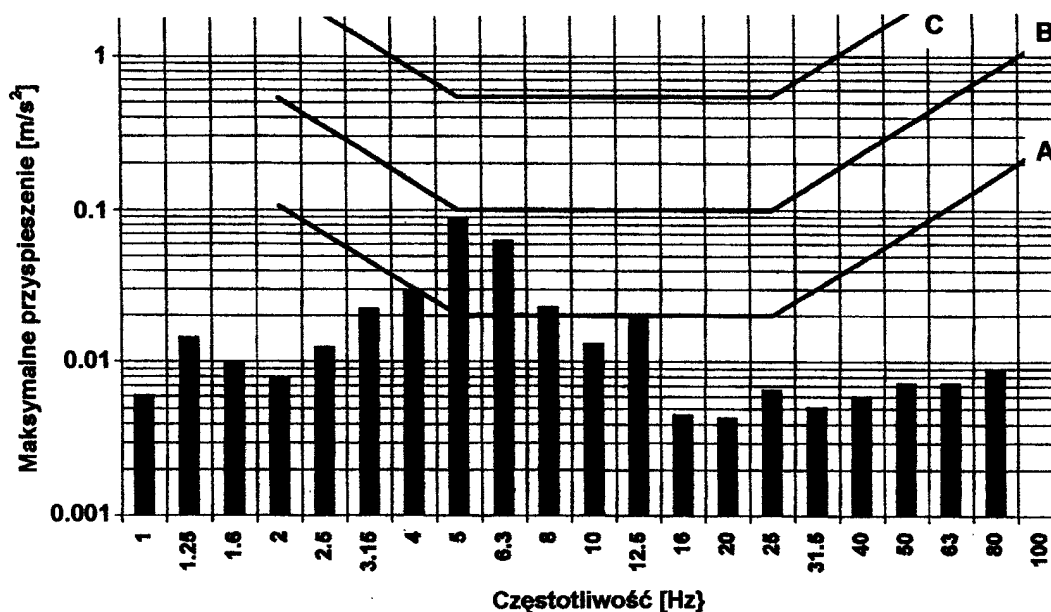
Rys. 3. Wibrogram sygnału zarejestrowanego podczas pomiaru



Rys. 4. Składowe wibrogramu odpowiadające przejściu sygnału przez filtry o pasmach 1/3- oktawowych i częstotliwościach środkowych 3,15 Hz i 5,00 Hz

Na rys. 5 zestawiono wyniki analizy wibrogramu w poszczególnych pasmach częstotliwości. Na ten wykres naniesiono linie rozdzielające strefy wpływów dynamicznych wg skali SWD-I. Wynik diagnozy dynamicznej w odniesieniu do rozważanego niskiego budynku murowanego można sformułować następująco: drgania, którym poddany jest budynek są przez budynek odczuwalne (II strefa), ale nie są szkodliwe dla konstrukcji, jedynie przyspieszają zużycie budynku i mogą spowodować wystąpienie rys w wyprawach i tynkach. Trzeba jednak zauważyć, iż drgania te w przedziale częstotliwości 5÷6,3 Hz osiągają poziom blisko dolnej granicy powstania zarysowań i spękań w elementach

konstrukcyjnych (linia B na skali SWD-I). Jeśli więc należałoby zmierzać do ograniczenia wpływów dynamicznych na budynek, to trzeba zastosować środki techniczne redukujące drgania w tym przedziale 5÷6,3 Hz (por. [4, 10]).



Rys. 5. Wyniki analizy pomierzonych drgań naniesionych na wykresach skali SWD-I

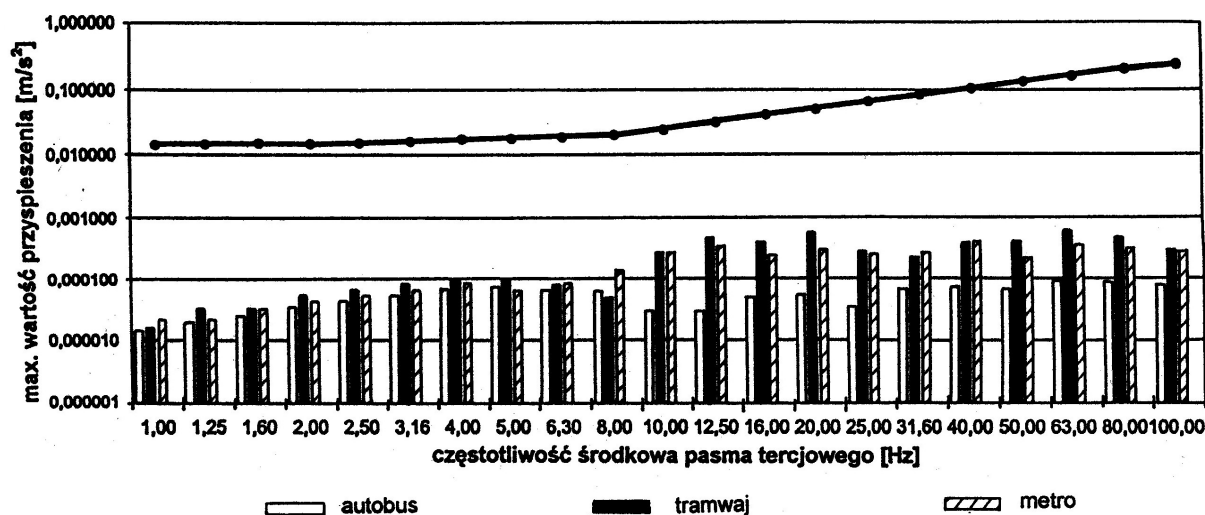
Zupełnie inny wynik diagnozy („drgania nieodczuwalne przez budynek”) przedstawiono w opracowaniu diagnostycznym, którego autorzy wyznaczyli wartości RMS przyspieszenia drgań obliczane w znacznie dłuższym czasie rejestracji. W owym opracowaniu nie brano pod uwagę ograniczenia podanego w p. 1.3.3 normy („czas trwania drgań”) a wartości przyspieszenia drgań w każdym z pasm częstotliwości wyznaczono jako RMS (analogicznie do analiz związanych z wpływem drgań na ludzi przeprowadzanych wg PN-88/B-02171), chociaż w normie PN- 85/B-02170 nie występuje takie określenie.

### 3. Błędy w prognozowaniu wpływów dynamicznych na budynki

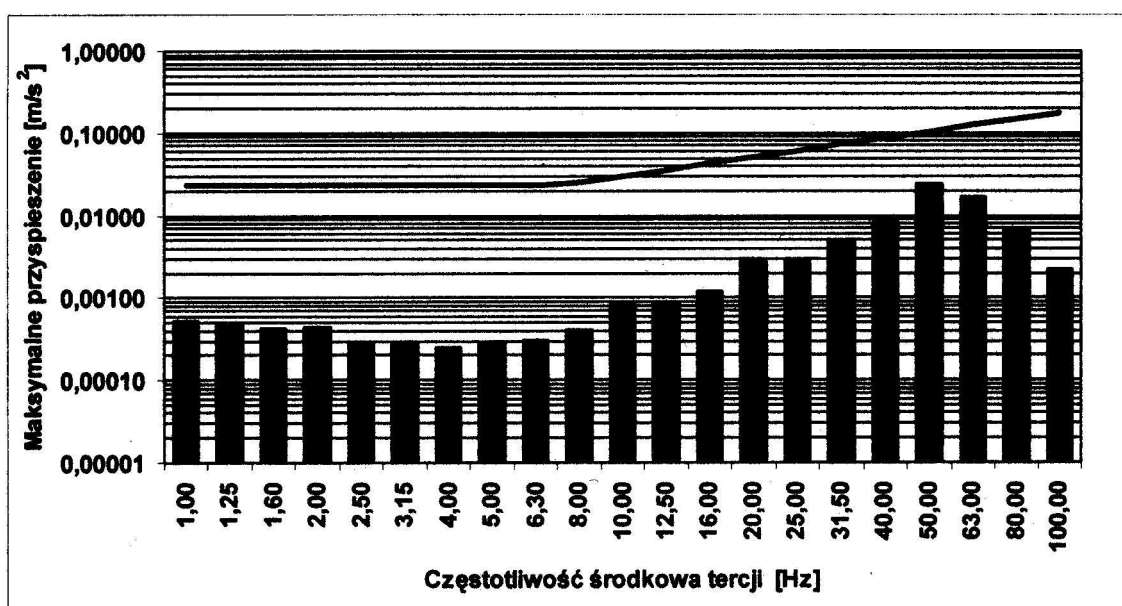
Znacznie trudniejszym zadaniem jest opracowanie diagnozy z uwzględnieniem prognozowania wpływu planowanych źródeł drgań na istniejący budynek albo występujących już źródeł drgań na budynek projektowany (por. [5]). Zadaniem diagnozy w takich przypadkach jest sprawdzenie, czy i w jaki sposób działanie źródła drgań może oddziaływać na stan techniczny budynku usytuowanego w strefie wpływu drgań na zabudowę. Autor prognozy musi dysponować obszernym zbiorem informacji uzyskanych podczas pomiarów przeprowadzanych w różnych warunkach działania źródeł drgań. Najczęściej informacje takie gromadzi się w specjalnych bazach danych. Każdy z wibrogramów umieszczonych w bazie danych powinien być scharakteryzowany opisem miejsca odbioru drgań, źródła drgań i drogi propagacji od źródła drgań do ich odbiornika. Na podstawie zbioru podanego w bazie danych można wybrać wibrogram najbardziej zbliżony do wywołanego prognozowaną sytuacją.

Ostatnio coraz częściej zachodzi potrzeba wykonania diagnoz odnoszących się do istniejących budynków, w których sąsiedztwie będą przebiegać nowe trasy komunikacyjne (droga szybkiego ruchu, tunel metra, tor kolejowy). Bardzo ważnym elementem wpływającym na wiarygodność tego typu diagnoz jest prawidłowe wyznaczenie charakterystyki drgań fundamentu budynku wywołanych prognozowanym źródłem drgań.

W [7] i [8] autorzy zastosowali opracowany przez nich numeryczny model generatora drgań harmoniczych i wykorzystali go do badań symulacyjnych wpływu na budynki drgań generowanych przejazdami różnych pojazdów (tramwaj, autobus, metro). W diagnozie połączonej z prognozą autorzy korzystali ze skali SWD-II. Wyniki diagnoz przedstawili w postaci wykresów. Na rys. 6 zamieszczono jeden z nich, z którego- w celu zwiększenia jego czytelności- wybrano wyniki odnoszące się do takich źródeł drgań jak: autobus, tramwaj oraz metro. Na wykresie tym wpływ każdego ze środków transportu branych pod uwagę w analizie w poszczególnych pasmach częstotliwości różni się jedynie wartościami amplitud drgań. Nie występują istotne różnice w strukturze częstotliwościowej między oddziaływaniami różnych źródeł drgań na budynek. Struktura drgań prognozowanych wg autorów [7, 8] w porównaniu ze strukturą rzeczywistych drgań, jaką otrzymuje się w wyniku pomiarów na fundamentach różnych budynków przy działaniu tych źródeł drgań jest znacząco inna. Różnice są nie tylko ilościowe, ale również jakościowe (por. [9]). Na rys. 7 podano przykładowy wynik oceny wpływu pomierzonych w budynku drgań poziomych generowanych przejazdem metra oraz zaznaczono linię A skali SWD-II.



Rys. 6. Wyniki diagnozy z prognozą przedstawione w [8]



Rys. 7. Wyniki oceny wpływu na budynek drgań poziomych generowanych przejazdem metra (składowa x) wg skali SWD-II (por. [9])

Widać wyraźnie, że dominują wyższe częstotliwości drgań. Zupełnie inny wykres słupkowy uzyska się analizując drgania wywołane przejazdem tramwaju, a jeszcze inny przejazdem autobusu.

Prognozy otrzymane na podstawie złego (np. przyjętego w [7, 8]) modelu wymuszenia są błędne i nie mogą służyć do oceny wpływu drgań na budynki.

#### 4. Podsumowanie

Konferencja poświęcona awariom budowlanym wydaje się być odpowiednim forum do przedstawienia niniejszej pracy. W ten sposób można bowiem uwrażliwić autorów opracowań diagnostycznych na to, aby przed przystąpieniem do wykonywania tych prac dogłębnie rozpoznali problemy z tym związane i stosowali się do wymagań precyzyjnie określonych w cytowanej normie i wspartych stosownymi uzasadnieniami podanymi w publikacjach.

Celem referatu jest też zwrócenie uwagi zleceniodawcom tego typu diagnoz na to, aby opracowywały je zespoły legitymujące się odpowiednim doświadczeniem. Szczególnie ważne jest to wówczas, gdy diagnozy mają mieć charakter prognozowania wpływów dynamicznych. Powinny je wykonywać instytucje dysponujące odpowiednio obszernymi bazami danych tzn. takimi, które umożliwią wiarygodne prognozowanie oraz umiejętnością wykonywania modeli i obliczeń dynamicznych konstrukcji budowlanych.

#### Literatura

1. Ciesielski R.: Ujęcie obliczeniowe oraz ocena wpływu drgań i wstrząsów ze źródeł zewnętrznych na niektóre typy budowli. Zeszyty Naukowe Politechniki Krakowskiej nr 1, Kraków 1961.
2. Ciesielski R.: Istniejące i potencjalnie możliwe obciążenia dynamiczne budynków Śródmieścia Krakowa. Inżynieria i Budownictwo, nr 11-12, 1983.
3. Ciesielski R., Maciąg E.: Drgania drogowe i ich wpływ na budynki. Wyd. Komunikacji i Łączności, Warszawa 1990.
4. Ciesielski R., Kawecki J., Maciąg E.: Ocena wpływu wibracji na budowle i ludzi w budynkach (diagnostyka dynamiczna). Wyd. ITB, Warszawa 1993.
5. Kawecki J.: Diagnostyka drgań komunikacyjnych na budynki i ludzi w budynkach. Transport Miejski i Regionalny, nr 11/2006.
6. Kruszka L., Rekucki R.: Badania eksperymentalne in situ odpowiedzi dynamicznej elementów konstrukcyjno- budowlanych obiektów na wymuszenie losowe. XII<sup>th</sup> Theoretical Foundation of Civil Engineering, Warsaw 2004.
7. Nader M., Różowicz J., Korzeb J., Purta E.: Wybrane zagadnienia oddziaływania metra warszawskiego na budynki. Politechnika Radomska, Prace Naukowe, Transport Nr 3(23), 2005.
8. Różowicz J., Nader M., Korzeb J.: Traffic generated vibration impact on buildings. Twelfth International Congress on Sound and Vibration, Lisbon 2005.
9. Stypuła K.: Drgania mechaniczne wywołane eksploatacją metra płytkiego i ich wpływ na budynki. Zeszyty Naukowe Politechniki Krakowskiej, Inżynieria Lądowa nr 72, Kraków 2001.
10. Stypuła K.: Drgania wywołane eksploatacją miejskiego transportu szynowego – badania i zapobieganie. Transport Miejski i Regionalny nr 10/2006.