

**XXIV**XXIV Konferencja Naukowo-Techniczna
Szczecin-Międzyzdroje, 26-29 maja 2009**awarie budowlane**Prof. dr hab. inż. JANUSZ KAWECKI, *jkawec@pk.edu.pl*Dr hab. inż. KRZYSZTOF STYPUŁA, prof. PK, *kstypula@usk.pk.edu.pl*

Politechnika Krakowska

Wydział Inżynierii Lądowej

Instytut Mechaniki Budowli

DIAGNOZY A POSTERIORI WPŁYWÓW DRGAŃ DROGOWYCH NA BUDYNKI

DIAGNOSIS A POSTERIORI OF TRAFFIC VIBRATION INFLUENCES ON BUILDINGS

Streszczenie Diagnoza a posteriori odpowiada sytuacji, w której źródło działań dynamicznych wystąpiło w przeszłości, ale obecnie – z różnych powodów – nie jest możliwe jego uruchomienie. Budynek zaś jest uszkodzony i uszkodzenie przypisywane jest działającemu uprzednio źródłu drgań. W pracy podano procedurę diagnostyczną oraz narzędzia badawcze umożliwiające realizację tej procedury. Szczególne miejsce wśród narzędzi badawczych wypełnia baza danych pomiarowych. Przykłady diagnoz a posteriori w odniesieniu do wpływu drgań drogowych i budowlanych na budynki ilustrują praktyczną przydatność opisanej metodyki.

Summary The diagnosis a posteriori concerns such a situation in which the source of dynamic activity was in the past and now its setting in motion is not possible for different reasons. However, building is damaged and its damage is ascribed to the activity of former source of vibration. The diagnosis procedure and research tools for realization of this procedure are given in the paper. Especially it concerns the measurement data base. Usefulness of described methods in practice is illustrated by examples of diagnosis a posteriori with reference to influences of traffic and construction vibrations on buildings.

1. Usytuowanie diagnozy a posteriori w sytuacjach diagnostycznych i projektowych

Przez diagnostykę rozumie się ogół czynności i czynników potrzebnych do postawienia diagnozy. W diagnostyce istotny jest nie tylko opis stanu, ale także – przyczyn jego wystąpienia. Stąd wynika określenie diagnostyki jako skutkowo przyczynowej (por. [1]), w której wyniku udzielana jest odpowiedź na pytanie: „czy występuje związek skutkowo-przyczynowy między stanem technicznym obiektu a wskazanymi oddziaływaniami?”. Jeśli wśród oddziaływań występują wielkości dynamiczne (tzn. dynamicznie zmienne w czasie), to diagnostyka taka jest określana jako dynamiczna. Ograniczając dalsze rozważania do diagnostyki dynamicznej można wyróżnić dwa główne elementy, których powiązanie jest badane w diagnozie. Są nimi: źródło i odbiornik drgań. W zależności od stanu źródła i odbiornika drgań (użytkowany/projektowany) definiuje się kilka sytuacji diagnostycznych i projektowych, które za [2] zestawiono tu w tablicy 1.

Tablica 1. Sytuacje diagnostyczne i projektowe (za[2])

Oznaczenie sytuacji	Stan		Określenie sytuacji
	źródła drgań	obiektu odbierającego drgania	
A	eksploatowane	zrealizowany	diagnoza
B	projektowane	zrealizowany	diagnoza z prognozą
C	eksploatowane	projektowany	projektowanie
D	projektowane	projektowany	projektowanie z prognozą
E	wystąpiło uprzednio (nie jest możliwe działanie ponowne)	zrealizowany (obecnie w stanie uszkodzenia)	diagnoza z prognozą (a posteriori)

Niniejsze opracowanie dotyczy sytuacji diagnostycznej oznaczonej jako „E”. W tej sytuacji diagnoza odnosi się do konstrukcji uszkodzonej, której uszkodzenie przypisywane jest źródłu drgań występującemu w przeszłości i to takiemu, którego działanie nie jest już możliwe w czasie wykonywania diagnozy. Dobrym przykładem może być diagnoza budynku znajdującego się w pobliżu budowli, którą usuwano za pomocą materiału wybuchowego. Użytkownik budynku widoczne uszkodzenia przypisuje działaniom dynamicznym podczas wyburzania. Nie można tu jednak przeprowadzić pomiarów dynamicznych w celu uzyskania informacji o wartościach parametrów drgań budynku wywołanych wyburzeniem obiektu, które można byłoby zastosować w kryterium diagnostycznym.

Warto tu również zaznaczyć, iż diagnozy a posteriori opracowywane są często w sprawach objętych postanowieniami arbitrażowymi i sądowymi. Od zastosowania przez ekspertów i biegłych odpowiednich metod i narzędzi diagnostycznych zależy uzyskanie wiarygodnych wyników diagnozy oraz przyjęcie zgodnych ze stanem rzeczywistym postanowień arbitrażowych i sądowych.

2. Ogólny opis procedury diagnostycznej w sytuacji diagnozy a posteriori

W ogólnym schemacie procedury diagnostycznej odnoszącej się do zagadnień objętych zakresem niniejszej pracy można wyróżnić kilka zasadniczych etapów, które – zachowując pewien poziom ogólności – można zestawić w następującej kolejności (por. [3]):

- zebranie danych o źródle drgań, które wystąpiło w przeszłości i którego oddziaływanie na budynek odbierający drgania rozważa się w diagnozie,
- zebranie danych o drodze propagacji drgań od źródła do budynku odbierającego drgania,
- zebranie danych o budynku odbierającym drgania i jego stanie technicznym (w tym: o stwierdzonych uszkodzeniach, zarysowaniach itp.),
- przyjęcie kryterium oceny wpływu drgań na budynek,
- wyznaczenie parametrów opisujących reakcję budynku odbierającego drgania,
- ocenienie wpływu drgań na budynek z uwzględnieniem przyjętego kryterium,
- porównanie wyników oceny ze stanem obiektu odbierającego drgania,
- sformułowanie odpowiedzi na pytanie: „Czy występuje związek skutkowo przyczynowy między działaniem źródła drgań a stanem budynku narażonego na drgania?”

W opisywanej tu sytuacji diagnostycznej nie jest możliwe bezpośrednie wyznaczenie na podstawie badań doświadczalnych parametrów opisujących reakcję budynku na występujące w przeszłości źródło drgań.

Konieczne więc staje się sięgnięcie po inne narzędzia stosowane w procedurach diagnostycznych. W tym zakresie możliwe jest zastosowanie opisów analitycznych, które powstają na podstawie wielu badań doświadczalnych odnoszących się do analizowanego rodzaju źródła drgań oraz warunków ich propagacji i odbioru przez budynki. Jeśli jednak źródłem drgań przekazywanych z podłoża na budynki są przejazdy pojazdów po drodze kołowej, to takich praktycznie przydatnych ujęć analitycznych jeszcze nie opracowano. Były podejmowane próby opracowania modelowych spektrów odpowiedzi (por. [4]) z wykorzystaniem sztucznych sieci neuronowych, ale rozważany zakres zmiany wartości parametrów charakteryzujących źródło drgań był zbyt wąski, aby można było na tej podstawie zbudować model ogólny. Przed kilku laty autorzy niniejszego opracowania rozpoczęli kształtowanie baz danych pomiarowych w odniesieniu do różnych rodzajów wpływów komunikacyjnych.

3. Baza danych pomiarowych

Podczas wykonywania diagnoz odpowiadających sytuacji A oraz pomiarów związanych z pozyskaniem informacji o parametrach charakteryzujących drgania podłoża w miejscu posadowienia projektowanej budowli (sytuacja C) pozyskuje się dane, które po odpowiednim opracowaniu mogą tworzyć bazę danych pomiarowych. Z bazy tej korzysta się zarówno przy wykonywaniu diagnoz w sytuacjach B i E oraz przy projektowaniu nowych obiektów w sytuacji D.

Bazę danych pomiarowych konstruuje się oddzielnie w odniesieniu do każdego rodzaju działań parasejsmicznych. W przypadku drgań pochodzenia komunikacyjnego (transport kołowy albo szynowy, powierzchniowy albo podziemny) albo wywołanych robotami drogowymi ze względu na brak ujęć modelowych szczególnie przydatne są informacje zebrane w bazach danych pomiarowych.

Elementy każdej z takich baz danych są szczegółowo opisywane w odniesieniu do źródła drgań, drogi ich propagacji oraz obiektu odbierającego drgania. Każdy element bazy danych powinien zawierać szczegółowo scharakteryzowane sytuacje pozyskania wibrogramów w nim pomieszczonych. Wszystkie te informacje umożliwiają – po odpowiednim ich opracowaniu – przyjęcie wibrogramów w odniesieniu do konkretnego obiektu rozważanego w diagnozie a posteriori (sytuacja E).

Dobrym przykładem odpowiednio ukształtowanej bazy danych pomiarowych, w wielu przypadkach już wykorzystywanej w projektowaniu i w diagnozach różnego typu, jest znajdująca się w dyspozycji Instytutu Mechaniki Budowli Politechniki Krakowskiej baza danych o drganiach generowanych przejazdami metra eksploatowanego w Warszawie (por. [5]). Zawiera ona wibrogramy drgań zarówno w miejscu ich generowania (szyna, ściana tunelu) jak i w miejscach odbioru tych drgań przez budynki w różnych odległościach od tunelu i w różnych warunkach ich propagacji między tunelem a budynkiem. Na podstawie danych zebranych w tej bazie można nie tylko wyznaczyć prognozowane wibrogramy wymuszenia drgań budynków istniejących już w sąsiedztwie projektowanej linii metra (sytuacja B), ale również drgań budynków projektowanych w sąsiedztwie istniejącej (sytuacja C) i projektowanej (sytuacja D) linii metra.

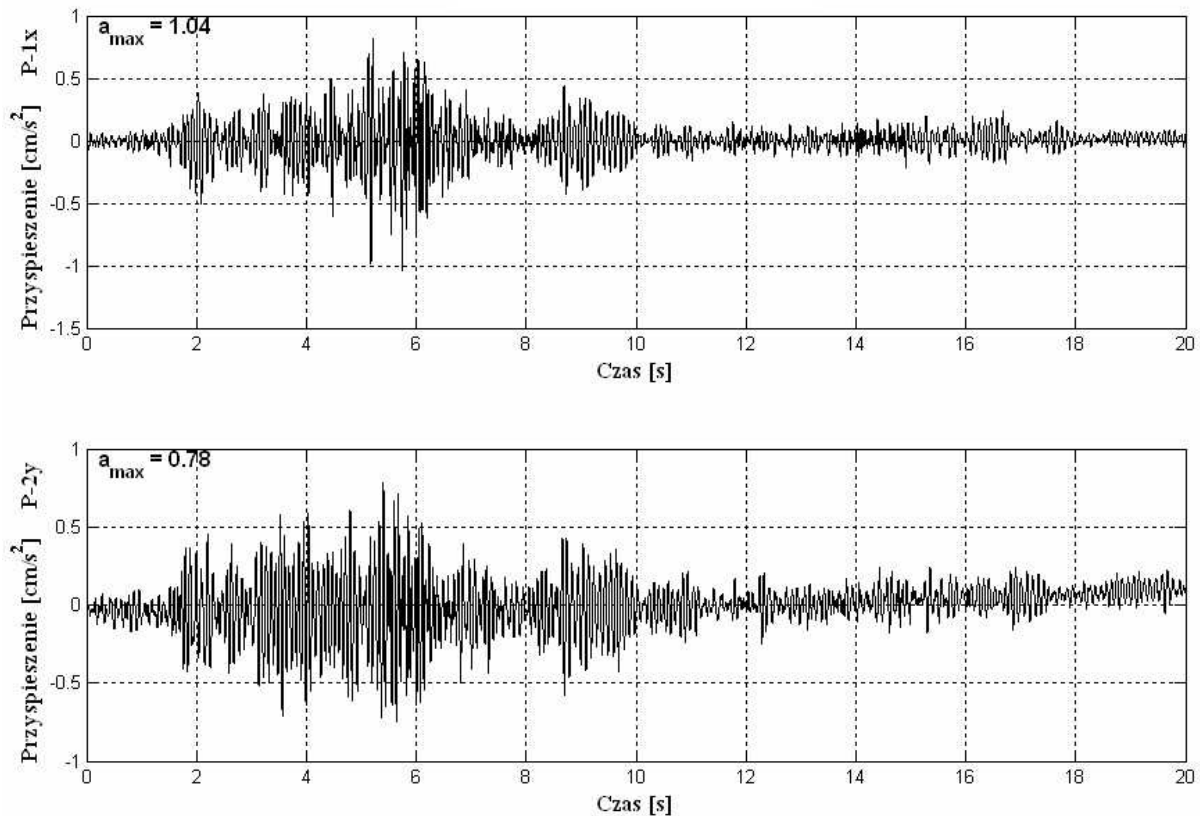
W niniejszej pracy przedstawiono przykłady diagnoz a posteriori, które można było wiarygodnie wykonać i uzasadnić tylko dlatego, iż dysponowano stosunkowo obszerną bazą danych pomiarowych dotyczącą wpływów komunikacyjnych wywołanych przejazdami pojazdów kołowych oraz pracami drogowymi z zastosowaniem maszyn wibracyjnych. W ostatnim okresie baza ta została znacząco uzupełniona wynikami pomiarów wykonanych w ramach realizacji Projektu Rozwojowego Nr PB 0596/R/2/TO2/07/02.

4. Przykłady diagnoz a posteriori

Przykład 1

Budynek mieszkalny, piętrowy, podpiwniczony został zbudowany na rzucie prostokąta o wymiarach 10x12 m. Ściany budynku wykonano z cegły, stropy zaś – jako płytowe, żelbetowe. Na ścianach zewnętrznych budynku występują pęknięcia tynku z miejscowym jego odpadnięciem. Właściciel budynku uważał, że te uszkodzenia są efektem przejazdów ciężkich samochodów (TIRy) po drodze przebiegającej w odległości 14 m od najbliższej ściany budynku.

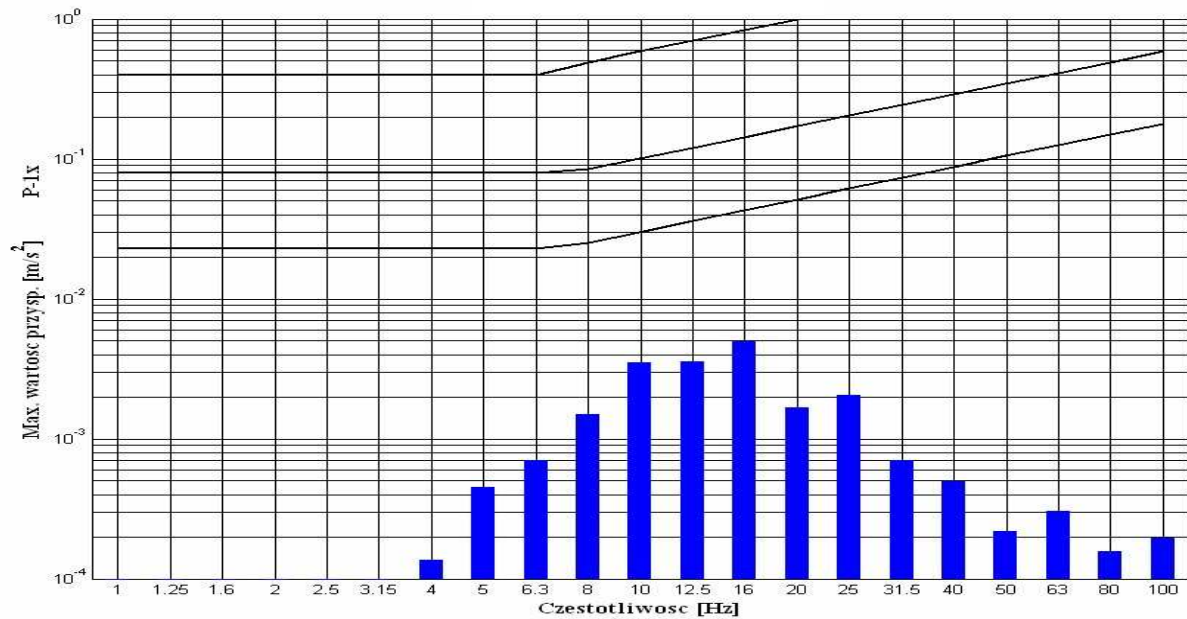
W okresie, gdy dla potrzeb sądu należało ocenić, czy występuje związek skutkowo-przyczynowy między stanem technicznym budynku a źródłem drgań, to źródło już nie występowało. Nie tylko bowiem ruch ciężkich pojazdów został wycofany z tej drogi, ale również jej stan techniczny uległ znaczącej zmianie. Naprawiono konstrukcję drogi i położono nową nawierzchnię. Diagnostyka więc, którą należało wykonać była diagnozą a posteriori. Z bazy danych pomiarowych zawierającej wibrogramy drgań poziomych fundamentów budynków wybrano takie, które najlepiej opisywały sytuację analizowanego budynku podczas wcześniejszej eksploatacji drogi. Jeden z nich podano na rys. 1.



Rys. 1. Przykładowe wibrogramy drgań poziomych przyjęte z bazy danych pomiarowych i uwzględnione w analizie wpływów komunikacyjnych na budynek

Wibrogramy te poddano analizie zgodnie z procedurą opisaną w normie [6]. Przykładowy wynik analizy podano na rys. 2. Na rys. 2 naniesiono również linie rozgraniczające strefy wpływów dynamicznych wg skali SWD II opisanej w normie [6]. Obiekt objęty diagnozą spełnia warunki włączenia go do budynków, do których może być zastosowane kryterium diagnostyczne opisane skalą SWD II.

Z rys. 2 wynika, że maksymalne wartości przyspieszeń drgań sytuują się we wszystkich pasmach częstotliwości poniżej pierwszej linii rozgraniczającej najniższe strefy wpływu. Takie drgania kwalifikuje się jako nieodczuwalne przez budynek.



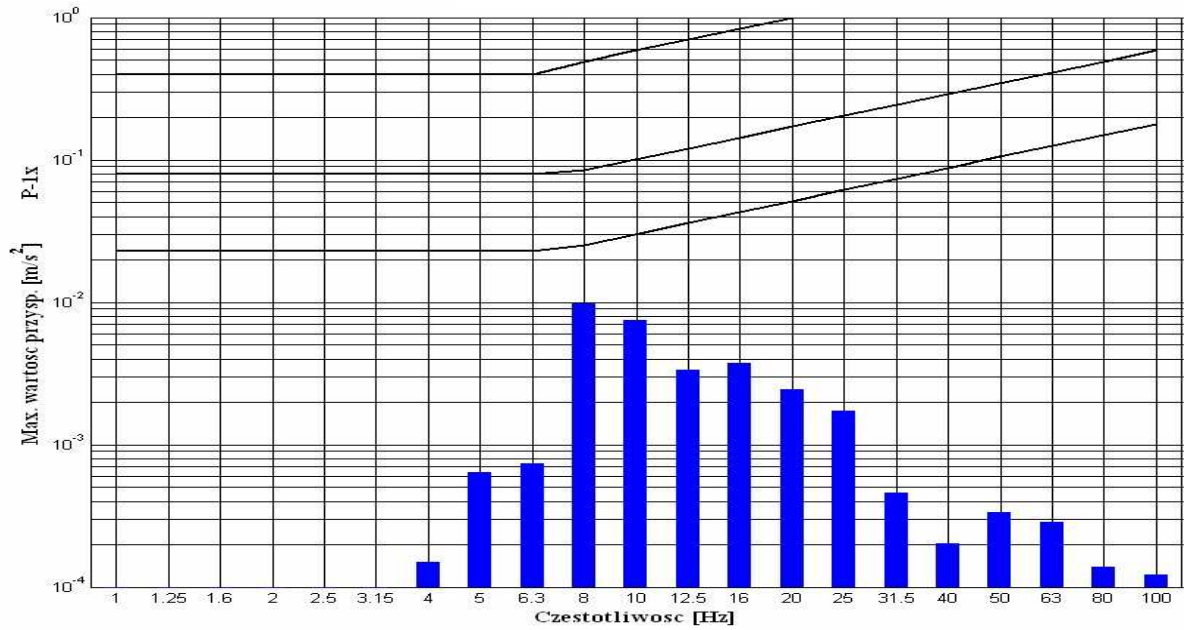
Rys. 2. Wynik analizy wibrogramu z rys. 1 pod kątem jego wykorzystania w ocenie diagnostycznej wpływu drgań na budynek za pomocą skali SWD II

Pełniejsza analiza opisów wibrogramów uwzględnianych w diagnozie (przyjętych z bazy danych pomiarowych) wykazała, że odpowiadały one przejazdom po nawierzchniach, których stopień uszkodzenia był niewielki (nie występowały dziury o znacznie większych głębokościach, o których przed sądem mówili mieszkańcy budynku i inni świadkowie). W tej sytuacji trzeba było wyniki uzyskane na podstawie wybranych wibrogramów uzupełnić uwzględniając wpływ znacznych uszkodzeń jezdni. Pomocne tu okazały się uogólnienia z obszernych badań przeprowadzonych przez Brytyjskie Drogi Laboratorium Badawcze [7] i opisanych w zakresie przydatnym w tego typu analizach w [8].

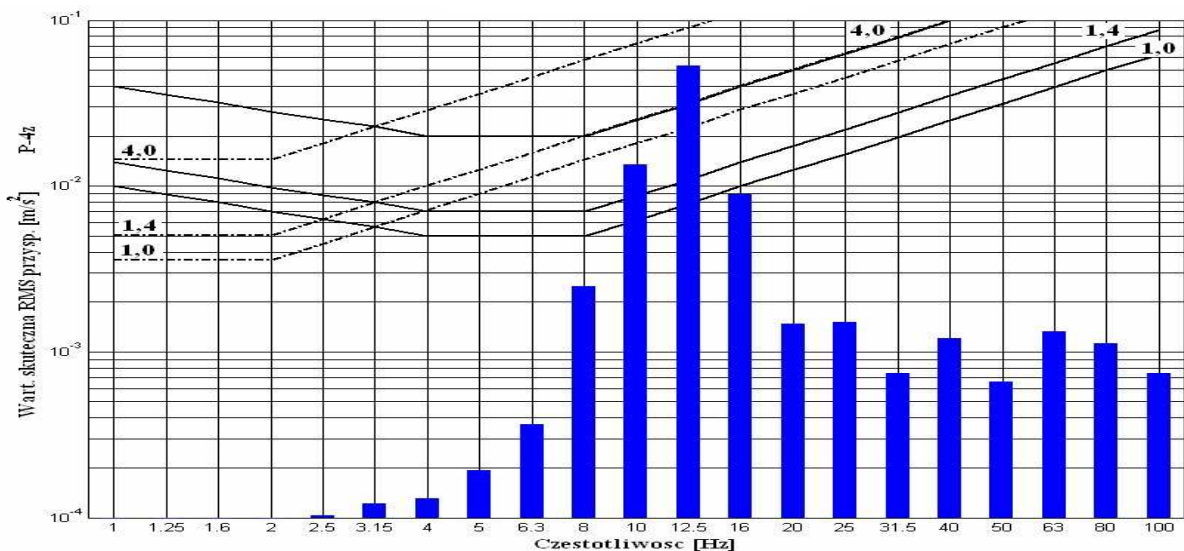
Po przeprowadzeniu odpowiednich obliczeń, uwzględniając wpływ głębokości i rozległości uszkodzenia jezdni na poziom drgań i przesunięcie dominujących częstotliwości w kierunku mniejszych wartości otrzymano wykres podany na rys. 3. Również w tym przypadku maksymalne wartości przyspieszenia drgań poziomych sytuują się w I strefie wpływów (drgania nieodczuwalne przez budynek).

Na tej podstawie uznano, iż opisane wcześniej uszkodzenia budynku nie mogą być uważane jako wywołane wpływami komunikacyjnymi.

Próbowano ponadto wyjaśnić co mogło wpłynąć na wiązanie przez użytkownika budynku uszkodzeń tego obiektu z wpływami komunikacyjnymi. Zbudowano model obliczeniowy budynku (model MES) i analizowano jego wymuszenie kinematyczne opisanymi wibrogramami, uzupełniając zestaw wibrogramów drgań poziomych o odpowiadające drganiom pionowym. Na tej podstawie wyznaczono ruch punktu na stropie parteru budynku (miejsce biernego odbioru drgań przez człowieka). Tak uzyskany wibrogram poddano analizie według zasad opisanych w normie [9]. Wynik tej analizy podano na rys. 4.



Rys. 3. Wynik analizy z rys. 2 po korekcie uwzględniającej uszkodzenie jezdni



Rys. 4. Wpływ drgań pionowych stropu na ludzi przebywających na parterze budynku

Widać wyraźnie, że drgania te znacząco naruszają warunki niezbędnego komfortu, który powinien być zapewniony ludziom przebywającym w pomieszczeniu na parterze budynku zarówno w dzień (linia ciągła, oznaczona jako „4”) jak i w nocy (linia przerywana, oznaczona jako „1,4”). Tym zapewne można wytłumaczyć przypisywanie przez mieszkańców budynku opisanych uszkodzeń działaniu drgań komunikacyjnych.

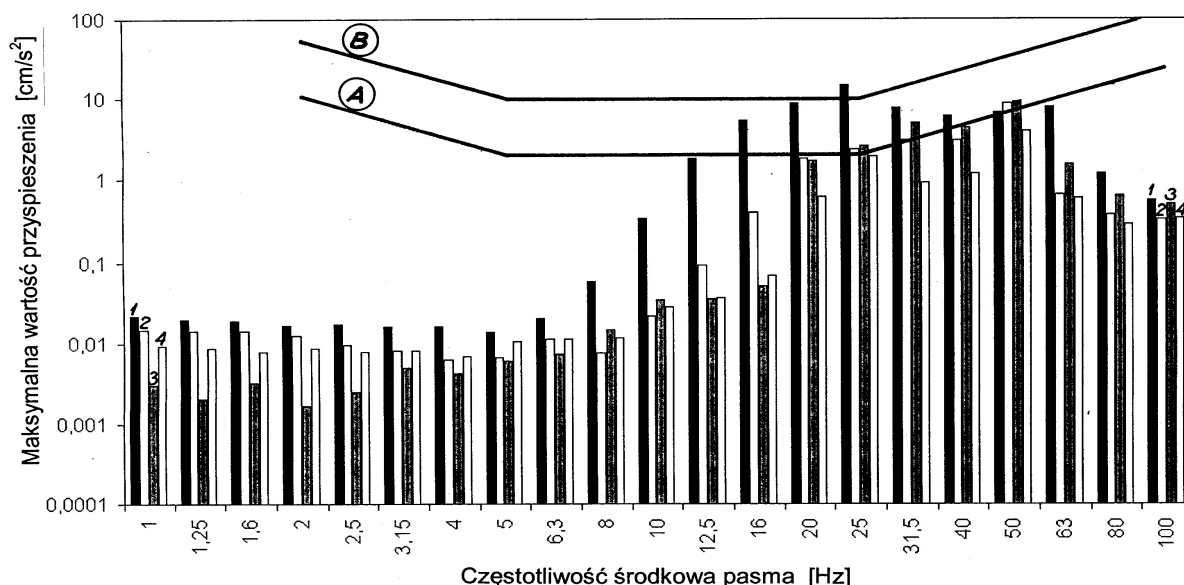
Przykład 2

Budynek murowany, jednokondygnacyjny, podpiwniczony znajduje się w odległości 15 m od jezdni drogi. Droga była uprzednio remontowana i podczas prac budowlanych z użyciem walca wibracyjnego właściciel budynku zgłaszał szkodę w postaci wystąpienia zarysowania tynku, a następnie – zarysowań w murze ściany zewnętrznej. Inwestor oraz wykonawca realizowali jednak prace remontowe według przyjętej technologii. Po wykonaniu remontu wpłynął

pozew właściciela budynku przeciwko inwestorowi drogi i wykonawcy o odszkodowanie za uszkodzenia wywołane remontem drogi.

Pomiar poziomu drgań, jakim poddany był budynek w czasie remontu, nie był już możliwy. Trzeba więc było skorzystać z bazy danych pomiarowych jaką tworzyły wibrogramy zarejestrowane w różnych warunkach pracy drogowych walców wibracyjnych. Początkowo nie można było od wykonawcy uzyskać informacji o typie walca pracującego na budowie i stosowanych wymuszeniach. Przeprowadzono więc obszerną analizę wibrogramów zawartych w bazie danych pomiarowych, które mogły odpowiadać warunkom występującym podczas robót drogowych (odległość od budynku, rodzaj podłoża, typ budynku itp.). Na tej podstawie w każdym paśmie częstotliwości wyznaczono odpowiadającą temu pasmu maksymalną wartość przyspieszenia biorąc pod uwagę kilka typów walców wibracyjnych i w każdym z nich najniekorzystniejszy spośród możliwych do zrealizowania sposób wymuszenia drgań podczas pracy walca.

W ten sposób otrzymano wykres podany na rys. 5, na którym naniesiono również linie rozgraniczające strefy wpływu drgań określone w skali SWD I (tej skali bowiem odpowiada analizowany budynek). Informacje zawarte na rys. 5 dowodzą wyraźnie, iż znacząco na wynik diagnozy wpływa typ walca wibracyjnego oraz zastosowane parametry wymuszania. Praca walca STA VV 1500D przy wymuszeniu typu 4 (amplituda 2 mm i częstotliwości 35Hz) w odległości około 15m od budynku wpływa najbardziej niekorzystnie na konstrukcje budynku (w paśmie 25 Hz poziom drgań osiąga nawet III strefę wpływów w skali SWD I). We wszystkich analizowanych sytuacjach przy częstotliwości 25 Hz poziom drgań sytuuje się na granicy strefy I i II.



Rys. 5. Wyniki analizy odnoszące się do zastosowania różnych walców wibracyjnych przy pracach drogowych w odległości 15 m od budynku. Oznaczenia: 1 – STA VV 1500 D, A = 2mm, f = 35 Hz; 2 – DYN CC 522, A = 0,7mm, f = 51Hz; 3 – DYN CC 322, A = 0,7mm, f = 51 Hz; 4 – STA VH 300, A = 0,45mm, f = 56 Hz

Przedstawione wyniki diagnozy a posteriori spowodowały, iż wykonawca prac wykazał i udokumentował podczas remontu użycie walca wibracyjnego typu DYN CC 522 o parametrach wymuszenia: A = 0,7 mm i f = 51 Hz. To zaś pozwoliło wywoływane drgania zakwalifikować do II strefy wpływów dynamicznych w skali SWD-I. Oznacza to, że prowadzą one do przyspieszonego zużycia budynku, zarysowania i pęknięcia tynków.

5. Podsumowanie

Przedstawione przykłady dobrze ilustrują realizację diagnozy a posteriori. Jej wykonanie wymaga dysponowania bazą danych pomiarowych, z której można – stosując odpowiednie kryteria doboru – uzyskać wiarygodne parametry drgań wykorzystywane w procedurze diagnostycznej.

Sytuacje diagnostyczne typu E nie są jedynymi, w których mogą być przydatne bazy danych pomiarowych. Ważną rolę odgrywają one przy projektowaniu budynków w otoczeniu tras komunikacyjnych oraz przy bezpiecznym wytyczaniu przebiegu tych tras w istniejącej zabudowie mieszkaniowej.

Opisana tu procedura diagnostyczna odnosi się do przypadków, w których charakter uszkodzeń konstrukcji wskazuje na możliwość ich związku z analizowanymi działaniami dynamicznymi. Wówczas diagnoza zrealizowana według przedstawionej procedury pozwala na jednoznaczne przypisanie uszkodzeń budowli rozważanym wpływom albo wyeliminowanie występowania związku skutkowo-przyczynowego między uszkodzeniem a analizowanym działaniem dynamicznym.

Występują bowiem przypadki, w których zauważone uszkodzenia konstrukcji mogą być jednoznacznie powiązane (ze względu na ich kształt i miejsce wystąpienia) z innymi przyczynami (por. [1, 2]) i wówczas najpierw powinno się przeprowadzać diagnozę w odniesieniu do tych przyczyn.

Niniejsze opracowanie wykonane zostało w ramach realizacji badawczego Projektu Rozwojowego Nr PB 0596/R/2/TO2/07/02.

Literatura

1. Ciesielski R.: Diagnostyka dynamiczna w budownictwie, *Przegląd Budowlany*, nr 1/1993
2. Kawecki J.: Diagnostyka wpływu drgań komunikacyjnych na budynki i ludzi w budynkach, *Transport Miejski i Regionalny*, nr 11/2006
3. Kawecki J.: Diagnostyka dynamiczna działań parasejsmicznych, *Inżynieria i Budownictwo*, nr 9/2008
4. Kawecki J., Kogut J.P.: Backpropagation modelling of the traffic induced vibration by using response spectra with fuzzy parameters; *Neural Network Engineering Experiences; Proc. of the International Conference EANN'03, Malaga, Spain 2003.*
5. Stypuła K.: Drgania mechaniczne wywołane eksploatacją metra płytkego i ich wpływ na budynki; *Zeszyty Naukowe Politechniki Krakowskiej, seria: Inżynieria Lądowa*, nr 72, Kraków 2001
6. PN-85/B-02170: Ocena szkodliwości drgań przekazywanych przez podłoże na budynki.
7. Leonard D.R., Grainer J.W., Eyre R.: Loads and vibrations caused by eight commercial vehicles with gross weights exceeding 32 tons (32,5 Mg); *Transport and Road Research Laboratory, Laboratory Report 528*, 1974.
8. Ciesielski R., Stypuła K.: Symulacja nierówności nawierzchni drogowych przy badaniach efektów dynamicznych przejazdów; *Zeszyty Naukowo-Techniczne Oddziału Krakowskiego SITK*, nr 43, 1996
9. PN-88/B-02171: Ocena wpływu drgań na ludzi w budynkach.