

JANUSZ KAWECKI, KRZYSZTOF STYPUŁA\*

## BADANIA DORAŻNE I MONITOROWANIE DRGAŃ W DIAGNOSTYCE DYNAMICZNEJ BUDYNKÓW

---

### OCCASIONAL MEASUREMENTS AND VIBRATION MONITORING IN DYNAMIC DIAGNOSIS OF BUILDINGS

---

#### Streszczenie

Coraz częściej budynki poddawane są działaniom dynamicznym nie tylko wywołanym wpływami środowiskowymi (np. porywy wiatru), ale również przekazywanymi na nie przez podłoże. Źródłami takich drgań mogą być prace budowlane prowadzone w pobliżu istniejącego budynku (np. wbijanie pali i ścianek szczelnych, praca walców wibracyjnych i wibromłotów), wpływy komunikacyjne spowodowane przejazdami pojazdów kołowych i szynowych, praca maszyn usytuowanych na własnych fundamentach itp. W niniejszym artykule, nawiązując do metodyki pomiarowo-interpretacyjnej związanej z oceną wpływu drgań na istniejące budynki, zwrócono uwagę na sposoby pozyskiwania wyników badań dynamicznych, które wykorzystuje się w diagnostyce dynamicznej budynków.

*Słowa kluczowe: pomiary dynamiczne, monitorowanie drgań*

#### Abstract

The paper refers to measurement-interpretation method of evaluation of vibration influence on existing buildings and people inside. Methods of gaining results of dynamic investigations for dynamic diagnosis were presented. Examples of application of occasional measurements and dynamic monitoring were given in the paper.

*Keywords: dynamic measurements, monitoring of vibrations*

---

\* Prof. dr hab. inż. Janusz Kawecki, dr hab. inż. Krzysztof Stypuła, prof. PK, Instytut Mechaniki Budowli, Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Krakowska.

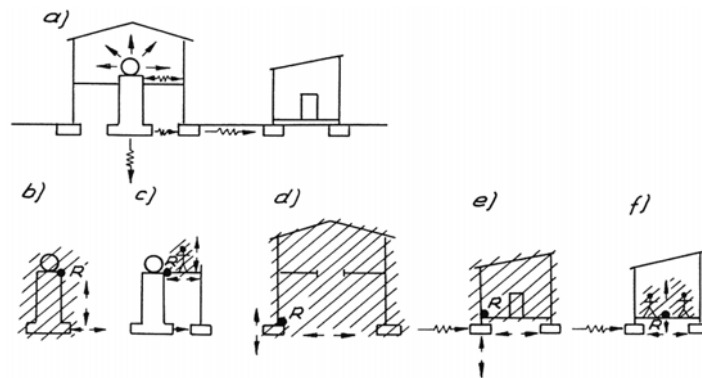
## 1. Wstęp

W diagnostyce wpływu drgań na budowlę wyróżnia się następujące elementy: źródło drgań, drogę propagacji i odbiornik drgań. Informacje o tych elementach umożliwiają przeprowadzenie oceny diagnostycznej wpływu drgań na obiekt je odbierający.

W [7], przedstawiając systemowo problem diagnozy, odniesiono ją do relacji między wejściem (działaniem) oraz wyjściem (reakcją budowli na działanie). W diagnostyce dynamicznej wejście (przynajmniej jedno z działań na budowlę) generuje wystąpienie zmiennych w czasie sił bezwładności obciążających (dodatkowo) rozpatrywaną budowlę. Siły te mogą znacząco uczestniczyć w obciążaniu budowli i wpływać na przemieszczenia oraz na stan naprężeń i odkształceń w elementach konstrukcyjnych budowli.

Najczęściej diagnoza ma charakter skutkowo-przyczynowy. W odniesieniu do budowli powinna odpowiadać na pytanie: czy istnieje związek między zaobserwowanym stanem budowli (np. zarysowaniem, uszkodzeniem) a rozpatrywanymi działaniami na tę budowlę? Jeśli owe działania na budowlę są działaniami dynamicznymi, wówczas opracowanie diagnostyczne jest diagnozą dynamiczną.

Powyżej używano określenia „budowla”, zakładając jednak, że należy je interpretować stosownie do przedmiotu diagnozy. Tak więc podlegać diagnozie mogą nie tylko budowla, ale również urządzenia wrażliwe na drgania albo człowiek odbierający drgania w sposób bierny. Szkic na rysunku 1 (za: [3]) stanowi dobrą ilustrację powyższego stwierdzenia. Diagnostyki mogą dotyczyć: fundamentu pod maszynę (rys. 1b)), ludzi przebywających na pomoście roboczym (rys. 1c)), konstrukcji budynku produkcyjnego (rys. 1d)), konstrukcji budynku mieszkalnego (rys. 1e)) oraz ludzi przebywających w tym budynku i biernie odbierających drgania (rys. 1f)). Odpowiednie kryteria do oceny wpływu drgań na kolejne obiekty podawane są w normach (np. [8–9]).



Rys. 1. Przypadki diagnostyczne odnoszone do różnych obiektów

Fig. 1. Diagnostic cases referred to various objects

## 2. Procedury diagnostyczne

Przy zachowaniu pewnego poziomu ogólności można zestawzić (por. [6]) kolejne kroki w diagnostycznej procedurze dynamicznej budowli.

W tej procedurze wymienia się:

- zebranie danych o budowli,
- zebranie danych o źródłach drgań, których oddziaływanie na budowlę może być znaczące,
- zebranie danych o drodze propagacji drgań ze źródeł budowli,
- przyjęcie kryterium oceny wpływu drgań na budowlę,
- wyznaczenie (doświadczalne albo analityczne) reakcji budowli na dynamiczne działanie źródła drgań,
- ocena wpływu drgań na budowlę wg przyjętego kryterium,
- porównanie wyników oceny ze stanem technicznym budowli, w tym także z charakterem i zakresem uszkodzeń,
- podanie wyniku oceny odnośnie do wystąpienia związku skutkowo-przyczynowego między działaniem źródła drgań a stwierdzonymi uszkodzeniami budowli,
- w przypadku wykazania nadmiernych wpływów dynamicznych zaproponowanie środków technicznych prowadzących do redukcji drgań budowli,
- opracowanie sposobu wykonania niezbędnej naprawy albo wzmocnienia budowli.

Podana wyżej ogólna procedura diagnostyczna ulega modyfikacji w zależności od stanu, w jakim znajduje się źródło drgań (zrealizowane, projektowane).

W przypadku istniejącego źródła drgań (ta sytuacja diagnostyczna przedstawiona została w niniejszym artykule) przeważnie parametry charakteryzujące reakcję budowli na drgania generowane tym źródłem uzyskuje się w wyniku pomiarów dynamicznych. Pomierzone wielkości wykorzystuje się w przyjętym kryterium oceny wpływu drgań na budowlę.

Jeżeli diagnoza dotyczy urządzeń wrażliwych na drgania (por. [3, 6]), to w zbiorze danych znajdują się informacje techniczne o urządzeniu (w tym o dopuszczalnych przez producenta parametrach drgań podstawy urządzenia, nienaruszających jeszcze prawidłowych warunków jego eksploatacji), lokalizacja urządzenia oraz dane o sposobie jego oparcia na konstrukcji wsporczej.

Natomiast jeżeli diagnoza dotyczy ludzi przebywających w budynku (por. [3, 6, 9]), to w zbiorze danych powinno się umieścić informacje o przeznaczeniu pomieszczenia, w którym przebywają ludzie i warunkach odbioru drgań przez człowieka (dzień–noc, w pozycjach leżącej, siedzącej i stojącej).

### 3. Badania dynamiczne w procedurze diagnostycznej

W podanej wcześniej (rozdz. 2) procedurze diagnostycznej występuje człon, który ma znaczący wpływ na wiarygodność wyniku diagnozy. Są to badania dynamiczne. Na podstawie badań dynamicznych uzyskuje się bowiem wyniki, które następnie w sposób bezpośredni albo pośredni są wykorzystywane w kryterium diagnostycznym.

Niniejszy artykuł odnosi się do takich sytuacji diagnostycznych, w których obiekt odbierający drgania został już zrealizowany. Działa również źródło drgań i można, zapewniając odpowiednie warunki jego pracy, uzyskać wartości parametrów najniekorzystniejszych dla odbiornika drgań.

Planując wprowadzenie badań dynamicznych do procedury diagnostycznej, należy określić (por. [6, 7]):

- przedmiot pomiarów (obiekt objęty pomiarami i mierzone wielkości fizyczne),
- działania dynamiczne występujące podczas pomiarów oraz warunki uzyskania możliwego najniekorzystniejszego oddziaływania drgań na budynek,
- program pomiarów (usytuowanie punktów pomiarowych, sytuacje pomiarowe, aparatura do pomiaru, rejestracji i analizy mierzonych wielkości).

W planowaniu badań doświadczalnych, a w szczególności przy doborze wielkości mierzonych należy uwzględnić przyjęte w diagnozie kryterium diagnostyczne (por. [3]).

W zależności od stabilności źródła drgań stosowany jest odpowiedni typ badań dynamicznych. Można bowiem parametry drgań uwzględniane w kryterium diagnostycznym uzyskiwać w wyniku badań doraźnych albo systematycznych. Jeśli bowiem źródło drgań generuje działania stabilne (np. maszyna obrotowa usytuowana na własnym fundamencie w sąsiedztwie budynku), to parametry do oceny diagnostycznej można uzyskać, przeprowadzając badania doraźne. Podczas takich badań otrzymuje się – w kilku seriach pomiarowych – parametry drgań generowane przez źródła drgań w ustalonych warunkach (por. [3, 5, 7]).

Występują jednak takie sytuacje, w których na pracę źródła drgań ma wpływ wiele czynników i na początku nie wiadomo, przy jakiej kombinacji ich pojawienia się oddziaływanie na odbiornik drgań będą najniekorzystniejsze. Wówczas konieczne jest zbieranie przez dłuższy czas odpowiednich informacji o parametrach drgań budynku. Dopiero po ich opracowaniu można określić wartości parametrów, które należy uwzględnić w diagnozie. Wówczas przeprowadza się badania systematyczne, instalując aparaturę pomiarową na obiekcie w wybranych punktach pomiarowych i rejestrując automatycznie zmiany parametrów drgań w powiązaniu z charakterystyką źródła tych drgań.

Pewną specyficzną formą badań systematycznych jest wykorzystanie układu pomiarowego do monitorowania drgań obiektu w celu stałego oceniania wpływów dynamicznych w nawiązaniu do kryterium diagnostycznego. Wzrost poziomu drgań wykryty podczas monitorowania może być powiązany ze stanem źródła drgań. Na podstawie identyfikacji źródła drgań może ono zostać wyłączone z eksploatacji i poddane remontowi. Odpowiednio wcześnie wyłączenie takiego źródła drgań chroni odbiornik drgań przed nadmiernymi oddziaływaniami dynamicznymi.

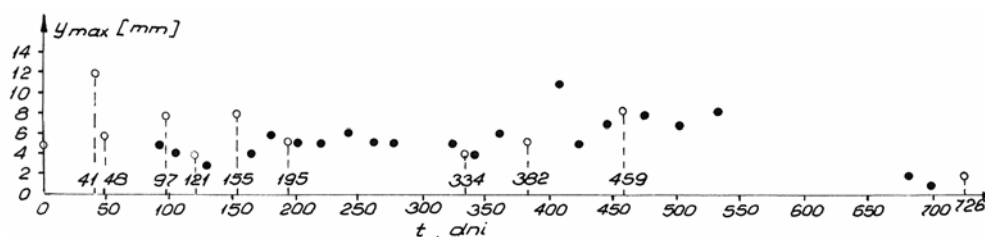
Bywają również takie sytuacje diagnostyczne, w których stosuje się zarówno badania doraźne, jak i systematyczne w odniesieniu do tego samego odbiornika drgań. W badaniach doraźnych korzysta się wówczas z dokładniejszej aparatury pomiarowej. W badaniach systematycznych zastosowana aparatura pozwala na ogólną ocenę parametrów drgań. Badania doraźne przeprowadzane są wtedy rzadziej i służą do zweryfikowania wyników badań systematycznych oraz pełniejszego opisanie mierzonych parametrów drgań.

#### 4. Przykłady zastosowania w diagnostyce wyników badań dynamicznych

##### 4.1. Łączne wykorzystanie badań doraźnych i systematycznych

Użytkownik klatki zgniatacza używanej w produkcji walcowania stwierdził wzrost drgań tej klatki podczas walcowania. Wykonano badania dynamiczne doraźne, przegląd stanu technicznego obiektu i stwierdzono, że należy przeprowadzić remont obiektu. Wiązało się to z dłuższym okresem postoju (por. [1]). Ze względu na brak możliwości nagłego przerwania produkcji postanowiono wykonać krótki bieżący remont i nadal eksploatować

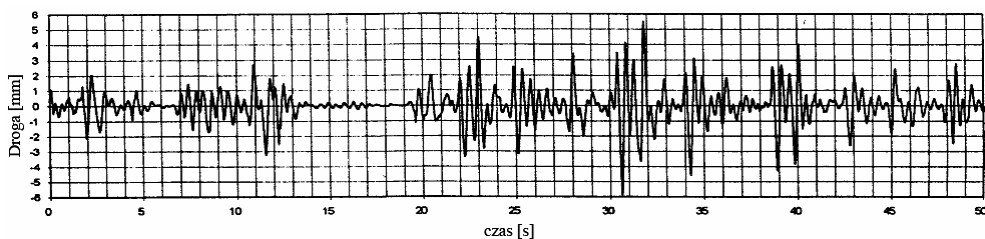
urządzenie, poddając je stałej obserwacji pomiarowej. W tym celu na koronie klatki zgniatacza ustalizowano punkty pomiarowe. Tam umieszczano czujniki podczas badań doraźnych. W tych samych miejscach wykonywano codzienny geodezyjny pomiar maksymalnych amplitud przemieszczeń. Na rysunku 2 zaznaczono w odniesieniu do poszczególnych dni maksymalne amplitudy drgań klatki uzyskane w badaniach doraźnych i systematycznych.



Rys. 2. Maksymalne amplitudy przemieszczeń drgań klatki zgniatacza uzyskane z pomiarów doraźnych i systematycznych

Fig. 2. Maximal amplitudes of vibration displacement of slab-mill box obtained in occasional and systematic measurements

Wyniki pomiarów doraźnych zawierały znacznie więcej informacji. Uzyskiwano w nich nie tylko wykresy zmiany w czasie przemieszczeń klatki (rys. 3), ale również strukturę częstotliwościową zarejestrowanych drgań (rys. 4).



Rys. 3. Wibrogram zarejestrowany podczas procesu zgniatania

Fig. 3. Vibrogramme recorded during milling

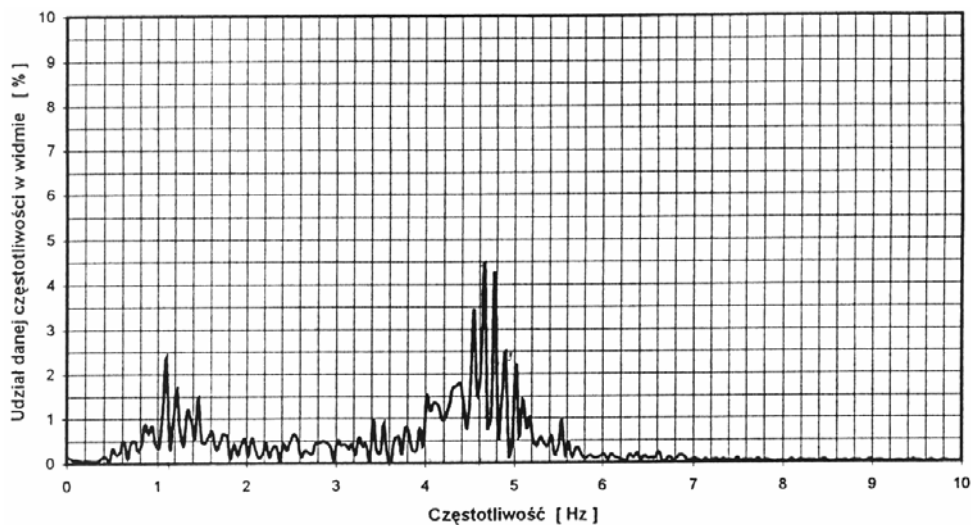
Remont klatki zgniatacza doprowadził do zmniejszenia jej drgań podczas procesu zgniatania. Miał on również wpływ na zwężenie pasma dominujących częstotliwości drgań, co można było sprawdzić, analizując wyniki badań doraźnych (por. rys. 4 i 5).

#### 4.2. Monitoring obiektu zabytkowego poddanego działaniom dynamicznym

Często w sąsiedztwie obiektów zabytkowych pojawiają się nowe źródła drgań, które mogą niekorzystnie wpływać na te obiekty (por. [2, 3]).

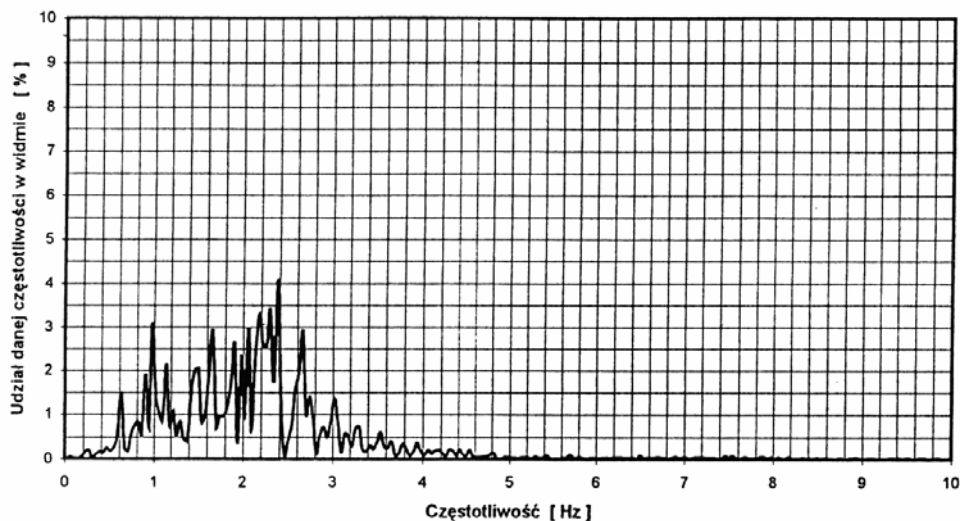
W pobliżu kopalni odkrywkowej znajdował się obiekt zabytkowy. Roboty strzałowe prowadzone w kopalni generowały drgania przekazywane przez podłoże na obiekty budowlane znajdujące się w sąsiedztwie, w tym również na zabytkowy kościół. W związku

z przesuwaniem się frontu robót w kierunku kościoła oraz stosowaniem różnych technologii strzelania konieczne było monitorowanie drgań kościoła generowanych eksploatacją kopalni. Rejestracja i analiza wyników monitoringu umożliwiła odpowiednio wczesną (przed wystąpieniem uszkodzeń) reakcję i zmianę technologii strzelania na mniej wydajną, a nawet zatrzymanie dalszego przesuwania frontu robót strzałowych w kierunku kościoła.



Rys. 4. Struktura częstotliwościowa drgań klatki zgniatacza przed remontem

Fig. 4. Frequency spectrum of slab-mill box before renovation



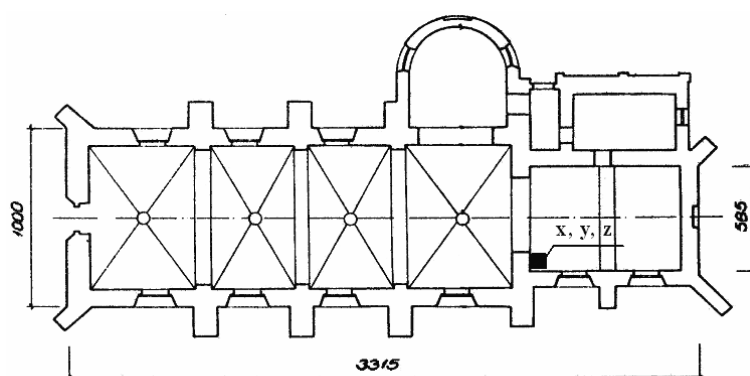
Rys. 5. Struktura częstotliwościowa drgań klatki zgniatacza po remoncie

Fig. 5. Frequency spectrum of slab-mill box after renovation



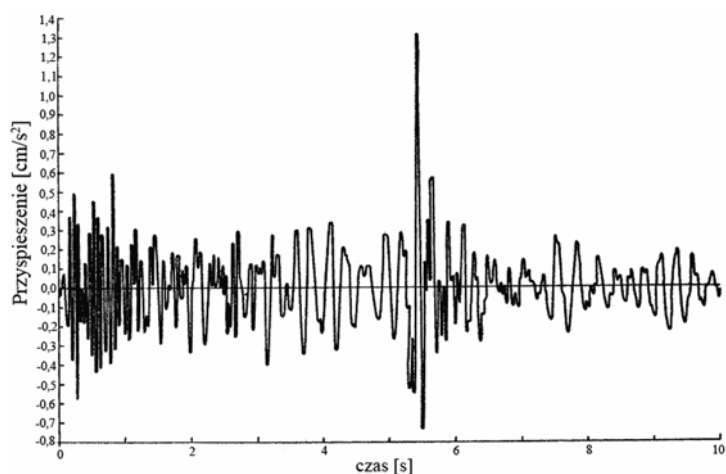
Na rysunku 6 podano usytuowanie punktów pomiarowych, w których monitorowano drgania konstrukcji. Jednym z istotnych problemów, które należało rozwiązać przy wdrożeniu monitorowania było wydzielenie wpływu na czujniki pomiarowe innych (poza robotami strzałowymi), lokalnych źródeł drgań. W początkowej fazie urządzenia rejestrujące włączały się pod wpływem działań mechanicznych oraz akustycznych (trzaśnięcie drzwi, gra organów).

Przykładową rejestrację drgań zarejestrowanych w punkcie pomiarowym przy ścianie prezbiterium podano na rys. 7. Drgania wywołane były robotami strzałowymi w odległości ok. 2,2 km.



Rys. 6. Szkic kościoła z usytuowaniem punktów pomiarowych

Fig. 6. Scheme of church with location of measurement points



Rys. 7. Wibrogram drgań wywołanych robotami strzałowymi

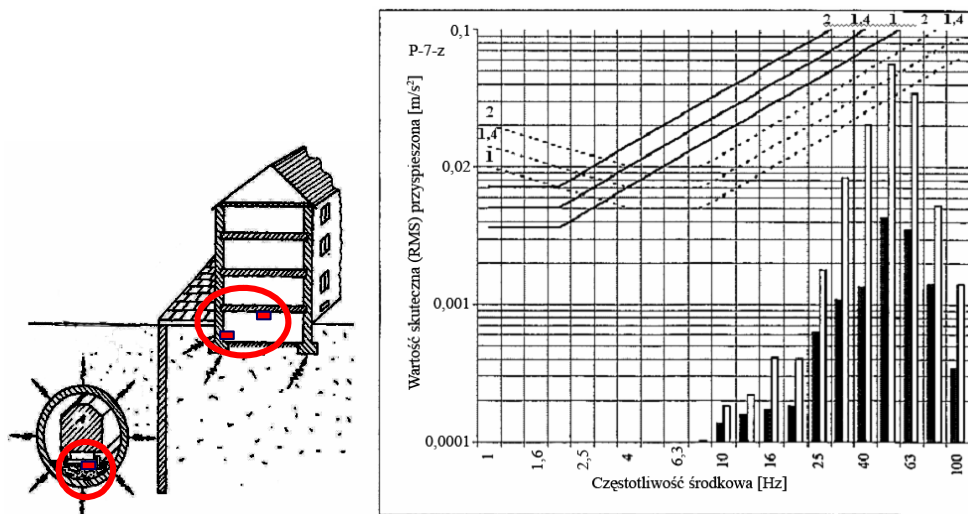
Fig. 7. Vibrogramme of vibrations caused by mining blasts

#### 4.3. Monitorowanie drgań budynku wywołanych przejazdami wagonów metra

Przejazdy wagonów metra w tunelu generują drgania otaczającego podłoża, które przekazywane są na budynki zlokalizowane w pobliżu (por. [4, 10]). Po pewnym czasie eksploatacji metra zauważono, że wzrasta poziom drgań w budynkach znajdujących się w pobliżu tunelu. Mieszkańcy tych budynków (w szczególności zajmujący mieszkania w dolnych kondygnacjach) zgłaszali uciążliwość tych drgań. Badania doraźne wykazały, że tylko niektóre z pociągów metra wywoływały negatywną reakcję mieszkańców. W wyniku pomiarów kół tych pociągów stwierdzono występowanie dużych wartości bicia promieniowego. Po remoncie kół i powrocie tych pociągów na trasę zgłoszenia mieszkańców ustąpiły.

Zdecydowano się, korzystając ze wskazań normy [9], zaprojektować układ monitorujący, który umożliwiałby w odpowiednim czasie wskazanie pociągów o zestawach kołowych wymagających remontu i wycofanie ich z eksploatacji. Po remoncie (zmniejszeniu bicia promieniowego) pociągi przywracano do eksploatacji.

Na rysunku 8 przedstawiono schematycznie układ monitorujący. Czujniki umieszczono w tunelu metra (tam generowane są drgania) oraz w budynku. Rejestracja drgań odbywała się automatycznie. Ich analiza obejmowała prezentację wartości RMS mierzonych przyspieszeń w poszczególnych pasmach częstotliwości w celu oceny wpływu drgań na ludzi.



Rys. 8. Usytuowanie punktów pomiarowych oraz wyniki analizy wpływu drgań na ludzi

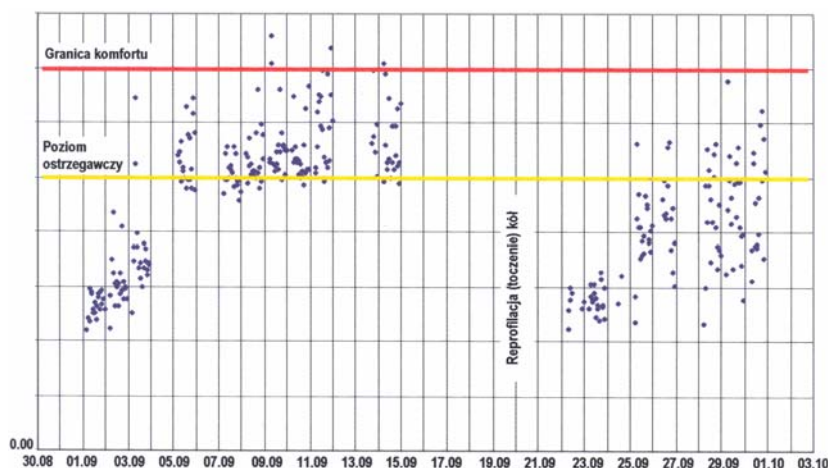
Fig. 8. Measurement points location and results of analysis of vibration influences on people

Przykładowe wyniki analizy podano na rys. 8. Przedstawiono tu – w celach porównawczych – wyniki pomiarów drgań uzyskane podczas przejazdu pociągu, w którym znajdowały się koła o bicia promieniowym 0,009 cm (słupki czarne) oraz o bicia promieniowym 0,12 cm (słupki białe). Analizowano drgania pionowe posadzki I piętra. Widać znaczący wpływ wzrostu wartości bicia promieniowego na poziom drgań.

Na podstawie informacji zebranych podczas monitorowania drgań generowanych przejazdami pociągu „Y” w różnych okresach jego eksploatacji można wskazać, w którym mo-



mentem konieczne jest wyłączenie pociągu z eksploatacji oraz zauważyć, jak znaczący jest wpływ reprofilacji (toczenia) kół na poziom generowanych drgań (rys. 9).



Rys. 9. Rozkład w czasie wyników analizy wpływu drgań na ludzi w przypadku pociągu „Y”

Fig. 9. Results of monitoring of vibration influence on people in case of train "Y"

## 5. Podsumowanie

Bardzo ważnym elementem diagnozy dynamicznej są badania doświadczalne. Tylko wiarygodne badania dynamiczne mogą być zastosowane w diagnostyce. Istnieje wiele sytuacji pomiarowych, w których doraźnie przeprowadzone badania doświadczalne nie dostarczają wystarczających informacji o wartościach parametrów drgań uwzględnianych w diagnozie. Wówczas w procedurę diagnostyczną wprowadza się systematyczne badania doświadczalne (monitorowanie drgań budowli podczas jej eksploatacji). Przykłady przedstawione w rozdz. 4 dobrze ilustrują potrzebę prowadzenia takich badań oraz warunki ich realizacji. Ostatni z przywołanych tu przykładów dobitnie świadczy o występowaniu takich sytuacji pomiarowych, w których monitoring drgań budynku może być wykorzystywany podczas całego okresu eksploatacji źródła drgań w celu odpowiednio wczesnego eliminowania niekorzystnych wpływów. W opisanym przypadku chodziło o zapewnienie ludziom mieszkającym w pobliżu tunelu metra niezbędnego komfortu przebywania w pomieszczeniach mieszkalnych.

## Literatura

- [1] Abratański A., Kawecki J., *Wykorzystanie wyników doraźnych badań dynamicznych w diagnostyce uszkodzonej konstrukcji przemysłowej*, Księga XXI Konferencji „Awaryjne budowlane”, Szczecin–Międzyzdroje 2003, 303-310.

- [2] Ciesielski R., *Nowe możliwości analizy i diagnostyki budowli zabytkowych*, Inżynieria i Budownictwo 9, 1998.
- [3] Ciesielski R., Kawecki J., Maciąg E., *Ocena wpływu wibracji na budowle i ludzi w budynkach (diagnostyka dynamiczna)*, Wyd. ITB, Warszawa 1993.
- [4] Ciesielski R., Kawecki J., Stypuła K., *Prognozowanie wpływów dynamicznych od przyszłej eksploatacji metra na projektowane budynki*, Inżynieria i Budownictwo 1–2, 1994, 38-41.
- [5] Instrukcja ITB nr 348/98, *Diagnostyka dynamiczna i zabezpieczenia istniejących budynków mieszkalnych przed szkodliwym działaniem drgań na właściwości użytkowe budynków*, (R. Ciesielski, J. Kawecki, E. Maciąg), Wyd. ITB, Warszawa 1998.
- [6] Kawecki J., *Perspektywy rozwoju diagnostyki budowli*, Inżynieria i Budownictwo, nr 9, 1998.
- [7] Kawecki J., *Badania dynamiczne w rzeczoznawstwie budowlanym*, Materiały VI Konferencji Naukowo-Technicznej nt. „Problemy Rzeczoznawstwa Budowlanego – Warsztaty Pracy”, Cedzyna 2000.
- [8] PN-85/B-02170 Ocena szkodliwości drgań przekazywanych przez podłoże na budynki.
- [9] PN-88/B-02171 Ocena wpływu drgań na ludzi w budynkach.
- [10] Stypuła K., *Drgania mechaniczne wywołane eksploatacją metra płytkiego i ich wpływ na budynki*, Zeszyty Naukowe Inżynierii Lądowej 72, Politechnika Krakowska, Kraków 2001.