

Alicja KOWALSKA*
Politechnika Krakowska

ZASTOSOWANIE SPECJALNEGO WZBUDNIKA DRGAŃ W BADANIACH WŁASNOŚCI DYNAMICZNYCH NISKIEGO BUDYNKU

Streszczenie. W referacie opisano stosowane w praktyce pomiarowej sposoby wymuszenia drgań różnych typów budynków. Zaproponowano na podstawie badań własnych odpowiednią metodę wzbudzenia przez podłoże harmonicznym drgań budynków niskich o dużej sztywności. Opisano również realizację pomiarów dynamicznych oraz przedstawiono wyniki badań i analizy drgań wybranego budynku.

APPLICATION OF A SPECIAL EXCITER FOR DETERMINING DYNAMIC CHARACTERISTICS OF A LOW BUILDING

Summary. In this paper different types of building excitation, applied in dynamic measurements have been described. Measurements on the real structure have been made. The method of realization of dynamic measurements has been described. Method of harmonic, kinematical excitation of small, stiff buildings has been proposed. Measurement results and vibration analysis of chosen structure have also been shown.

1. Wprowadzenie

Jest wiele powodów przeprowadzania pomiarów dynamicznych obiektów budowlanych w skali naturalnej. Najczęściej jednak pomiary dynamiczne budowli wykonuje się w celu doświadczalnego wyznaczenia jej charakterystyki dynamicznej. Charakterystyka dynamiczna opisuje właściwości dynamiczne budowli wyrażane najczęściej jako zbiór częstotliwości własnych, odpowiadających im postaci drgań własnych oraz informacji o tłumieniu.

Potrzebna liczba wyznaczonych częstotliwości własnych zależy od warunków eksploatacji budowli, a w szczególności przedziału częstotliwości dominujących w realizowanych albo prognozowanych wymuszeniach dynamicznych budowli.

* Opiekun naukowy: Prof. dr hab. inż. Janusz Kawecki

Przeprowadzenie pomiarów charakterystyk dynamicznych budowli w różnych fazach jej realizacji oraz eksploatacji może być pomocne w wykonaniu opracowań diagnostycznych. Pomaga również w ocenie modeli obliczeniowych przyjętych w obliczeniach projektowych.

Już tylko wymienione wyżej wykorzystanie charakterystyki dynamicznej wskazuje na potrzebę pełniejszego rozpoznania możliwości realizacyjnych w tym zakresie. W wielu publikacjach opisywana jest metodologia pomiarowo-interpretacyjna, która prowadzi do doświadczalnego uzyskania informacji o rzeczywistych charakterystykach dynamicznych budowli. Są one najczęściej opracowywane z uwzględnieniem przyjętego sposobu wzbudzenia drgań w czasie pomiarów.

W niniejszej pracy przedstawiona będzie metodyka, w której wymuszenie drgań budowli będzie realizowane za pomocą specjalnego typu wzbudnika. I z tych powodów jest to ujęcie nowe.

2. Wybór sposobu wzbudzenia drgań w zależności od budynku

Każda z metod pomiarowo-interpretacyjnych prowadząca do uzyskania informacji o charakterystyce dynamicznej budowli zależy od zastosowanej wielkości wejściowej. Można wyróżnić dwa rodzaje pomiarów drgań budowli: eksperyment czynny i bierny. Eksperyment czynny polega na wzbudzeniu drgań budowli w sposób kontrolowany przez prowadzącego badania, w przypadku zaś eksperymentu biernego wymuszenie drgań ma charakter losowy, wynikający z działań eksploatacyjnych na budowlę. Najczęściej w eksperymencie czynnym stosuje się jako wymuszenie:

- wibrator generujący drgania o stałej, ale zmiennej częstotliwości,
 - nagłe zwolnienie liny wstępnie napiętej i zamocowanej do budowli oraz do punktu poza budowlą,
 - rytmiczne kołysanie się ludzi na najwyższej kondygnacji,
 - wzbudzenie drgań podłoża pod budowlą za pomocą urządzenia działającego dynamicznie.
- Podczas eksperymentu biernego wykorzystuje się wzbudzenia drgań działaniami w czasie eksploatacji budynku, do których zalicza się, np.:
- słabe porywy wiatru,
 - mikroruchy podłoża pod budowlą,
 - pracę maszyn umieszczonych na budowlu.

Każdy z wymienionych sposobów wzbudzenia drgań ma zalety i wady. Każdorazowo trzeba przeprowadzić pełniejszą analizę sytuacji, aby wybrać najkorzystniejszy z nich. I tak, zastosowanie eksperymentu biernego w przypadku budynków wysokich, wrażliwych na działanie wiatru może prowadzić do uzyskania dobrych rezultatów. Pomiary tego typu przeprowadza się na dużą skalę w Japonii (por.[1]). Eksperyment bierny umożliwił autorom tych badań uzyskanie nie tylko wartości kolejnych częstotliwości własnych, ale także parametrów tłumienia. Zastosowano tam technikę dekrementu losowego (por.[2]).

Z kolei zastosowanie eksperymentu czynnego (w zależności od sposobu wymuszenia) może być ograniczone w stosunku do budynków. I tak np.: wstępny naciąg liny (por.[3]), wzbudnik mechaniczny (por.[4]) ograniczone są wartością uzyskiwanej w pomiarach siły wymuszającej. Wzbudzenie drgań niskich sztywnych budynków wymaga bowiem dużej wartości tej siły. W innej znowu sytuacji dobre rezultaty uzyskiwano stosując jako wzbudzenie drgań rytmiczne kołysanie się ludzi na najwyższej kondygnacji. To wzbudzenie sprawdza się w odniesieniu do budynków wysokich.

Już te powyższe informacje świadczą o tym, iż problemem staje się wzbudzenie drgań, w szczególności budynków niskich o dużej sztywności. Budynki te nie są podatne na działanie wiatru; eksperyment bierny więc nie jest przydatny. Podejmowano próby wymuszenia drgań takich obiektów przez nagłe zwolnienie uprzednio napiętej liny (por.[5]). Problemem utrudniającym zastosowanie tego sposobu wzbudzenia drgań oprócz uzyskania odpowiednio dużej siły naciągu jest zapewnienie praktycznej realizacji zakotwienia liny zarówno do konstrukcji oraz do stałego miejsca poza budynkiem. Można też użyć harmonicznego wzbudnika drgań zamocowanego do stropu.



Rys. 1. Wibrosejs typu Mark III
Fig. 1. Exciter Mark III type

Okazało się, że dobrym, choć kosztownym, sposobem wzbudzenia tego typu budynków jest wykorzystanie urządzenia wibracyjnego działającego na budowlę przez podłoże, na którym jest ona posadowiona. Jednym z tego typu urządzeń jest wibrosejs typu Mark III (por. rys. 1). Drgania podłoża wzbudzane są ruchem płyty wibracyjnej układanej na górnej powierzchni gruntu. Wibrosejs Mark III wzbudza drgania harmoniczne od 7 Hz wzwyż, umożliwia realizację ciągłej zmiany częstotliwości tzw. „sweep” liniowy w zakresie od 7 do 50 Hz. Zastosowanie tego wymuszenia w stosunku do budynków o niższej początkowej częstotliwości drgań własnych nie uwidoczni jej w reakcji budynku.

3. Pomiary dynamiczne z zastosowaniem wibrosejsu

Badania pilotażowe przeprowadzono na budynkach przeznaczonych do rozbiórki (rys. 2). Były to dwukondygnacyjne budynki o wysokości 7,5 m i wymiarach w rzucie: 21,6 x 8,4 m pokazane na rys. 2:

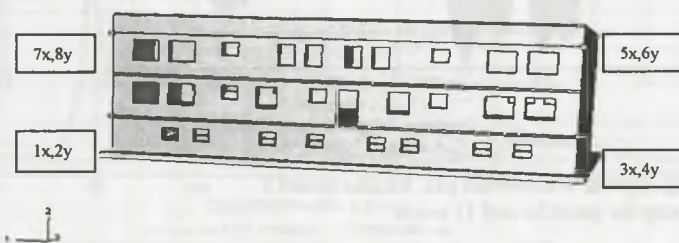


Rys. 2. Widok budynku A
Fig. 2. View of the A building

Konstrukcję nośną stanowią słupy i stropy drewniane. Konstrukcja ścian jest wzmocniona drewnianymi zastrzałami. Schody i stropodach są także wykonane z drewna. Natomiast ściany piwnic są wykonane z cegły pełnej podobnie jak elementy niekonstrukcyjne, którymi są tu wewnętrzne ściany działowe i bloki licznikowe. Warto zauważyć, iż budynek o podobnej konstrukcji w trakcie jego realizacji badał zespół BRE (Building Research Establishment) pod kierownictwem prof. Ellisa [6]. Konstrukcja nośna tego budynku o wysokości 19,5 m była uzupełniona ścianami działowymi kartonowymi (jako elementami drugorzędnymi). W analizach porównawczych uwzględniono 3 częstotliwości drgań własnych z przedziału od 3,6 Hz do 6,2 Hz.

Drgania budynku przedstawionego na rys. 2 wzbudzano za pomocą wibrorejseru typu Mark III. Źródło drgań zostało usytuowane pomiędzy dwoma badanymi budynkami, w odległości ok. 4 m od jednego z nich oraz ok. 10 m od drugiego.

W celu uzyskania informacji o reakcji budynku na zastosowane wymuszenie obrano punkty pomiarowe na ścianie od strony zewnętrznej na wysokości stropu piwnicy i w narożnikach budynku powyżej stropu pierwszego piętra. Rejestrowano drgania poziome w dwóch prostopadłych kierunkach (x, y). Rozmieszczenie punktów pomiarowych na budynku A podano na rys. 3:



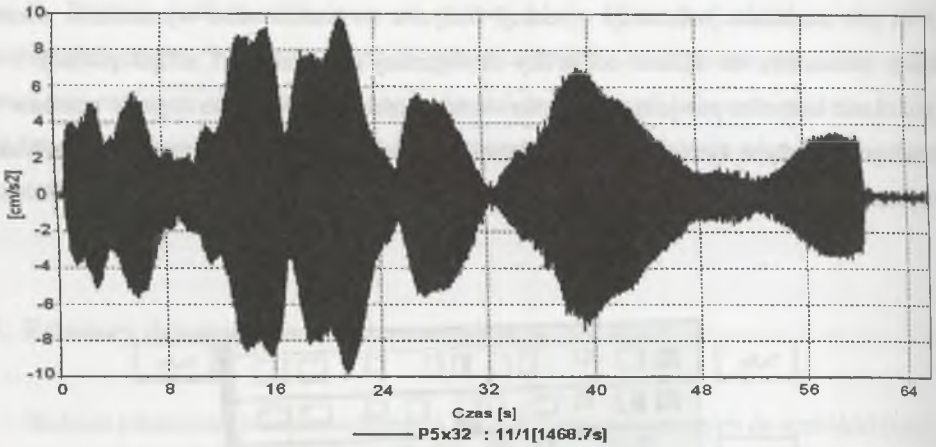
Rys. 3. Rozmieszczenie punktów pomiarowych na budynku A
Fig. 3. Measurements points localization on A building

Wykonano trzy „sweeepy” liniowe w zakresie od 7 do 50 Hz. Trwały one po trzy minuty każdy. Zmieniało moc wibrorejseru (dwa razy 50 % i raz 40 %) oraz dostosowywano nastawy czujników. Reakcję budynków w punktach pomiarowych zarejestrowano i następnie poddano wstępnej analizie. Wyodrębniono częstotliwości dominujące w wibrogramach. W kolejnym etapie pomiarów wykonano „sweeepy” liniowe w przedziałach obejmujących częstotliwości własne, tzn. 8-10 Hz, 14-16 Hz, 19-21 Hz, 24-26 Hz. Te wzbudzenia trwały 30 sekund każdy i wykorzystywano w nich 30 % mocy wibrorejseru. W celu kontroli pomiarów wykonano też dwa sweeepy: jeden liniowy, drugi logarytmiczny w zakresie 7-25 Hz z 30 % mocą wibrorejseru trwające jedną minutę.

4. Wyniki i interpretacja pomiarów dynamicznych

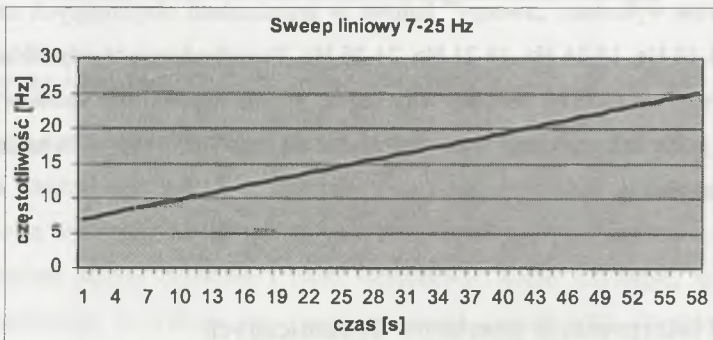
Analizę wyników pomiarów wykonano w programie ESAM, który służył także do rejestracji sygnałów. Analizie podlegał sygnał z 16 punktów pomiarowych uzyskanych podczas 11 zdarzeń. Zastosowano filtr dolnoprzepustowy Butterwortha o częstotliwości

odcienia 30 Hz. Następnie uzyskano przebiegi czasowe we wszystkich punktach i zdarzeniach. Przykładowy przebieg w pkt. 5x i zdarzeniu 11 („sweep” od 7-25 Hz) pokazano na rys.4.



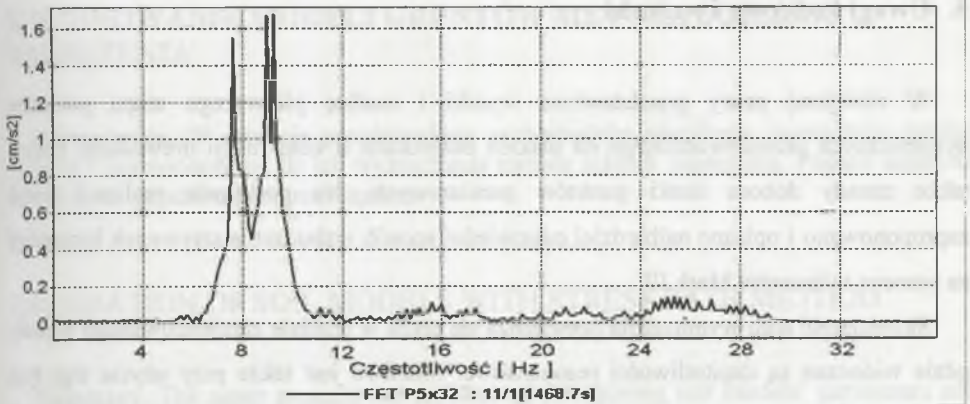
Rys. 4. Przebieg sygnału w czasie dla pkt. 5 i zdarzenia 11
Fig. 4. Time decay for point 5x and 11 event

Na przebiegu tym widoczne jest kilkakrotne wzmocnienie sygnału co świadczy o wystąpieniu kolejnych częstotliwości rezonansowych. Porównując przebieg z wykresem „sweepu” liniowego odpowiadającym temu zdarzeniu (por. rys. 5), można odczytać, jakiej częstotliwości odpowiada dane wzmocnienie sygnału. Można także powiększając odpowiedni fragment przebiegu wyznaczyć okres drgań własnych T i odpowiadającą mu częstotliwość własną.



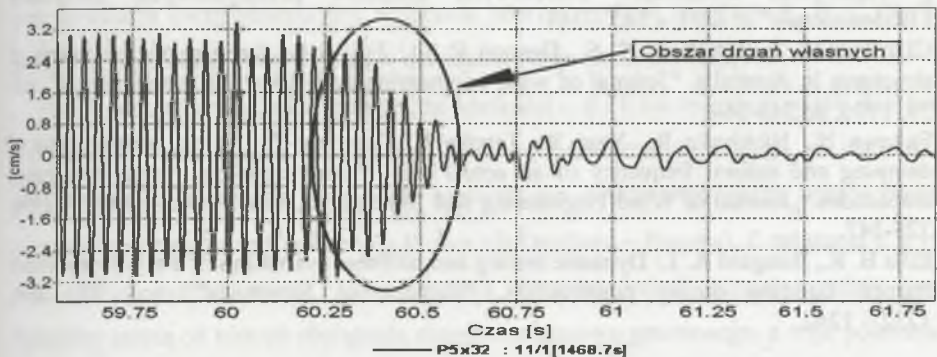
Rys. 5. Wykres „sweapu” liniowego 7-25 Hz
Fig. 5. Linear sweep from 7 to 25 Hz diagram

I tak, w rozważanym punkcie i zdarzeniu częstotliwości początkowe sytuują się blisko siebie i wynoszą: 7,61; 8,99 i 9,24 Hz, natomiast wyższe częstotliwości (widoczne także wyraźnie w „krótkich sweepach”) to: 14,23; 19,1 i 24,09 Hz. Uzupełnieniem powyższej analizy była analiza FFT (szybka transformata Fouriera), odnosząca się do wybranych odcinków wibrogramu. Przykładową analizę FFT pokazano na rys. 6. Potwierdza ona trzy początkowe częstotliwości.



Rys. 6. Analiza FFT dla pkt. 5x i zdarzenia 11
Fig. 6. FFT analysis for point 5x and 11 event

Informacje o tłumieniu z wystarczającą dla praktyki dokładnością można otrzymać z końcowych odcinków przebiegów czasowych (odcinki wygaszania sygnału). Lepszym oszacowaniem tłumienia przy częstotliwości 24,09 Hz jest końcowy odcinek „sweeup” 7-25 Hz (por. rys. 7.) od „sweeup” krótkiego 24-26 Hz. Parametr tłumienia wyrażono w postaci logarytmicznego dekrementu tłumienia δ , czyli jako logarytm naturalny stosunku kolejnych amplitud.



Rys. 7. Końcowy odcinek „sweeup” 7-25 Hz
Fig. 7. The end of 7-25 Hz sweep

Dla częstotliwości 24,09 Hz logarytmiczny dekrement tłumienia wynosi $\delta = 0,25$ (co odpowiada ułamkowi tłumienia krytycznego $D = 4\%$). Jest to wielkość możliwa do zaakceptowania przy tego typu konstrukcji (por. wyniki podane w [6], tłumienie wynosiło tam $D = 2,8 - 3,8\%$ w zależności od częstotliwości).

5. Uwagi końcowe i wnioski

W niniejszej pracy przedstawiono wyniki i analizę pierwszego etapu pomiarów dynamicznych przeprowadzonego na niskich budynkach o konstrukcji drewnianej. Podano także zasady doboru siatki punktów pomiarowych. Na podstawie realizacji badań zaproponowano i opisano najbardziej odpowiedni sposób wzbudzenia sztywnych konstrukcji za pomocą wibrorejseru Mark III.

Skuteczność tego wymuszenia potwierdza się także w analizie zarejestrowanego sygnału, gdzie widoczne są częstotliwości rezonansowe. Możliwe jest także przy użyciu tego typu urządzenia i po wstępnej analizie sygnału uzyskanie informacji o tłumieniu z końcowych odcinków przebiegów czasowych, gdzie drgania wygaszają się.

LITERATURA

1. Tamura Y., Zhang L., Yoshida A., Nakata S., Itoh T. : Ambient vibration test and modal identification of structures by FDD and 2DOF-RD technique. Proceedings of the Structural Engineers World Congress, Yokohama, Japan, October 9-12, 2002, p.8.
2. Jeary A. P.: Damping in structures. "Journal of wind engineering and industrial aerodynamics", vol. 72, 1997, 345-355.
3. Ciesielski R., Oruba R.: Badanie doświadczalne wpływu uszkodzeń na sztywność i właściwości dynamiczne żelbetowych kominów przemysłowych. „Inżynieria i Budownictwo” nr 6/93, s.240 – 243.
4. Glanville M. J., Kwok K. C. S., Denoon R. O.: Full-scale damping measurements of structures in Australia. "Journal of wind engineering and industrial aerodynamics", vol. 59, 1996, pp.349-364.
5. Fukawa N., Nishizaka R., Yagi S., Tanaka K., Tamura Y. : Field measurement of damping and natural frequency of an actual steel-framed building over a wide range amplitudes. „Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics”, vol. 59, 1996, 325-347.
6. Ellis B. R., Bougard A. J.: Dynamic testing and stiffness evaluation of a six-storey timber framed building during construction. "Engineering Structures", vol. 23, 2001, 1232 – 1242.