

Alicja KOWALSKA*
Politechnika Krakowska

METODYKA POMIAROWO-INTERPRETACYJNA WYZNACZANIA PARAMETRÓW TŁUMIENIA KONSTRUKCJI BUDOWLANYCH

Streszczenie. Przedstawiono w ujęciu syntetycznym stosowane metody wyznaczania z parametrów tłumienia konstrukcji budowlanych. Na podstawie ich oceny dokonano wyboru takiej, która będzie stosowana w badaniach doświadczalnych dotyczących wpływu różnych elementów budynku (konstrukcyjnych i drugorzędnych) na zmiany jego charakterystyki dynamicznej.

MEASUREMENT AND INTERPRETATION METHODOLOGY OF DETERMINING DAMPING PARAMETER OF THE BUILDING STRUCTURE

Summary. In this paper a synthesis of methods of determining damping parameter of the building structure have been presented. The best method for the experimental measurement of the influence of individual structural elements on changes in dynamic characteristic of the building has been chosen.

1. Wprowadzenie

Obiekt budowlany pod względem dynamicznym opisuje jego charakterystyka dynamiczna, wyrażana za pomocą zbioru kilku, początkowych częstotliwości drgań własnych, odpowiadających im postaci drgań oraz współczynnika tłumienia. Niniejsza praca dotyczy zagadnień związanych z wyznaczaniem wielkości charakteryzującej tłumienie na podstawie badań doświadczalnych. Najczęściej tłumienie opisywane jest przez podanie wartości logarytmicznego dekrementu tłumienia δ (por. np. [1]) według wzoru:

$$\delta = \ln \frac{A_i}{A_{i+1}} \quad (1)$$

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

gdzie:

A – amplitudy drgań w kolejnych, następujących po sobie cyklach, wyznaczone z wibrogramu drgań tłumionych w wybranym punkcie pomiarowym.

W konstrukcjach o małym tłumieniu (np. stalowe) kolejne amplitudy różnią się nieznacznie. Wartość δ wyznacza się wtedy ze wzoru:

$$\delta = \frac{1}{m} \ln \frac{A_i}{A_{i+m}} \quad (2)$$

Wyniki badań doświadczalnych mogą być przedstawione w postaci krzywej rezonansowej (por. np. [5]). Kształt krzywej rezonansowej w otoczeniu częstotliwości drgań własnych umożliwia wyznaczenie logarytmicznego dekrementu tłumienia drgań zgodnie z poniższą zależnością:

$$\frac{\Delta f_i}{f_i} = \frac{\delta_i}{\pi \sqrt{1 - \left(\frac{\delta_i}{2\pi}\right)^2}} \quad (3)$$

gdzie:

f_i – i -ta częstotliwość drgań własnych, Δf_i – szerokość pasma odpowiadająca połowie mocy.

W literaturze często do opisu właściwości tłumiących stosowany jest również ułamek tłumienia krytycznego D . Zależność pomiędzy ułamkiem tłumienia krytycznego a logarytmicznym dekrementem można wyrazić następującym wzorem:

$$D = \frac{\delta}{\sqrt{4\pi^2 - \delta^2}} \approx \frac{\delta}{2\pi} \quad (4)$$

Tłumienie można również opisać za pomocą macierzy tłumienia $[C]$, wyrażonej jako liniowa kombinacja macierzy sztywności $[K]$ i bezwładności $[M]$ według wzoru:

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K] \quad (5)$$

gdzie:

α i β – współczynniki kombinacji.

Wartości współczynników α i β wyznacza się (por. np. [5]) na podstawie uzyskanych z pomiarów wartości δ (albo D), odpowiadających dwóm różnym częstotliwościom własnym. Jeśli tylko kolejne częstotliwości drgań własnych budowli są rozseparowane, to dysponując wartościami δ_a i δ_b odpowiadającymi częstotliwościom f_a i f_b , można (por. [5]) współczynniki α i β wyznaczyć ze wzorów:

$$\alpha = 2f_a f_b \frac{\delta_a f_b - \delta_b f_a}{f_b^2 - f_a^2} \quad (6)$$

$$\beta = \frac{1}{2\pi^2} \frac{\delta_b f_b - \delta_a f_a}{f_b^2 - f_a^2} \quad (7)$$

Tym samym uzyskane na podstawie pomiarów na rzeczywistym obiekcie współczynniki δ (albo D), charakteryzujące jego właściwości tłumiące mogą posłużyć do opisania macierzy tłumienia występującej w równaniu ruchu:

$$[M]\{\ddot{y}\} + [C]\{\dot{y}\} + [K]\{y\} = \{P\} \quad (8)$$

gdzie:

$\{P\}$ jest wektorem wymuszeń, a $\{y\}$ wektorem odpowiedzi na te wymuszenia.

2. Charakterystyka wybranych metod doświadczalnego wyznaczania parametrów charakteryzujących tłumienie budowli

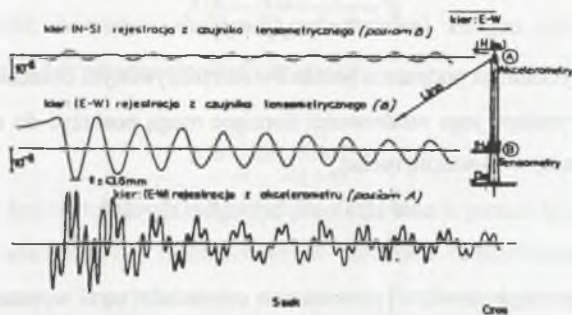
Wartości współczynników charakteryzujących tłumienie budowli można uzyskać w wyniku eksperymentu czynnego albo biernego. Eksperyment czynny polega na wzbudzeniu drgań własnych budowli w sposób kontrolowany.

W efekcie zarówno eksperymentów biernych, jak i czynnych otrzymuje się wibrogramy. Zarejestrowany sygnał jest poddany analizie, w wyniku której otrzymuje się informację o jego strukturze częstotliwościowej. Następnie uzyskuje się wibrogramy odpowiadające kolejnym częstotliwościom drgań. W tym celu można wykorzystać procedurę filtracji. Należy jednakże uwzględnić w niej warunki zapewniające uzyskanie niezniekształconych wibrogramów.

Najczęściej tłumienie charakteryzuje się przez wyznaczenie logarytmicznego dekrementu tłumienia δ z wibrogramu odpowiadającemu danej częstotliwości własnej.

Przykładowe wibrogramy uzyskane podczas badań komina stalowego podano na rysunku 1 za [1]. Rejestrowano przyspieszenie drgań na wierzchołku komina (punkt A) oraz odkształcenie w pobliżu utwierdzenia trzonu (punkt T). Z pomiaru tensometrycznego uzyskano wibrogram z widoczną jedną (podstawową) częstotliwością własną. Bezpośrednio z tego wibrogramu można wyznaczyć wartość δ . W wibrogramie uzyskanym w punkcie A otrzymano drgania złożone z wyraźnie widocznymi, lecz rozseparowanymi częstotliwościami własnymi. W tym przypadku wyznaczenie δ wymaga przedstawienia oddzielnie

wibrogramów odpowiadających tym częstotliwościom. Można tu zastosować odpowiednio metodę filtracji wibrogramu złożonego.



Rys. 1. Przykładowe wyniki pomiarów przeprowadzonych na kominie stalowym
Fig. 1. An example of the measurement results of the steel chimney

Ułamek tłumienia krytycznego D można również wyznaczyć korzystając z wyników uzyskanych podczas eksperymentu biernego (np. działanie porywów wiatru). Podstawą analizy jest wówczas funkcja autokorelacji.

Funkcje autokorelacji $\rho_x^*(\tau)$ i $\rho_y^*(\tau)$ uzyskuje się w wyniku analizy cyfrowej zarejestrowanych wibrogramów. Analiza polega tu na wyznaczeniu estymatorów unormowanych funkcji autokorelacyjnych $\rho_x(\tau)$ i $\rho_y(\tau)$, a następnie na odfiltrowaniu przez filtr wąskopasmowy innych – poza analizowaną – częstotliwością. Uzyskuje się w ten sposób odpowiednie dla danej częstotliwości funkcje autokorelacyjne.

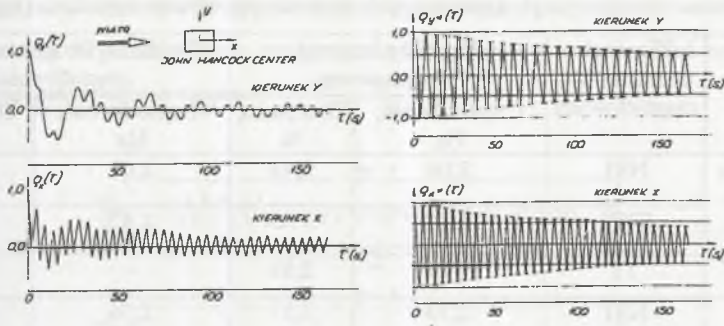
Wartości D (odpowiednio w kierunku x i y) wyznacza się z następujących zależności (por. [6] i rysunek 2):

$$D = \frac{1}{2\pi n} \ln \frac{\rho_{x1}^*}{\rho_{xn}^*} \quad (9a)$$

$$D = \frac{1}{2\pi n} \ln \frac{\rho_{y1}^*}{\rho_{yn}^*} \quad (9b)$$

gdzie: n – liczba cykli branych pod uwagę w tej analizie; ρ_{x1}^* , ρ_{xn}^* , ρ_{y1}^* , ρ_{yn}^* – wartości funkcji, autokorelacji odpowiadające analizowanej częstotliwości.

Na rysunku 2 za [4] przedstawiono przykładowe wykresy estymatorów unormowanych funkcji autokorelacji $\rho_x(\tau)$ i $\rho_y(\tau)$ oraz funkcje autokorelacji $\rho_x^*(\tau)$ i $\rho_y^*(\tau)$, odpowiadające analizowanej częstotliwości drgań własnych.



Rys. 2. Przykładowe unormowane funkcje autokorelacyjne w postaci umożliwiającej wyznaczenie parametru tłumienia drgań

Fig. 2. An example of the normalize autocorrelation function of the first natural frequency

3. Ocena praktycznej przydatności metod wyznaczania charakterystyki tłumienia

W przygotowywanej rozprawie doktorskiej będzie analizowany wpływ elementów konstrukcyjnych i drugorzędnych budynków na zmianę ich charakterystyki dynamicznej. Praca ma charakter doświadczalny. Podstawowe informacje umożliwiające przeprowadzenie niezbędnych analiz będą zebrane w wyniku pomiarów na rzeczywistych budynkach, wykonanych w trakcie ich wznoszenia i w pierwszym okresie eksploatacji. Badania z tego zakresu podejmowali m.in. autorzy [2, 3]. Dotyczyły one tylko bardzo wysokich budynków żelbetowych ze ścianami osłonowymi ze szkła i aluminium oraz budynków o konstrukcji stalowej z podobnymi ścianami osłonowymi. Budynki objęte badaniami w przygotowywanej pracy doktorskiej będą o konstrukcji żelbetowej ze ścianami osłonowymi z pustaków przeszklonych, ściany wewnętrzne zaś będą murowane. Celem pracy będzie zbadanie wpływu tych włączanych podczas budowy elementów drugorzędnych na charakterystykę dynamiczną, a w szczególności na właściwości tłumienia drgań.

W [3] podano wyniki badania właściwości tłumiących budynku uzyskane dwoma różnymi metodami: z krzywej rezonansowej i z wibrogramów. Wyniki badań uzyskane w trakcie realizacji budynku o konstrukcji nośnej stalowej (wysokość 19,5 m, wymiary w rzucie 25 x 13 m) zestawiono za [3] w tabeli 1.

Tabela 1

Porównanie charakterystyk dynamicznych otrzymanych dwoma metodami (wg [5])

Etap realizacji	Kierunek podstawowej częstotliwości	Wyniki z krzywej rezonansowej		Wyniki z wibrogramu o danej częstotliwości	
		Częstotliwość, Hz	Tłumienie, %	Częstotliwość, Hz	Tłumienie, %
Konstrukcja nośna, zew. ściany, konstrukcja dachu	NS1	2,00	2,44	2,01	2,12
	EW1	2,49	3,06	2,47	2,69
	T1	3,23	2,83	-	-
Ułożono dachówki na dachu	NS1	2,70	3,21	2,76	3,19
	EW1	2,84	2,74	2,87	2,29
	T1	3,46	2,58	-	-
Wykonano wszystkie roboty murarskie	NS1	4,71	3,30	4,84	3,17
	EW1	3,57	2,78	3,61	2,58
	T1	5,88	3,86	-	-

Już z porównania wielkości charakteryzujących właściwości dynamiczne budynku w poszczególnych etapach realizacji widoczne są wyraźne zmiany ich wartości. Oznacza to, iż elementy drugorzędne włączające się do współpracy z konstrukcją nośną wpływają tak na wartości częstotliwości, jak i na tłumienie drgań. Z dwóch stosowanych w badaniach metod wyznaczania charakterystyki dynamicznej, metoda wykorzystująca wibrogram o zadanej częstotliwości jest łatwiejsza w praktycznej realizacji. Różnice zaś w wyznaczanych wartościach charakterystyk uzyskanych dwoma metodami nie są znaczące z punktu widzenia potrzeb praktyki inżynierskiej.

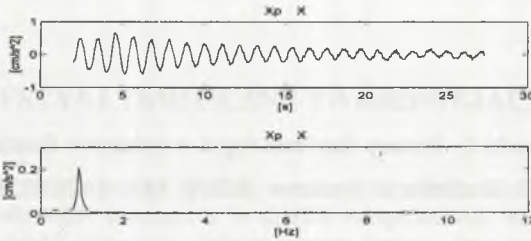
4. Przykład realizacji badań własnych

Badania własne wykonano na kilku wybranych obiektach. Ich celem było sprawdzenie przyjętej metody pomiarowo – interpretacyjnej. Był to trzynastopiętrowy budynek o wysokości 45,28 m i wymiarach w rzucie: 31,64 m x 15 m. Konstrukcję nośną stanowią dwa rzędy słupów stalobetonowych, usytuowanych w części środkowej oraz ciężna i wieszaki stropowe.

Punkty pomiarowe obrano na piętrach VII, X i XIII, umieszczając tam akcelerometry do pomiaru drgań w dwóch prostopadłych kierunkach (x, y). Drgania poziome budynku w danym kierunku wzbudzano sterowanym (z określoną częstotliwością) działaniem (pchanie)

grupy ludzi na ścianę nośną. Po uzyskaniu odpowiedniej wartości przyspieszenia wstrzymano wymuszenie, uzyskując na wibrogramie wykres drgań gasnących.

Na rysunku 3 przedstawiono strukturę częstotliwościową oraz rozkład widocznej na strukturze częstotliwości w czasie.



Rys. 3. Wibrogram i jego struktura częstotliwościowa (wymuszenie XIII piętro, pomiar X piętro kierunku x)

Fig. 3. Frequency structure and its frequency decay (input on the XIII floor, measurement on the X floor in the x direction)

Uzyskano drgania z jedną, dominującą częstotliwością drgań własnych $f_{1x} = 0,96$ Hz. Z wibrogramu wyznaczono wartość logarytmicznego dekrementu tłumienia, otrzymując $\delta = 0,132$.

W podobny sposób wyznaczono podstawową częstotliwość drgań własnych w kierunku y wraz z odpowiadającym jej logarytmicznym dekrementem tłumienia ($f_{1y} = 0,86$ Hz, $\delta = 0,138$).

W wielu wibrogramach stwierdzono również obecność wyższych częstotliwości: 3,27 Hz, 6,50 Hz, 6,90 Hz. Informacje uzyskane z badań posłużyły do zbudowania modelu obliczeniowego (wykorzystano program ALGOR).

5. Uwagi końcowe i wnioski

Podczas wznoszenia budynków następuje w kolejnych fazach ich realizacji włączanie elementów drugorzędnych do współpracy z konstrukcją nośną. W zależności od powiązania tych elementów z zasadniczą konstrukcją mogą one w różny sposób wpływać na zmianę charakterystyki dynamicznej całej konstrukcji. Wpływ ten trudno ocenić w fazie projektowania budynków. W celu opracowania metod przewidywania tego wpływu w nawiązaniu do zastosowanych rozwiązań konstrukcyjnych konieczne jest uzyskanie wiarygodnych wyników badań doświadczalnych zebranych na obiektach realizowanych.

Tabela 1

Porównanie charakterystyk dynamicznych otrzymanych dwoma metodami (wg [5])

Etap realizacji	Kierunek podstawowej częstotliwości	Wyniki z krzywej rezonansowej		Wyniki z wibrogramu o danej częstotliwości	
		Częstotliwość, Hz	Tłumienie, %	Częstotliwość, Hz	Tłumienie, %
Konstrukcja nośna,zew. ściany, konstrukcja dachu	NS1	2,00	2,44	2,01	2,12
	EW1	2,49	3,06	2,47	2,69
	T1	3,23	2,83	-	-
Ułożono dachówki na dachu	NS1	2,70	3,21	2,76	3,19
	EW1	2,84	2,74	2,87	2,29
	T1	3,46	2,58	-	-
Wykonano wszystkie roboty murarskie	NS1	4,71	3,30	4,84	3,17
	EW1	3,57	2,78	3,61	2,58
	T1	5,88	3,86	-	-

Już z porównania wielkości charakteryzujących właściwości dynamiczne budynku w poszczególnych etapach realizacji widoczne są wyraźne zmiany ich wartości. Oznacza to, iż elementy drugorzędne włączające się do współpracy z konstrukcją nośną wpływają tak na wartości częstotliwości, jak i na tłumienie drgań. Z dwóch stosowanych w badaniach metod wyznaczania charakterystyki dynamicznej, metoda wykorzystująca wibrogram o zadanej częstotliwości jest łatwiejsza w praktycznej realizacji. Różnice zaś w wyznaczanych wartościach charakterystyk uzyskanych dwoma metodami nie są znaczące z punktu widzenia potrzeb praktyki inżynierskiej.

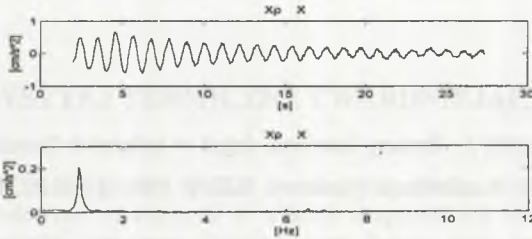
4. Przykład realizacji badań własnych

Badania własne wykonano na kilku wybranych obiektach. Ich celem było sprawdzenie przyjętej metody pomiarowo – interpretacyjnej. Był to trzynastopiętrowy budynek o wysokości 45,28 m i wymiarach w rzucie: 31,64 m x 15 m. Konstrukcję nośną stanowią dwa rzędy słupów stalobetonowych, usytuowanych w części środkowej oraz ciężna i wieszaki stropowe.

Punkty pomiarowe obrano na piętrach VII, X i XIII, umieszczając tam akcelerometry do pomiaru drgań w dwóch prostopadłych kierunkach (x, y). Drgania poziome budynku w danym kierunku wzbudzano sterowanym (z określoną częstotliwością) działaniem (pchaniami)

grupy ludzi na ścianę nośną. Po uzyskaniu odpowiedniej wartości przyspieszenia wstrzymano wymuszenie, uzyskując na wibrogramie wykres drgań gasnących.

Na rysunku 3 przedstawiono strukturę częstotliwościową oraz rozkład widocznej na strukturze częstotliwości w czasie.



Rys. 3. Wibrogram i jego struktura częstotliwościowa (wymuszenie XIII piętro, pomiar X piętro kierunku x)

Fig. 3. Frequency structure and its frequency decay (input on the XIII floor, measurement on the X floor in the x direction)

Uzyskano drgania z jedną, dominującą częstotliwością drgań własnych $f_{1x} = 0,96$ Hz. Z wibrogramu wyznaczono wartość logarytmicznego dekrementu tłumienia, otrzymując $\delta = 0,132$.

W podobny sposób wyznaczono podstawową częstotliwość drgań własnych w kierunku y wraz z odpowiadającym jej logarytmicznym dekrementem tłumienia ($f_{1y} = 0,86$ Hz, $\delta = 0,138$).

W wielu wibrogramach stwierdzono również obecność wyższych częstotliwości: 3,27 Hz, 6,50 Hz, 6,90 Hz. Informacje uzyskane z badań posłużyły do zbudowania modelu obliczeniowego (wykorzystano program ALGOR).

5. Uwagi końcowe i wnioski

Podczas wznoszenia budynków następuje w kolejnych fazach ich realizacji włączanie elementów drugorzędnych do współpracy z konstrukcją nośną. W zależności od powiązania tych elementów z zasadniczą konstrukcją mogą one w różny sposób wpływać na zmianę charakterystyki dynamicznej całej konstrukcji. Wpływ ten trudno ocenić w fazie projektowania budynków. W celu opracowania metod przewidywania tego wpływu w nawiązaniu do zastosowanych rozwiązań konstrukcyjnych konieczne jest uzyskanie wiarygodnych wyników badań doświadczalnych zebranych na obiektach realizowanych.

W niniejszej pracy przedstawiono ważniejsze wyniki analizy metod pomiarowych, które umożliwią wyznaczenie parametrów opisujących tłumienie drgań budowli. Na tej podstawie wybrano metodę, która będzie stosowana w badaniach wielu obiektów. W niektórych przypadkach zakłada się również zastosowanie innych metod, co pozwoli na uzupełniającą weryfikację ich przydatności.

LITERATURA

1. Ciesielski R., Kawecki J.: Zmiany tłumienia drgań w kolejnych fazach realizacji budowli wieżowych. XXIX Konferencja Naukowa KILiW PAN i KN PZITB, Krynica 1983, s. 21 – 26.
2. Ellis B. R., Ji T.: Dynamic testing and numerical modelling of the Cardington Steel Framed Building from construction to completion. "The Structural Engineer", vol. 74, June 1996, p. 186 – 192.
3. 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, p. 1232 – 1242.
4. Flaga A.: Metoda wyznaczania parametrów tłumienia drgań z odpowiedzi budowli na obciążenie wiatrem. Prace Komisji Mechaniki Stosowanej, Mechanika 15, PAN Oddział w Krakowie 1991, s. 25 – 33.
5. Kawecki J.: Wyznaczanie parametrów modelu sztywnościowo – bezwładnościowego tłumienia drgań konstrukcji żelbetowych. Sesja Naukowa z okazji jubileuszu profesora Wiesława Stachurskiego, Politechnika Krakowska, Wydział Inżynierii Lądowej, s. 85 – 93.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Zbigniew Zembaty

Abstract

In this paper a synthesis of methods of determining damping parameter of the building structure have been presented. The best method for the experimental measurement of the influence of individual structural elements on changes in dynamic characteristic of the building has been chosen.