

Problematyka pomiarów dynamicznych kominów i masztów wyposażonych w masowe tłumiki drgań

Problems of dynamic measurements of chimneys and masts equipped with mass vibration dampers



Paweł Podstolak

Przedsiębiorstwo Budownictwa Przemysłowego
EMKA Sp. z o.o. sp.k.,
pawel.podstolak@buko-projekty.pl



Mariusz Kędziński

Przedsiębiorstwo Budownictwa Przemysłowego
EMKA Sp. z o.o. sp.k.,
mariusz.kedziński@emka.krakow.pl

Streszczenie

Artykuł przedstawia zagadnienia związane z wykonywaniem i analizą wyników pomiarów dynamicznych wysokościowych konstrukcji budowlanych. Pomiary takie prowadzi się najczęściej w celu kontroli rzeczywistej skuteczności działania urządzeń tłumiących, zabudowanych na konstrukcji zarówno bezpośrednio po ich montażu, jak i okresowo w trakcie dalszej eksploatacji obiektu. Komin, wieża oraz inne tego typu budowle są często narażone na silne drgania wywołane dynamicznym działaniem wiatru, co powoduje konieczność

ich zabezpieczenia przed skutkami rezonansu wiatrowego. Jedną z metod jest stosowanie masowych tłumików drgań, których zabudowa istotnie modyfikuje zachowanie dynamiczne konstrukcji, zazwyczaj prowadząc do pojawienia się dwóch, blisko siebie położonych częstotliwości rezonansowych. Ma to istotny wpływ na metodykę prowadzenia pomiarów oraz sposób analizy wyników. W artykule opisano doświadczenia zdobyte przez autorów w trakcie wieloletniej diagnostyki dynamicznej konstrukcji tego typu.

Słowa kluczowe pomiary dynamiczne, analiza wyników pomiaru, tłumienie drgań, wiatrowe wzbudzenie wirowe, logarytmiczny dekrement tłumienia, współczynnik tłumienia

Abstract

This article presents issues related to the performance and analysis of dynamic measurements of high-rise building structures. Such measurements are most often conducted to verify the actual effectiveness of damping devices installed on the structure, immediately after their installation and periodically during the structure's operation. Chimneys, towers, and other such structures are often exposed to strong vibrations caused by dynamic wind action, necessitating protec-

tion against the effects of wind resonance. One method is the use of mass vibration dampers, whose installation significantly affects the dynamic behavior of the structure, typically resulting in the occurrence of two closely spaced resonant frequencies. This significantly impacts the measurement methodology and the analysis of measurement results. This article describes the experience gained by the authors during many years of dynamic diagnostics of this type of structure.

Keywords dynamic measurements, measurement result analysis, vibration damping, wind eddy excitation, logarithmic damping decrement, damping coefficient

WPROWADZENIE

Konstrukcje budowlane typu wieżowego, takie jak: komin, iglice, kolumny, maszty i wieże, są często narażone na silne drgania wywołane dynamicznym oddziaływaniem wiatru o charakterze rezonansowym (wskutek odrywania się wirów wiatro-

wych). Drgania takie mogą być niebezpieczne dla budowli z powodu zmęczenia materiału, ponieważ narażona na nie konstrukcja w czasie swojej eksploatacji musi wytrzymać setki tysięcy cykli takiego obciążenia. W ekstremalnych przypadkach może nawet dochodzić do szybkiego znisz-

czenia obiektu na skutek zmęczenia niskocyklowego związanego z uplastycznieniem materiału. Szczególnie podatne na zjawiska dynamiczne są konstrukcje metalowe (stalowe) ze względu na niewielkie tłumienie konstrukcyjne metali oraz stosunkowo małą masę drgającą. O konieczności

redukcji drgań budowli decydują czasem względy użytkowe, np. konieczność zapewnienia komfortu użytkowników lub spełnienia warunków technicznych dla instalacji antenowych.

Z analizy formuł stosowanych według [1] p. E.1.5.2 i E.1.5.3 dla określenia obciążenia rezonansem wiatrowym wynika, że parametrem dobrze charakteryzującym podatność konstrukcji na to zjawisko jest liczba Scrutona. Jest ona definiowana w sposób następujący:

$$S_c = \frac{2 \delta_s \cdot m_{ie}}{\rho \cdot b^2}$$

gdzie:

δ_s – logarytmiczny dekrement tłumienia konstrukcyjnego,

m_{ie} – masa równoważna konstrukcji na jednostkę długości i-tej postaci drgań, ρ – gęstość powietrza wynosząca 1,25 kg/m³, b – szerokość odniesienia przekroju poprzecznego (np. średnica kolumny).

Zwiększenie liczby Scrutona efektywnie wpływa na ograniczenie drgań wywołanych wzbudzeniem wirowym, gdyż występuje ona w mianowniku wyrażenia na wyznaczenie amplitudy drgań. Wzrost wartości liczby Scrutona można najprościej uzyskać, zwiększając logarytmiczny dekrement tłumienia konstrukcji, będący parametrem opisującym tłumienie drgań układu dynamicznego. Dla wysokich obiektów wieżowych powszechnie stosowanym sposobem poprawy tłumienia jest zabudowa masowych tłumików drgań umieszczanych w pobliżu szczytu budowli. W tym przypadku nie ma zwykle konieczności wykonywania żadnych dodatkowych podpór, wzmocnień ani odciągów zmieniających schemat konstrukcyjny obiektu.

Precyzyjna regulacja oraz ocena rzeczywistej skuteczności masowego tłumika drgań wymaga określenia efektywnego współczynnika tłumienia dla analizowanej postaci drgań obiektu. W praktyce dokonuje się tego poprzez pomiary dynamiczne w celu określenia rzeczywistych charakterystyk dynamicznych obiektu, które przeprowadzane są zarówno bez-



Fot. 1. Przykład zabudowy masowego tłumika drgań na kominie stalowym

pośrednio po zabudowie urządzeń tłumiących (pomiaru powykonawcze), jak i okresowo w trakcie dalszej eksploatacji konstrukcji.

ZAGADNIENIA TEORETYCZNE ZWIĄZANE Z WPŁYWEM TŁUMIKA MASOWEGO NA ZACHOWANIE DYNAMICZNE OBIEKTU

Zasada działania tłumika masowego polega na dodaniu do układu dynamicznego, jaki stanowi budowla, dodatkowej masy połączonej z układem głównym więzami sprężystymi. Masa ta porusza się wraz z układem głównym, przejmując energię jego drgań. Dodatkowo dla poprawy skuteczności między ruchomymi elementami stosuje się więzy tłumiące o charakterze ciernym lub wiskotycznym, które rozpraszają energię drgań. Najczęściej tłumiki tego typu dostosowuje się do tłumienia pojedynczej częstotliwości drgań obiektu. Regulacja polega na precyzyjnym doborze parametrów urządzenia tłumiącego, którymi są masa czynna, sztywność wewnętrzna oraz współczynnik tłumienia wewnętrznego. Szczególnie istotny dla skuteczności działania tłumika jest dobór dwóch pierwszych parametrów, co potocznie nazywa się strojeniem tłumika drgań.

Modelowanie działania tłumika pojedynczej częstotliwości drgań polega na zastąpieniu całego układu dyna-

micznego, jakim jest budowla wyposażona w tłumik masowy, układem dynamicznym o dwóch stopniach swobody. Taki układ można zapisać przy pomocy dwóch liniowych równań różniczkowych określonych przez sześć niezależnych parametrów. Trzy z nich wynikają bezpośrednio z charakterystyki tłumionego obiektu i są to:

- M – masa sprowadzona (modalna) odpowiadająca masie biorącej udział w danej postaci drgań,
- K – sztywność sprowadzona (modalna) odpowiadająca sztywności konstrukcji dla danej postaci drgań,
- C lub δ_s – współczynnik tłumienia drgań dla danej postaci lub zamiennie logarytmiczny dekrement tłumienia konstrukcyjnego.

Parametry M i K można wyznaczyć w przybliżeniu z modelu numerycznego konstrukcji wykonanego np. w oprogramowaniu MES. Wartość δ_s można ustalić według wytycznych normy [1] dla danego typu konstrukcji. Powyższe oszacowania charakteryzują się zwykle istotnym błędem i praktycznie na potrzeby właściwego dostrojenia tłumika wymagana jest ich weryfikacja w wyniku powykonawczych badań dynamicznych. Kolejne trzy parametry obliczeniowe modelu wynikają z zastosowanego typu tłumika drgań i określa je producent (projektant) urządzenia, a są to:

- m – masa czynna tłumiąca (masa rucho-
ma wewnątrz tłumika),
- k – sztywność więzów wewnętrznych,
- c lub δ_w – współczynnik tłumienia we-
wnętrznego (dla więzów wewnętrznych)
lub inny parametr charakteryzujący tłu-
mienie wewnętrzne urządzenia.

Znając wymienione parametry, można zbudować układ równań ruchu opisujący zachowanie się obiektu z zamontowanym tłumikiem, dla drgań zachodzących w pobliżu częstotliwości tłumionej. Jest to podejście stosowane z powodzeniem przy analizie skuteczności oraz przy regulacji tłumików pracujących dla pojedynczej częstotliwości drgań.

Taki układ równań zapisuje się w postaci macierzowej:

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = P(t)$$

gdzie:

- M , C i K oznaczają odpowiednio macierze mas, tłumienia i sztywności o wymiarze 2×2 ;
- P jest wektorem sił (2×1);
- x to wektor stopni swobody układu (2×1) i jego pochodne czasowe.

W przypadku analizy drgań ustalonych przy wymuszeniu harmonicznym P zachowanie takiego systemu dobrze obrazuje charakterystyka amplitudowo-częstotliwościowa, będąca modulem transmitancji widmowej, którą można zapisać w postaci:

$$H_{j,k}(\omega) = |((K) - \omega^2 \cdot M) + i \cdot \omega \cdot C)^{-1})_{j,k}|$$

gdzie:

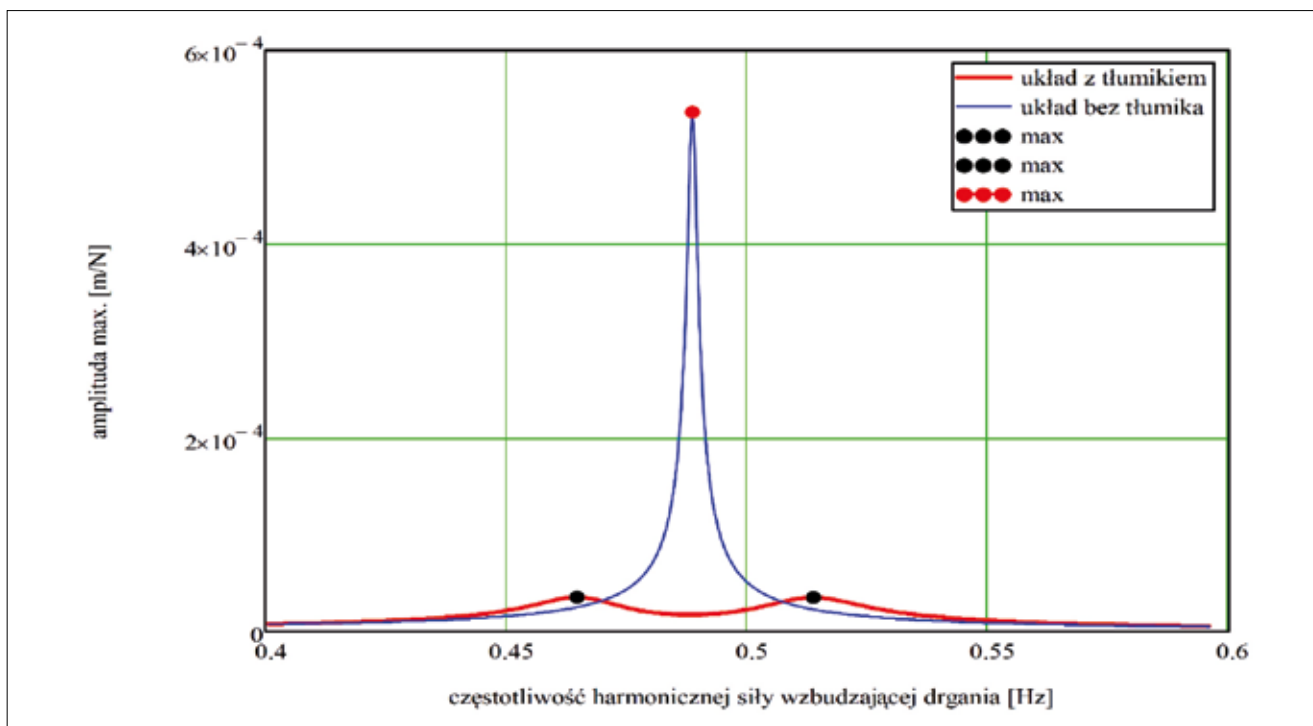
- ω jest częstością kołową siły wymuszającej drgania układu;
- j , k charakterystyki a-c oznaczają maksymalne wartości amplitudy drgań stopnia swobody j , wywołanych siłą harmoniczną działającą w czasie nieograniczonym na stopień swobody k .

Na wykresie (rys. 1) przedstawiono przykładowy przebieg krzywych amplitudowo-częstotliwościowych dla rzeczywistego obiektu w stanie przed zabudową tłumika drgań, służącego do tłumienia pierwszej częstotliwości drgań własnych i po takiej zabudowie.

Podczas porównywania wykresów widoczna jest istotna zmiana kształtu krzywej rezonansowej. W przypadku braku

tłumika występuje jedno maksimum odpowiadające częstotliwości rezonansowej $f_r = 0,49$ Hz i wartości współczynnika tłumienia konstrukcyjnego wynoszącej $\delta_s = 0,014$. Dla układu z tłumikiem występują wyraźne dwa maksima rezonansowe $f_{r1} = 0,465$ Hz i $f_{r2} = 0,514$ Hz, zlokalizowane powyżej oraz poniżej pierwotnej częstotliwości rezonansu. W tym przypadku optymalne dostrojenie tłumika wyrównuje wartości charakterystyki dla obydwu punktów rezonansu, co powoduje, że ekwiwalent współczynnika tłumienia w całym zakresie częstotliwości wzbudzenia jest najmniejszy i wynosi ok. $\delta_{\min} = 0,215$.

Dla tłumików niedostrojonych optymalnie wartości krzywej będą różne w obu punktach rezonansowych f_{r1} i f_{r2} , co pogarsza skuteczność tłumienia. W wypadku zastosowania tłumików o stosunkowo małej masie i dużym tłumieniu wewnętrznym możliwe są również sytuacje, w których punkty rezonansu łączą się w jedno wspólne maksimum. Obecność dwóch punktów rezonansu, wynikająca z opisanego



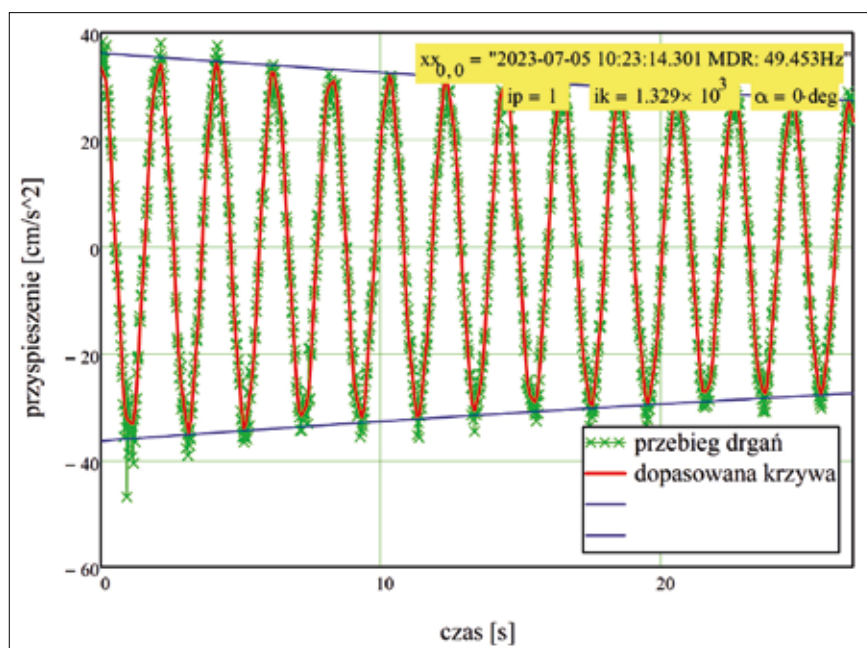
Rys. 1. Charakterystyki amplitudowo-częstotliwościowe dla układu dynamicznego przed zabudową i po zabudowie masowego tłumika drgań

zagadnienia drgań wymuszonych, przekłada się również na istnienie dwóch częstotliwości drgań własnych w przypadku drgań swobodnych systemu, który wykorzystuje się w pomiarach dynamicznych. Duże tłumienie generowane przez tłumik masowy powoduje więc w praktyce „rozmycie” strefy rezonansu drgań, co utrudnia prowadzenie i analizę wyników pomiarów dynamicznych.

PROBLEMATYKA WYKONYWANIA I ANALIZY WYNIKÓW POMIARÓW DYNAMICZNYCH

Przeprowadzanie badań dynamicznych polega na rejestracji, a następnie analizie drgań budowli po jej uprzednim wzbudzeniu. W trakcie pomiaru układ powinien wykonywać drgania swobodne, zanikające możliwie bez wpływu czynników zewnętrznych. Pomiar można przeprowadzić przy użyciu rozmaitych typów czujników pomiarowych, mierzących i zapisujących różne wielkości fizyczne związane z drganiami. Mogą to być wartości przemieszczeń liniowych lub kątowych różnych punktów konstrukcji, albo ich pochodne czasowe, czyli prędkość i przyspieszenie ruchu. Można też używać czujników tensometrycznych zapisujących odkształcenia powstające w elementach konstrukcji. Więcej na ten temat wspomniano w artykule [4]. Rejestrowana wielkość fizyczna nie ma dużego znaczenia, istotne jest natomiast odpowiednie dostosowanie używanego sprzętu do mierzonego zakresu częstotliwości oraz amplitudy analizowanych przebiegów. Długość zapisu powinna być również dostosowana do charakterystyk mierzonej konstrukcji i w praktyce obejmować co najmniej kilkanaście okresów drgań. Istotne jest, aby rozpoczęcie pomiaru następowało po ustaniu wzbudzenia, tak aby analizowany sygnał dotyczył wyłącznie drgań swobodnych, zanikających.

Pierwsza trudność występująca przy prowadzeniu pomiarów dynamicznych związana jest ze wzbudzeniem drgań układu, które będą przedmiotem rejestra-



Rys. 2. Zapis przebiegu drgań gasnących rzeczywistego układu dynamicznego bez tłumika drgań. Widoczne drgania o częstotliwości $f_1 = 0,486$ Hz i współczynniku tłumienia $\delta_1 = 0,021$. Dodatkowo widoczne nakładające się drgania o częstotliwości $f_2 = 2,57$ Hz i niewielkiej amplitudzie

cji pomiarowej. W przypadku obiektu bez tłumika o niskim tłumieniu wywołanie drgań jest stosunkowo proste. Wystarczy do tego zwykle jedna lub co najwyżej kilka osób poruszających się synchronicznie w miejscu i na kierunku spodziewanego wystąpienia ruchu drgającego.

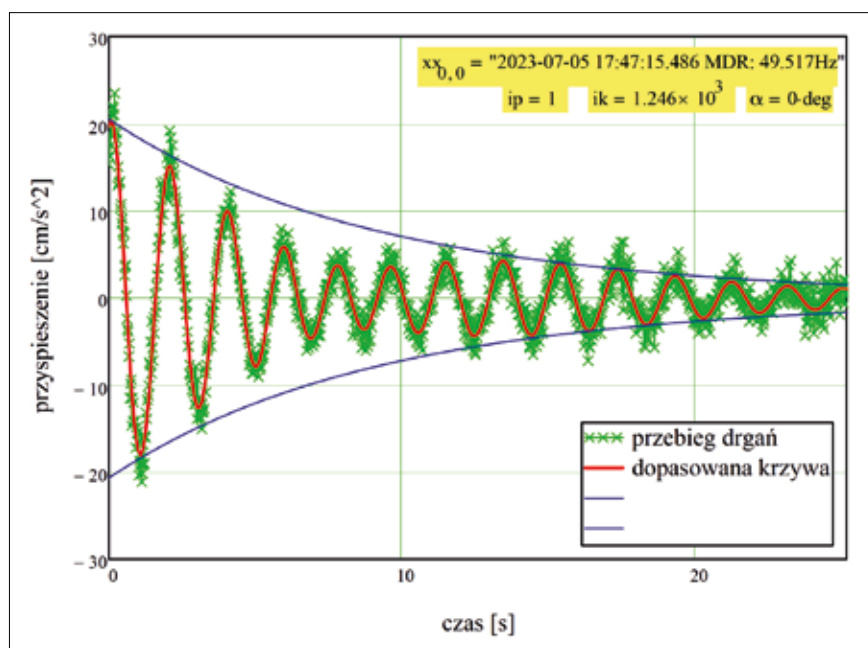
W przypadku odpowiedniego dopasowania częstotliwości ruchów powstały rezonans mechaniczny powoduje szybkie narastanie amplitudy drgań. W takiej sytuacji efekty wzbudzenia są powtarzalne podczas każdej próby.

Dla układów z dobrze działającym tłumikiem drgań pojawia się jednak kilka poważnych trudności. Znacznie wyższe tłumienie efektywne układu powoduje silne rozpraszanie energii i bardzo utrudnia skuteczne wzbudzenie drgań o odpowiedniej amplitudzie. Wymagane jest zaangażowanie większej liczby osób, co z kolei pogarsza ich synchroniczne współdziałanie, może zakłócać wynik pomiaru (dodatkowa masa drgająca), a niekiedy jest wręcz niemożliwe z powodu ograniczonej przestrzeni na konstrukcji (np. brak lub zbyt małe pomosty w miejscu pomiaru). Szczególnie istotnym proble-

mem jest jednak opisane rozmycie strefy rezonansowej systemu. Wygenerowane z dużym trudem drgania będą miały za każdym razem inny przebieg, zależny od częstotliwości i czasu wzbudzenia. W praktyce najczęściej wywoływane są równocześnie drgania o dwóch częstotliwościach położonych w pobliżu punktów rezonansowych, przy czym ich przebieg wizualny może się istotnie różnić w zależności od proporcji amplitud początkowych oraz przesunięcia fazowego drgań składowych. Brak idealnej współpracy osób wzbudzających może generować drgania o innych, nawet dość odległych częstotliwościach, co dodatkowo zakłóca pomiar.

Na rys. 2 i 3 przedstawiono przykładowe zapisy czasowe przebiegu drgań z pomiarów rzeczywistego układu, odpowiadającego charakterystykom przedstawionym na rys. 1.

Z wyżej wymienionych powodów często podczas prowadzenia pomiarów występują trudności we wzbudzeniu drgań o odpowiednio dużej amplitudzie, która powinna znacznie wykraczać poza poziom szumów i zakłóceń pomiarowych (szumy/rozdzielczość czujnika,



Rys. 3. Zapis przebiegu drgań gasnących rzeczywistego układu dynamicznego z tłumikiem drgań. Widoczne nakładające się drgania o częstotliwościach dualnych $f_1 = 0,462$ Hz i $f_2 = 0,522$ Hz. Współczynniki tłumienia wynoszą odpowiednio $\delta_1 = 0,313$ i $\delta_2 = 0,168$. Amplitudy początkowe składowych drgań wynoszą $A_1 = 8,07$ cm/s² i $A_2 = 12,54$ cm/s²

tło drgań pochodzących od innych instalacji lub wiatru). Szczególnie problematyczny jest wiatr, który nie tylko może zakłócać pomiar, generując szумы, lecz także istotnie wpływa na wyznaczoną wartość współczynnika tłumienia. Wynika to z faktu, że podmuchy wiatru mogą zarówno tłumić, jak i potęgować drgania konstrukcji, dlatego też prowadzenie pomiarów współczynnika tłumienia powinno odbywać się w sprzyjających warunkach pogodowych (cisza wiatrowa), w przeciwnym razie mogą być one mało wiarygodne.

W przypadku bardzo skutecznych tłumików i układów o działaniu nieliniowym duży problem stanowi powtarzalność uzyskanych przebiegów drgań. W zależności od proporcji i wielkości wzbudzonych amplitud składowych drgań dualnych występują znaczne różnice w uzyskanych wynikach pomiarów, a więc w częstotliwościach drgań oraz wartościach współczynnika tłumienia. Pewnym rozwiązaniem opisanych problemów jest wykonywanie wielu rejestracji i statystycznej obróbki wyników z odrzuceniem wartości skrajnie odbiegających od średniej.

Kolejnym kluczowym problemem podczas prowadzenia pomiarów dynamicznych systemów z tłumikami jest analiza zarejestrowanych sygnałów pomiarowych. W przypadku drgań układu bez tłumika (np. rys. 2), o wyraźnie dominującej częstotliwości głównej, wyznaczenie częstotliwości i współczynnika tłumienia jest zwykle dosyć proste. Można to zrobić, odczytując wartości rzędnych i odciętych kolejnych ekstremów na zarejestrowanym przebiegu. Wartość okresu drgań jest wówczas równa różnicy kolejnych wartości rzędnej, a zestawienie proporcji odciętych pozwala na wyznaczenie współczynnika tłumienia. Większe problemy mogą pojawić się w przypadku sygnału silnie zaszumionego lub zakłóconego drganiami o innej częstotliwości. Wówczas trudne staje się precyzyjne ustalenie punktów ekstremalnych wykresu, co prowadzi do spadku dokładności obliczeń. Rozwiązaniem może być tutaj użycie filtrów górno- i/lub dolnoprzepustowych do wstępnej obróbki sygnału. Ta metoda nie sprawdzi się jednak przy rejestracji dwóch lub więcej zbliżonych

częstotliwości. Z takim właśnie przypadkiem mamy zazwyczaj do czynienia podczas pomiarów układów dynamicznych z tłumikami masowymi. Przykładowo, przedstawiony na rys. 3 zapis czasowy ilustruje dwa nakładające się drgania o bliskich częstotliwościach. W takiej sytuacji zachodzi zjawisko tzw. dudnienia. Dla silnie tłumionych drgań może ono za każdym razem generować zupełnie różne kształty przebiegów czasowych. Charakterystycznymi objawami, które jednoznacznie wskazują na równoczesne pojawienie się kilku bliskich częstotliwości w sygnale, są zmiany odległości pomiędzy kolejnymi ekstremami wykresu (drgania o zmiennym okresie) oraz występowanie stref ponownego narastania amplitudy drgań pomimo braku wymuszenia układu (drgania gasnące). W takich przypadkach metoda analizy graficznej oparta na odczycie punktów ekstremalnych prowadzi do całkowicie błędnych wyników i nie może być stosowana.

Autorzy w swojej praktyce z powodzeniem wykorzystują metodę analizy opartą na dopasowaniu do zarejestrowanych przebiegów funkcji drgań, będącej sumą wartości stałej i n krzywych drgań gasnących o postaci ogólnej:

$$X(t) = A_0 + \sum_{k=1}^n A_k e^{-\beta_k t} \cos(\omega_k t + \varphi_k)$$

Do wyznaczenia wszystkich $4n + 1$ nieznanych parametrów funkcji stosuje się metodę najmniejszych kwadratów. Liczbę istotnych składowych drgań występujących w sygnale, a więc parametr n , ustala się, analizując widmo zarejestrowanego sygnału. Metoda ta jest pracochłonna obliczeniowo, ponieważ wymaga rozwiązania nieliniowego układu równań arytmetycznych z wieloma niewiadomymi. Zastosowanie w tym przypadku komputera daje dobre rezultaty i umożliwia szybkie znalezienie rozwiązań. Na rys. 2 i 3 czerwoną linią oznaczono przebiegi funkcji drgań wyznaczonych tą metodą. Uzyskane w ten sposób wartości funkcji pozwalają obliczyć poszukiwane



Fot. 2. Realizacja pomiarów dynamicznych stalowych masztów flagowych z zabudowanymi tłumikami drgań wielu częstotliwości

parametry (okres, częstotliwość, współczynnik tłumienia, amplitudę początkową, przesunięcie fazowe) oddzielnie dla każdej składowej drgań. Dodatkowo metoda ta umożliwia łatwe oszacowanie błędów pomiarowych dla wszystkich wyliczonych parametrów.

PODSUMOWANIE

Pomiary dynamiczne są bardzo przydatne i często wykonywane podczas projektowania, montażu, serwisu oraz kontroli okresowej masowych tłumików drgań, stosowanych zarówno w istniejących, jak i w nowych konstrukcjach budowlanych. Pozwalają na pomiar rzeczywistych wartości parametrów dynamicznych konstrukcji (częstotliwości i współczynniki tłumienia drgań), które są podstawą precyzyjnego strojenia i kontroli skuteczności działania tłumików drgań.

Przeprowadzanie pomiarów dynamicznych konstrukcji wyposażonych w masowe tłumiki drgań wymaga nie tylko wiedzy na temat zagadnień tech-

nicznych związanych z obsługą i doбором urządzeń pomiarowych, lecz także dobrej znajomości teorii działania tłumików oraz ich wpływu na zachowanie dynamiczne konstrukcji.

Pomiary należy dobrać zaplanować pod kątem rodzaju i umiejscowienia czujników pomiarowych oraz sposobu wzbudzenia drgań, uwzględniając warunki panujące w czasie rejestracji. Zespół prowadzący wzbudzenie powinien zostać odpowiednio rozlokowany na konstrukcji i zoptymalizowany pod względem liczby osób. Ważne jest jego doświadczenie oraz odpowiednie przeszkolenie w celu synchronicznego i skutecznego działania. Zaleca się stosowanie urządzenia wskazu-

jącego tempo prowadzonych wzbudzeń (rodzaj metronomu). W miarę możliwości technicznych należy dążyć do eliminacji czynników zakłócających pomiar, takich jak wiejący wiatr czy drgania generowane przez sąsiadujące urządzenia i instalacje. Konstrukcja powinna znajdować się w stanie odpowiadającym jej normalnej eksploatacji, tj. być w pełni zmontowana i wyposażona, pozbawiona tymczasowych elementów, takich jak rusztowania, odciągi lub podpory. Wzbudzenie drgań powinno być wystarczająco duże, aby poziom wywołanych amplitud znacznie przekraczał występujące zakłócenia pomiarowe, jednocześnie nie przekraczając wartości bezpiecznych dla badanej konstrukcji.

W przypadku układów mocno tłumionych należy wykonać wiele rejestracji pomiarowych, a zapisane przebiegi powinny być odpowiednio długie – najlepiej prowadzone aż do zaniku drgań. Wzbudzenia należy prowadzić w różnych zakresach częstotliwości odpowiednio do zakresu strefy rezonansu.

Do analizy przebiegów należy użyć odpowiednich metod zdolnych do separacji wszystkich znaczących składowych drgań występujących w rejestrowanym sygnale.

Prowadzenie i analiza dynamicznych pomiarów budowli wyposażonych w tłumiki drgań jest zagadnieniem bardzo skomplikowanym, wymagającym zarówno gruntownej wiedzy teoretycznej, jak i praktycznego doświadczenia. Aby wyniki pomiarów były wiarygodne, procedury pomiarowe oraz opracowanie wyników powinny być powierzone specjalistom o dużym doświadczeniu i dogłębnej znajomości przedmiotu. ■

Literatura

- [1] PN-EN 1991-1-4:2008 – Eurokod 1: Oddziaływania na konstrukcje – Część 1-4: Oddziaływania ogólne – Oddziaływania wiatru.
- [2] PN-EN 1993-1-9:2007 – Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych – Część 1-9: Zmęczenie.
- [3] PN-EN 13084-1:2007 – Kominy wolno stojące – Część 1: Wymagania ogólne.
- [4] Kuras P. i in., „Pomiary drgań stalowych kominów przemysłowych wyposażonych w tłumiki masowe” w: *Problemy Aplikacji Kinematyki*, nr 12, 2014.
- [5] Kędzierski M. i in., „Poprawa bezpieczeństwa i niezawodności kominów stalowych poprzez modernizację systemów tłumienia drgań”, *X Konferencja Budownictwo w Energetyce w: Materiały Budowlane*, nr 5, 2016, s. 38–39, <https://doi.org/10.15199/33.2016.05.17>.
- [6] Podstolak P., Kędzierski M., „Zastosowanie tłumików drgań poprzecznych w przypadku modernizacji stalowych kominów przemysłowych” w: *XXVIII Konferencja Naukowo-Techniczna „Awary Budowlane”*, Międzyzdroje, 2017.
- [7] Lewandowski R., *Redukcja drgań konstrukcji budowlanych*, Warszawa: PWN, 2014.
- [8] Wichtowski B., Żurański J.A., „Pewne przypadki rezonansu wiatrowego kominów stalowych” w: *XXIV Konferencja Naukowo-Techniczna „Awary Budowlane”*, Międzyzdroje, 2009.
- [9] Włodarczyk W., „Problemy projektowania kominów stalowych z uwzględnieniem Eurokodów” w: *XXVII Ogólnopolskie Warsztaty Pracy Projektanta Konstrukcji*, Szczyrk, 2012.
- [10] Dulińska J., Kawecki J., „Awary i katastrofy budowli wywołane działaniami dynamicznymi” w: *XXV Konferencja Naukowo-Techniczna „Awary Budowlane”*, Międzyzdroje, 2011.