

dr inż. Łukasz Ortyl^{1*)}dr inż. Przemysław Kuras¹⁾mgr inż. Mariusz Kędzierski²⁾mgr inż. Paweł Podstolak³⁾

Metody pomiaru częstotliwości drgań własnych i logarytmicznego dekrementu tłumienia kominów stalowych w sytuacjach wymaganych przez Eurokody

Methods of measurement natural frequency and logarithmic decrement of damping steel chimneys in situations required by Eurocodes

DOI: 10.15199/33.2015.09.42

(Artykuł przeglądowy)

Streszczenie. Artykuł porusza problem wyznaczania rzeczywistych charakterystyk dynamicznych stalowych kominów przemysłowych wyposażonych w tłumiki drgań. Dokonano przeglądu metod pomiarowych oraz omówiono ich wady i zalety pod kątem zastosowania w diagnostyce dynamicznej budowli wysokich. Przedstawiono przykładowe wyniki pomiarów charakterystyk dynamicznych wykonanych podczas regulacji tłumików drgań na rzeczywistym obiekcie. Trzy instrumenty pomiarowe typu naziemny radar interferometryczny, tachymetr zrobotyzowany oraz akcelerometr typu MEMS zostały poddane ocenie w zakresie stopnia zgodności otrzymanych wyników pomiaru charakterystyk dynamicznych.

Słowa kluczowe: kominny stalowy, radar interferometryczny, tachymetr zrobotyzowany, przyspieszeniometer MEMS, tłumiki drgań.

Abstract. The article focuses on determination of the actual dynamic characteristics of steel chimneys equipped with vibration dampers. A review of measurement methods was made, together with a discussion of their advantages and disadvantages for use in the dynamic diagnosis of high structures. Examples of dynamic measurements, performed while adjusting the dampers on the real object, were presented. Three measuring instruments were assessed in terms of compliance of dynamic characteristics obtained as a result of measurement. They are: ground-based interferometric radar, robotic total station and MEMS accelerometer.

Keywords: steel chimneys, interferometric radar, robotic total station, MEMS accelerometers, vibration dampers.

W normach [1, 2, 3, 4, 5] określono zasady projektowania stalowych kominów przemysłowych oraz sytuacje, w których zalecany jest bezpośredni pomiar charakteryzujący dynamikę budowli. Wśród nich są m.in.: brak możliwości zastosowania dokładnych modeli obliczeniowych, budowa dużej liczby podobnych (typowych) konstrukcji, konieczność potwierdzenia niepewnych założeń obliczeniowych. Eurokod [1] określa również sytuacje, w których zalecana jest kontrola rzeczywistych dynamicznych obiektów budowlanych na podstawie pomiarów

(m.in. obiektów wrażliwych na wzbudzenie oraz wyposażonych w urządzenia do tłumienia drgań). Dokonując rejestracji w czasie przemieszczenia, prędkości lub przyspieszenia w wybranych punktach konstrukcji, można określić charakterystyki dynamiczne obiektu, tj. częstotliwość drgań własnych oraz logarytmiczne dekrementy tłumienia (LDT). Zakres częstotliwości drgań obiektów budowlanych zależy od gęstości widma wymuszenia oraz mechanicznej odpowiedzi konstrukcji. Przyjmuje się [6], że zakres ten wynosi $0,1 \div 500$ Hz i obejmuje dużą różnorodność naturalnych i sztucznych źródeł wzbudzenia. W przypadku pomiaru drgań wysokich budowli i mostów zakres analizowanych częstotliwości zwykle może być ograniczony. Odpowiedź konstrukcji na wzbudzeniewiatrowe, istotna w przypadku kominów

stalowych, mieści się w zakresie $0,1 \div 10$ Hz. Wymagania dotyczące pomiaru drgań, zawarte w normie [6], są następujące:

- pomiar amplitudy drgań powinien być prowadzony w sposób ciągły, przez wystarczająco długi czas, z dokładnością pozwalającą na określenie zawartości widma;
- próbkowanie powinno być wykonane z częstotliwością co najmniej 5 razy większą niż najwyższa częstotliwość drgań;
- system pomiarowy powinien pozwalać oszacować częstotliwość drgań z błędem $\pm 0,5\%$, a tłumienie z błędem $\pm 20\%$.

Sposoby pomiaru drgań

Czujniki fizyczne. Najpopularniejszym typem takich czujników są **akcelerometry**, głównie **piezoelektryczne**

¹⁾ Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska

²⁾ Przedsiębiorstwo Budownictwa Przemysłowego EMKA Sp. z o.o. Sp. k.

³⁾ Firma Projektowa BUKO

*) Autor do korespondencji:
e-mail: ortyl@agh.edu.pl

– najbardziej wiarygodne ze względu na zakres amplitudy i częstotliwości. Ich zalety to: duża rozdzielczość; niewielki poziom szumu; szerokie pasmo częstotliwościowe. Natomiast wśród wad są: dryft temperaturowy i konieczność częstej kalibracji. Akcelerometry pracują w zakresie częstotliwości od ułamków herca do 20 kHz. Powinny być montowane bezpośrednio na obiekcie, a działanie długookresowe wymaga zasilania. Obecnie coraz częściej stosowane są **czujniki mikroelektromechaniczne (MEMS)**. Umożliwiają pomiar przyspieszenia statycznego, charakteryzują się niewielkim dryftem temperaturowym, niską ceną i nie muszą być często kalibrowane. W porównaniu z czujnikami piezoelektrycznymi mają mniejszą rozdzielczość, węższe pasmo częstotliwości oraz wyższy poziom szumu. Do pomiaru drgań stosuje się również m.in. **tenzometry oporowe, czujniki elektrodynamiczne, czujniki zbliżeniowe** (wiroprądowe, pojemnościowe, indukcyjne, elektromagnetyczne), **czujniki optyczne, czujniki mikrofonowe [7], a także czujniki fotoelektryczne, strunowe i inne [8]**.

Instrumenty geodezyjne. Spośród geodezyjnych urządzeń i metod, do pomiarów dynamicznych obiektów wysokich stosuje się: tachymetry elektroniczne; odbiorniki satelitarne GNSS; systemy detekcji wiązki lasera.

Zrobotyzowane tachymetry elektroniczne wyposażone w serwomotory (silniki umożliwiające zdalny pomiar) wykorzystują funkcję automatycznego śledzenia przemieszczającego się tzw. pryzmatu dalmierczego. Mogą rejestrować pozycję przestrzenną poruszającego się pryzmatu (3D wyznaczać zmiany w trzech osiach) lub jego kierunek (1D zmiany po jednej osi). Ograniczeniami dla częstotliwości próbkowania są: prędkość pracy serwomotorów, prędkość automatycznego pomiaru kąta i odległości oraz prędkość zapisu i transmisji danych. Prace tych urządzeń ograniczają: opady, mgła i silne nasłonecznienie. Nominalna częstotliwość próbkowania tachymetrów wynosi do 10 Hz.

Precyzyjne odbiorniki satelitarne GNSS mogą wyznaczać pozycję 3D anteny montowanej na szczycie obiektu. Aby uzyskać jak najdokładniejsze wyniki, należy stosować dwa odbiorniki

ki dwuczęstotliwościowe (w sąsiedztwie obiektu i na obiekcie), które wyznaczają pozycję z częstotliwością $10 \div 20$ Hz, a specjalne – do 100 Hz. W celu zapewnienia odpowiedniej wiarygodności nieba należy unikać przesłonięcia horyzontu przez konstrukcję komina, której sąsiedztwo może spowodować efekt wielotorowości sygnału GNSS.

Skutecznym rozwiązaniem jest również **system detekcji wiązki laserowej metodą realizującą tzw. stałą prostą** (wyznaczenia różnicy pozycji padania wiązki laserowej od stanu wyjściowego) [9]. W stacjonarnej wiązce promienia umieszcza się matrycę CCD (zasada działania podobna jak w kamerze cyfrowej) powiązaną z drgającym obiektem. System, wykonując analizę ruchu plamki lasera po matrycy, wyznacza przemieszczenia w dwóch kierunkach. Rozwiązanie pracuje z częstotliwością 56 Hz i błędem 0,01 mm/m.

Metody teledetekcyjne. Wspólną cechą metod teledetekcyjnych jest bezkontaktowy, zdalny pomiar z pewnej odległości (w uproszczeniu metoda polega na wysyłaniu sygnału i analizie powrotnego echa). Wyróżnia się systemy **lidarowe** (wibrometry laserowe) oraz **radarowe** (radary interferometryczne). Wibrometry wykorzystują diody laserowe w paśmie światła widzialnego i podczerwieni. W celu bezpośredniego wyznaczenia przemieszczeń wykorzystywany jest pomiar fazy sygnału, natomiast prędkości – efekt Dopplera. Częstotliwość próbkowania wibrometrów stosowanych do pomiarów obiektów inżynierskich wynosi ok. 2,5 kHz, a zasięg do 300 m (co powoduje, że konieczne jest stosowanie folii odbłaskowych na obiekcie). Urządzenie realizuje pomiar jednopunktowy. Naziemne radary interferometryczne służą do pomiaru przemieszczeń statycznych i dynamicznych obiektów budowlanych. Przykładowo System IBIS [10] wyznacza przemieszczenia jako różnice faz fali wysyłanej przez radar i odbitej od obiektu. Radar próbkuje z częstotliwością do 200 Hz, ma rozdzielczość maksymalną 0,5 m i zasięg – 1 km. Obserwacji może podlegać wiele punktów jednocześnie. Błąd pomiaru przemieszczenia wynosi poniżej 0,1 mm, pod warunkiem zapewnienia silnego odbicia fali radarowej

od obiektu. Pomiary przemieszczeń prowadzone są tylko w kierunku osi radaru.

Wyznaczenie charakterystyk dynamicznych komina stalowego

W artykule zaprezentujemy praktyczne zastosowanie kilku omówionych metod oraz rezultaty pomiarów przeprowadzonych w celu wykonawczej weryfikacji charakterystyk dynamicznych konstrukcji nowego, 60-metrowego komina stalowego (fotografia) podczas montażu i strojenia systemu tłumików masowych drgań.

Strojenie tłumików wynika z nieznacznych różnic pomiędzy obliczeniowymi i rzeczywistymi wartościami częstotliwości drgań własnych komina i pozwala skutecznie wygaszać drgania rezonansowe. W pomiarach wykorzystano: radar IBIS-S, tachymetr MultiStation MS50 oraz przyspieszoniomierz (akcelerometr) 3-osiowy typu MEMS, opracowany na bazie podzespołów elektronicznych dostępnych na rynku. Radar interferometryczny wykonywał pomiar z częstotliwością 165 Hz. Pomiar tachymetryczny z rzeczywistą częstotliwością próbkowania 5,5 Hz zrealizowano przez obserwację pryzmatu dalmierczego zamontowanego na szczycie komina. Czujnik MEMS próbował z częstotliwością 50 Hz. Pomiary realizowano w przypadku drgań komina nietłumionego oraz po uruchomieniu tłumików drgań. Metodą regresji nieliniowej wpasowano funkcję harmoniczną tłumioną, wyznaczając częstotliwości drgań własnych oraz LDT. Szczegółowy opis metodyki pomiarów, przetwarzania i analizy danych przedstawiono w [11]. Równanie funkcji, którą wpasowano w zarejestrowane przebiegi czasowe, ma postać:

$$y = A \cdot \exp(-\beta t) \cdot \sin(\omega t + \varphi) + c \quad (1)$$

gdzie:

A – amplituda maksymalna;
 β – współczynnik tłumienia drgań;
 t – czas;
 ω – częstość kołowa drgań;
 φ – faza;
 c – składnik stały sygnału.

Na potrzeby wyznaczenia częstotliwości drgań własnych f oraz LDT Λ komina szczególnie istotne było określenie wartości β i ω . Charakterystyki dynamiczne, wraz z ich błędami m_f i m_{Λ} , ob-



Obiekt pomiaru – 60-metrowy komin stalowy i urządzenia mierzące – tachymetr MultiStation MS50 (a); radar IBIS S (b) oraz przyspieszeniometer 3-osiowy typu MEMS na najwyższej galerii komin (c)

[Fot. – Autor]

Measurement object – 60-meter steel chimney and measuring devices – tachymeter MultiStation MS50 (a); radar IBIS S (b) and 3-axis accelerometer MEMS on top gallery chimney (c)

Wyniki wyznaczenia częstotliwości drgań oraz LDT komin stalowego

The results determine the frequency of vibration and LDT steel chimney

Stan tłumików	IBIS		MS50		MEMS	
	f [Hz]	m _r [%]	f [Hz]	m _r [%]	f [Hz]	m _r [%]
Nieaktywne	0,905	0,01	0,905	0,14	0,905	0,02
Wstępnie dostrojone	0,926	0,01	0,918	0,50	0,925	0,03
Ostatecznie dostrojone	0,922	0,03	0,894	0,57	0,924	0,10
	Λ	m _Λ [%]	Λ	m _Λ [%]	Λ	m _Λ [%]
Nieaktywne	0,038	0,3	0,062	13	0,035	3
Wstępnie dostrojone	0,13	0,2	0,17	17	0,13	2
Ostatecznie dostrojone	0,22	0,6	0,22	16	0,22	3

liczono dla różnych ustawień tłumików, na podstawie obserwacji z różnych instrumentów. Wartości uśredniono z kilku rejestracji (tabela).

Wnioski

Wszystkie instrumenty pozwoliły na wyznaczenie wartości częstotliwości i LDT (logarytmicznego dekrementu tłumienia) drgań, a tym samym na dostrojenie tłumików i zweryfikowanie poprawności ich działania. Różnice wynikają z niejednakowej dokładności pomiaru i częstotliwości próbkowania. Wyniki uzyskane z użyciem radaru i akcelerometru spełniają wymagania normy [6] dotyczące częstotliwości próbkowania i błędu wyznaczenia charakterystyk dynamicznych. Są one zgodne w zakresie 0,01 Hz (częstotliwość) i 0,01 (LDT). W przypadku tachymetru MS50 uzyskane wartości częstotliwości i LDT różnią się nieznacznie od pozostałych, ale w większości przypadków również spełniają wymagania [6]. Zgodnie z tą normą tachymetr pozwala na wyznaczenie częstotliwości drgań nie wyższych niż 1,1 Hz, choć na podstawie twierdzenia Kotelnikowa-Shannona o próbkowaniu sygnału ta graniczna częstotliwość wynosi 2,75 Hz.

Przedstawione metody pokazały, że przy obecnym poziomie aparatury wyznaczanie podstawowych, dynamicznych charakterystyk konstrukcji wieżowych pozwala uzyskać parametry z zadowalającą dokładnością.

Badania sfinansowano w ramach badań statutowych AGH nr 11.11.150.005.

Literatura

- [1] PN-EN 1990:2004. Eurokod. Podstawy projektowania konstrukcji.
- [2] PN-EN 1991-1-4:2008. Eurokod 1. Oddziaływania na konstrukcje. Część 1-4: Oddziaływania ogólne. Oddziaływanie wiatru.
- [3] PN-EN 1993-1-9:2007. Eurokod 3. Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1-9: Zmęczenie.
- [4] PN-EN 1993-3-2:2008. Eurokod 3. Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 3-2: Wieże, maszty i komin. Komin.
- [5] PN-EN 13084-1:2007. Komin wolno stojące. Część 1: Wymagania ogólne.
- [6] ISO 4866:2010. Mechanical vibration and shock. Vibration of fixed structures. Guidelines for the measurement of vibrations and evaluation of their effects on structures.
- [7] Cichoń P., Stosiak M.: Zastosowanie wibrometru laserowego do pomiaru drgań stołu symulatora liniowego napędu hydrostatycznego. Napędy i Sterowanie, nr 5, 2012, str. 66 – 72.
- [8] Fraden J.: Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs, and Applications. Springer, 2010.
- [9] Jaśkowski W., Jóźwik M.: Zastosowanie komputerowego systemu detekcji wiązki laserowej w pomiarach geodezyjnych. Geodezja, nr 12 (2/1), 2006, str. 235 – 245.
- [10] Gocał J., Ortyl Ł., Owerko T., Kuras P., Kocierz R., Cwiakala P., Puniach E., Sukta O., Bałut A.: Determination of displacement and vibrations of engineering structures using ground-based radar interferometry. Wydawnictwa AGH, Kraków, 2013.
- [11] Kuras P., Ortyl Ł., Kędziński M., Podstolak P.: Vibration measurements of steel chimneys equipped with mass dampers, using interferometric radar, robotic total station and accelerometer. Pomiary Automatyka Kontrola, nr 12, 2014, s. 1090 – 1095.

Przyjęto do druku: 14.08.2015 r.