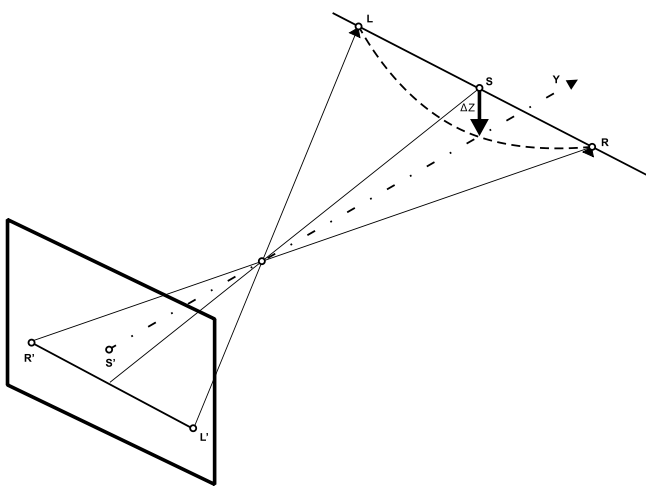


# Wykorzystanie techniki wideo do pomiaru okresu drgań własnych kominów

Dr inż. Paweł Gałek, Politechnika Krakowska

## 1. Wprowadzenie

W obliczeniach projektowych, analizach oraz badaniach stanu technicznego konstrukcji narażonych na oddziaływanie dynamiczne potrzebna jest znajomość ich właściwości dynamicznych, to jest częstotliwości drgań własnych (lub ich spektrum), postaci drgań oraz tłumienia. Konstrukcjami szczególnie narażonymi na ciągłe wpływy dynamiczne są konstrukcje wieżowe (komin, maszty) oraz mosty. W konstrukcjach wieżowych wzbudzenia dynamiczne powodowane są najczęściej przez wiatr. Na terenach górniczych lub sejsmicznych dodatkowo mogą występować oddziaływania związane z ruchem



Rys. 1. Zasada fotogrametrii jednoobrazowej

podłoża. W konstrukcjach mostowych wzbudzenia dynamiczne powodowane są głównie ruchem pojazdów. Oszacowanie parametrów dynamicznych na etapie projektowania jest trudne i zwykle obarczone błędami, wynikającymi z przyjętych w modelu teoretycznym założeń (uproszczeń). Przyjmowane do modelu cechy sprężyste i wytrzymałości materiałów, rozkład mas czy warunki posadowienia (model podłoża gruntowego) odbiegają od rzeczywistych warunków. Dlatego istotnego znaczenia nabierają pomiary parametrów dynamicznych konstrukcji w ich naturalnej skali.

Metody pomiaru drgań (przemieszczeń) w czasie, których wyniki pozwalają wyznaczyć podstawowe parametry

dynamiczne konstrukcji, można podzielić, między innymi, ze względu na umiejscowienie aparatury pomiarowej na: montowane na obiekcie oraz umieszczone poza obiektem. Z uwagi na często utrudniony dostęp szcze-gólnego znaczenia nabierają metody pomiaru aparaturą zlokalizowaną poza obiektem. Jedną ze znanych metod jest pomiar za pomocą radaru interferometrycznego [1]. Do pomiaru przemieszczeń liniowych lub płaskich w czasie z powodzeniem można zastosować technikę wideo.

## 2. Pomiary przemieszczeń techniką wideo

W pomiarach przemieszczeń za pomocą techniki wideo wykorzystuje się metodę fotogrametrii jednoobrazowej. Metoda ta pozwala odczytać przemieszczenia liniowe lub płaskie punktu, jeśli znane jest położenie dwóch punktów odniesienia lub znana jest odlegość



Rys. 2. Kamera Phantom v12.1 (źródło: <http://modernist-cuisine.com/2010/11/high-speed-video-phantom-v-12-1>)

między tymi punktami. Położenie punktów odczytywane jest z ekranu (matrycy), na który rzutowany jest obraz „widziany” przez urządzenie (kamerę). Do określenia przemieszczeń stosuje się metodę par czasowych – przyrost współrzędnych pomiędzy dwoma momentami czasu (rys. 1). W celu wyznaczenia okresu drgań własnych wystarczy zmierzyć czas pomiędzy zmianami kierunku ruchu bez konieczności dokładnego pomiaru samego przemieszczenia – wystarczy jego wartość szacunkowa. Jednak, aby określić tłumienie, niezbędny jest dokładny pomiar wartości przemieszczenia. Dokładność pomiaru wideo przemieszczeń w czasie ograniczona jest rozdzielczością matrycy urządzenia

(kamery wideo, aparatu cyfrowego z możliwością nagrywania sekwencji wideo) oraz liczbą klatek obrazu rejestrowanych w ciągu określonego przedziału czasu (tzw. tryb klatkowania lub framerate). Jednostką trybu klatkowania jest liczba klatek rejestrowanych w ciągu sekundy (kl./s lub fps – frames per second). Popularne cyfrowe kamery HD dysponują obecnie trybem 25 lub 50 kl./s. Umożliwia to pomiar okresu drgań z dokładnością do 0,02 sek. W przypadku pomiarów dotyczących konstrukcji, zwłaszcza konstrukcji smukłych (kominy, maszty, mosty), jest to dokładność wystarczająca. W innych zastosowaniach można posłużyć się dostępnymi kamerami high-speed, które umożliwiają klatkowanie nawet 1 mln kl./s (np. Phantom v12.1 – rysunek 2). Wadą kamer high-speed jest ich bardzo wysoka cena.

### 3. Pomiary okresu drgań własnych komina żelbetowego

#### 3.1. Wzbudzenie drgań komina

Dużym problemem podczas badań właściwości dynamicznych kominów jest wzbudzenie drgań tak masywnych konstrukcji. Drgania mogą być wzbudzone w sposób naturalny lub sztuczny. Naturalną przyczyną powstawania drgań są działanie wiatru, trzęsienia ziemi oraz wstrząsy parasejsmiczne spowodowane działalnością człowieka. Wzbudzenia sztuczne to celowe działania podjęte w celu wywołania drgań w trakcie przeprowadzania badań, np. nagłe zerwanie napiętej liny przymocowanej do trzonu komina [2] czy uderzenie w trzon komina.

#### 3.2. Opis badania

Przedmiotem badania był komin żelbetowy o wysokości  $H = 260$  m, zlokalizowany w Krakowie w Elektrociepłowni Łęg. Do badań użyto kamery Canon Legria HF G10 działającej w trybie Full HD (1920 x 1080) z zapisem 25 klatek na sekundę – dokładność pomiaru czasu wynosi 0,04 s. W badaniach wideo wykorzystano wzbudzenia naturalne spowodowane wiatrem. Pomiar przeprowadzono w wietrzny dzień ustawiając kamerę prostopadle do kierunku działania wiatru w odległości około 580 m od komina (rys. 3).

Należy zaznaczyć, że nie sposób zachować kierunku ustawienia kamery prostopadle do kierunku działania wiatru, z uwagi na jego zmienność. Kierunek pomiaru ma wpływ na wartości przemieszczeń, jednak celem badania jest pomiar czasu między kolejnymi amplitudami drgań. W przypadku pomiaru tłumienia konieczne stają się precyzyjne pomiary przemieszczeń. Wówczas można zastosować pomiar z dwóch wzajemnie prostopadłych kierunków, a następnie dokonać ich złożenia. Innym rozwiązaniem tego problemu jest ustawienie kamery w kierunku prostopadłym do płaszczyzny wylotu komina. W tym celu można posłużyć się zaawansowanym technicznie dronem, który umożliwi „zawieszenie” kamery ponad wylotem komina (rys. 4).



**Rys. 3.** Widok satelitalny miejsca pomiaru (źródło: Google Maps)

Do dziś nie wykonywano prób pomiarów wideo przy użyciu drona. Nie są więc znane możliwości unieruchomienia w jednym miejscu, jakie mają tego typu urządzenia. Problem ten wymaga rozwiązania.

Sam pomiar polega na rejestracji wideo dużego zbliże-



**Rys. 4.** Pomiar przemieszczenia na rzucie wylotu komina oraz dron z kamerą

nia konstrukcji, jej elementu lub jego części. W przedmiotowych badaniach była to głowica komina. Każda zarejestrowana w postaci cyfrowej klatka filmu ma swoje oznaczenie czasowe. Nagrany film jest następnie analizowany przez badającego w programie do edycji strumienia wideo – w tym przypadku był to program Sony Vegas Pro 11. Na podstawie obserwacji filmu, klatka po klatce, zbierane są dane w arkuszu kalkulacyjnym zawierające wartość i kierunek przemieszczenia między dwoma odczytami oraz czas tych odczytów. Przemieszczenia określane są na podstawie odczytu położenia głowicy na dwóch klatkach filmu z wykorzystaniem zasady fotogrametrii jednoobrazowej w celu wyznaczenia ich rzeczywistej miary. Jako stałe punkty odniesienia przyjęto skrajne punkty głowicy komina, których odległość w trakcie pomiarów się nie zmienia. Zebrane dane podlegają dalej analizie spektralnej pozwalającej określić okres  $T$  drgań własnych, którego wartość wyniosła 6,12 s. Wartość ta jest porównywalna z wartościami otrzymanymi przez innych badaczy, którzy stosowali pomiar radarem interferometrycznym – wartość  $T = 6,67$  s [1] lub pomiar tensometryczny – wartość  $T = 5,96$  s [2].

#### 4. Podsumowanie

Zastosowanie metody wideo do pomiaru okresu drgań własnych daje zadowalające rezultaty, porównywalne z rezultatami otrzymanymi innymi metodami. Pomiar wideo umożliwia określenie parametrów dynamicznych konstrukcji trudno dostępnych. Jednocześnie jest to metoda prosta, nie wymagająca specjalistycznego sprzętu. Wadą tego rozwiązania jest bardzo czasochłonna procedura zbierania danych z filmu. Dlatego

konieczne, dla usprawnienia tej metody, staje się opracowanie oprogramowania, które pozwoli na automatyzację analizy materiału wideo.

#### BIBLIOGRAFIA

- [1] Gocał J. i in., Precyzyjne pomiary drgań budowli przy użyciu naziemnego radaru interferometrycznego. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, Vol. 19, 2009, s. 123-141  
 [2] Oruba R., Badania właściwości dynamicznych wysokich kominów żelbetowych. *Inżynieria Środowiska*, Tom 11, Zeszyt 1, 2006, s. 71-78

# Badania statystyczne losowej zmienności cech wytrzymałościowych stałowych wyrobów hutniczych

Prof. dr hab. inż. Marian Gwóźdź, mgr inż. Piotr Woźniczka, Politechnika Krakowska

## 1. Wprowadzenie

Podstawowym założeniem obliczeń inżynierskich współczesnych konstrukcji budowlanych jest akceptacja imperfekcji (por. np. praca [1]). W szczególności w konstrukcjach prętowych występują imperfekcje rzeczywiste w postaci naprężeń własnych, nieprostoliniowość i przechyły słupów, brak współosiowości w stykach montażowych, naprężenia montażowe oraz losowa sztywność połączeń. W obliczeniach inżynierskich wg Eurokodu 3 (por. norma PN-EN 1993-1-1 [1]), zamiast wieloźródłowych imperfekcji rzeczywistych, uwzględnia się zastępcze imperfekcje geometryczne, które rekompensują wpływy imperfekcji rzeczywistych.

Odrębną od opisanej wyżej grupę imperfekcji stanowią imperfekcje przekrojów i cech mechanicznych wyrobów hutniczych, które obejmują odchyłki kształtu i odchyłki wymiarów liniowych od wartości nominalnych. Zmienność losowa wytrzymałości materiału  $\underline{R}(x)$ , a w szczególności wariancja wytrzymałości  $\mu_{R_n}^2$ , wg interpretacji przyjętej w Polsce w latach 70. ub. wieku dla wyrobów stałowych (por. Sowa A. [2], Murzewski J.  $\bar{R}_1(x), \dots, \bar{R}_i(x), \dots, \bar{R}_n(x)$  [3]), wynika głównie z rozbieżności wartości średnich w populacji prętów nominalnie identycznych. Jedynie niewielką część wariancji ogólnej  $\mu_{R_n}^2$  przypisywano wahaniom lokalnej wytrzymałości  $R_n(x)$  wokół wartości średniej  $\bar{R}_n(x)$ . Definiując w tamtym okresie model matematyczny właściwości mechanicznych stali konstrukcyjnych, Murzewski J. [3] zaproponował

trzy poziomy niejednorodności wytrzymałości stałowych wyrobów hutniczych:

- niejednorodność statystyczną (a),
- niejednorodność probabilistyczną (b),
- niejednorodność stochastyczną (o).

Konsekwencją założonej wielopoziomowej niejednorodności cech mechanicznych materiału jest trójskładnikowa struktura formuły losowej wytrzymałości stali:

$$\underline{R}(x) = \bar{R} + \Delta R + \delta R(x) \quad (1)$$

gdzie

$\bar{R}$  – średnia wartość cechy mechanicznej wyrobu hutniczego należącego do jednej grupy asortymentowej, dla której w normach hutniczych określono jednakowe wartości nominalne (por. np. norma PN-EN 10025 [2]),  
 $\Delta R$  – odchyłki średniej cechy mechanicznej wyrobów o długościach handlowych od wartości oczekiwanej  $\bar{R}$  dla normowej grupy asortymentowej,  
 $\delta R(x)$  – scentralizowane pole stochastyczne lokalnych cech wytrzymałościowych dla blach lub scentralizowany rozkład stochastyczny wzdłuż długości pręta, opisany wariancją  $\mu_0^2$  i funkcją autokorelacyjną  $\rho(\Delta x)$ ,  
 $\Delta x$  – odległość punktów wyrobu hutniczego, w których bada się lokalną cechę mechaniczną.

Ponadto Murzewski J. [3] założył, że funkcja losowa  $\underline{R}(x)$  jest stacjonarna i normalna z natury zjawiska, względnie znormalizowana dla potrzeb obliczeń statystycznych. W konsekwencji postulowanych rozkładów normalnych oraz uwzględnianych poziomów niejednorodności,