

## **Porównanie obliczonych i pomierzonych techniką GPS charakterystyk dynamicznych komina przemysłowego**

**Tadeusz Chmielewski<sup>1</sup>, Piotr Górski<sup>2</sup>, Peter Breuer<sup>3</sup>, Eduard Konopka<sup>4</sup>**

<sup>1,2</sup> *Katedra Mechaniki Budowli, Wydział Budownictwa, Politechnika Opolska,  
e-mail: t.chmielewski@po.opole.pl, <sup>2</sup>p.gorski@po.opole.pl*

<sup>3</sup> *Stuttgart University of Applied Sciences, Stuttgart, Germany, e-mail: peter.breuer@hft.stuttgart.de*

<sup>4</sup> *Stuttgart University of Applied Sciences, Stuttgart, Germany,  
e-mail: eduard.konopka@hft.stuttgart.de*

**Streszczenie:** Celem badań było porównanie wyników obliczeń postaci i częstości drgań własnych komina przemysłowego nr 1 Elektrowni Bełchatów, z uwzględnieniem i bez uwzględnienia podatności podłoża gruntowego, z wynikami badań eksperymentalnych tych wielkości wykonanych w czasie dwóch sesji pomiarowych w dniach 1-3.12.2008r. i 20-24.05.2011r. Trzy anteny typu „rover” rozmieszczono na trzech różnych wysokościach po zewnętrznej stronie komina. Pomierzone przemieszczenia wywołane wpływem wiatru pozwoliły na określenie tylko podstawowej postaci i częstości drgań własnych, współczynników tłumienia i maksymalnych przemieszczeń, dla określenia których zastosowano proces filtracji. Wielkości pomierzone są ważne w ocenie stanu technicznego komina. Uzyskano dobrą zgodność wyników obliczeń i wyników uzyskanych doświadczalnie dla pierwszej postaci i częstości drgań własnych.

**Słowa kluczowe:** komin przemysłowy, zagadnienie własne, pomiary przemieszczeń, GPS, charakterystyki dynamiczne.

### **1. Wprowadzenie**

W niniejszym artykule jako cel badań przyjęto porównanie wyników obliczeń drgań własnych komina przemysłowego nr 1 Elektrowni Bełchatów, z uwzględnieniem i z pominięciem podatności podłoża gruntowego, z wynikami badań doświadczalnych tych wielkości wykonanymi w czasie dwóch sesji pomiarowych w grudniu 2008r. i w maju 2011r. Badania doświadczalne wykonano techniką GPS. Trzy odbiorniki typu „rover” rozmieszczono na trzech różnych wysokościach po zewnętrznej stronie komina. Pomierzone przemieszczenia wywołane wpływem wiatru, pozwoliły na określenie podstawowej postaci i częstości drgań własnych, współczynników tłumienia i maksymalnych przemieszczeń, dla określenia których zastosowano proces filtracji. Wymienione wielkości są wielkościami istotnymi dla oceny stanu technicznego wysokiego komina przemysłowego. Uzyskana dobra zgodność wyników obliczeń i wyników uzyskanych doświadczalnie dla pierwszej postaci i częstości drgań własnych potwierdza słuszność stosowania techniki GPS do badań dynamicznych konstrukcji budowlanych.

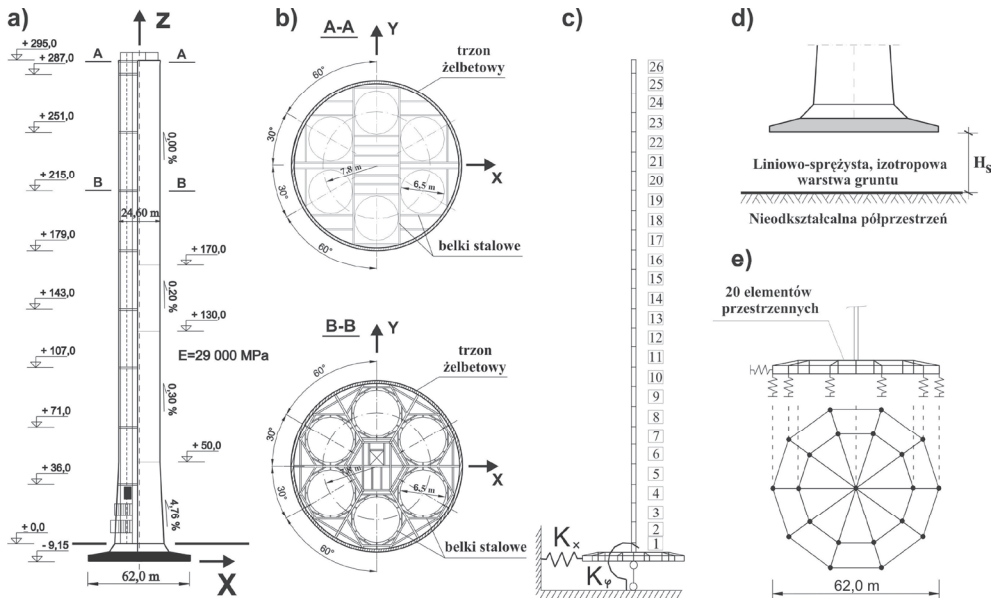
## 2. Analiza numeryczna drgań własnych kominia

### 2.1. Opis konstrukcji kominia

Konstrukcję sześcioprzewodowego kominia tworzy trzon żelbetowy o wysokości 295 m i zmiennej wzdłuż wysokości grubości ściany. Średnica zewnętrzna trzonu zmienia się wzdłuż wysokości zgodnie ze zmianą jego zbieżności i wynosi od 30,0 m u podstawy trzonu do 24,60 m w górnej jego części. Wewnątrz trzonu żelbetowego znajdują się stropy o konstrukcji zespolonej stalowo - żelbetowej, głównie w odstępach co 36,0 m. Do odprowadzania spalin służy sześć samonośnych przewodów dymowych. Komin posadowiony jest na żelbetowej płycie fundamentowej, której podstawa ma kształt koła o średnicy 62,0 m i grubość około 5,65 m. Głębokość posadowienia wynosi 9,15 m poniżej poziomu terenu.

Ogólny widok kominia przemysłowego nr 1, jego przekrój podłużny i przekroje poprzeczne przedstawiono na Rys. 1 a i b.

Na podstawie zaprojektowanej marki betonu trzonu kominia oszacowano wartość modułu sprężystości betonu na całej wysokości kominia  $E=29000$  MPa.



Rys. 1. Komin przemysłowy nr 1 Elektrowni Bełchatów: a) widok ogólny i przekrój podłużny, b) przekrój poprzeczny A-A i B-B, c) dyskretyzacja trzonu kominia i model więzi sprężystych dopuszczających ruch poziomy i obrotowy fundamentu, d) przyjęty model podłoża gruntowego pod fundamentem kominia, d) model obliczeniowy i dyskretyzacja fundamentu

### 2.2. Przyjęty model obliczeniowy i rozwiązanie zagadnienia własnego

Analizę dynamiczną kominia w zakresie drgań własnych wykonano przy założeniu liniowej i sprężystej pracy konstrukcji.

Model obliczeniowy kominia otrzymano stosując procedurę metody elementów skończonych. Trzon kominia podzielono na 26 jednowymiarowych elementów skończonych głównie o wysokości 12,0 m (Rys. 1 c). Przyjęto element belkowy o dwóch stopniach swobody w węzle z uwzględnieniem wpływu sił osiowych w celu określenia macierzy

sztynności elementu. Macierz mas tego elementu utworzono sposobem mas skupionych. W macierzy tej uwzględniono: masę trzonu, masę stropów, masę sześciu przewodów i masę galerii zewnętrznych. Fundament komina o średnicy 62 m podzielono na 20 elementów przestrzennych o ośmiu węzłach wierzchołkowych (Rys. 1 e), z których każdy miał trzy translacyjne stopnie swobody, tj. dwa w poziomie i jeden w pionie. W przyjętym modelu obliczeniowym, analiza drgań komina tylko w jednej płaszczyźnie (X-Z) lub (Y-Z), pozwoliła na ograniczenie liczby stopni swobody węzłów fundamentu do dwóch, tj. w poziomie i w pionie.

W celu uwzględnienia podatności podłoża gruntowego pod fundamentem komina założono, że fundament posadowiony jest na skończonej, izotropowej, liniowo-sprężystej warstwie gruntu, która z kolei oparta jest na nieodkształcalnej półprzestrzeni (Rys. 1 d) i dopuszczono ruch poziomy i obrotowy płyty fundamentowej. Statyczne współczynniki sztywności podłoża gruntowego  $K_x$  i  $K_\varphi$  zaproponował *Kausel* [1] w postaci następujących wyrażeń:

$$K_x = \frac{8GR_0}{2-\nu} \left( 1 + \frac{R_0}{2H_s} \right), \quad K_\varphi = \frac{8GR_0^3}{3(1-\nu)} \left( 1 + \frac{R_0}{6H_s} \right), \quad (1)$$

gdzie:  $G$  jest modułem odkształcalności postaciowej podłoża,  $R_0$  jest promieniem podstawy fundamentu,  $H_s$  oznacza wysokość warstwy gruntu odkształcalnego, zaś  $\nu$  jest współczynnikiem Poissona.

W obliczeniach uwzględniono wpływ bezwładności podłoża gruntowego na drgania fundamentu komina, przyjmując zastępczą masę podatnego podłoża gruntowego i jego masowy moment bezwładności, zgodnie z propozycją *Whitman'a* [2]:

$$M_x = \frac{0,76\rho R_o^3}{2-\nu}, \quad M_\varphi = \frac{1,92\rho R_o^5}{3(1-\nu)}, \quad (2)$$

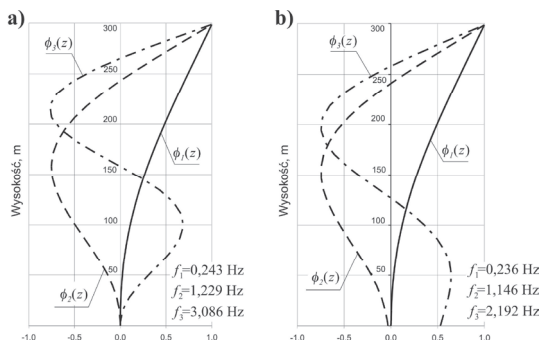
gdzie  $\rho$  jest gęstością podłoża gruntowego.

Do analizy numerycznej, na podstawie dokumentacji geologicznej komina, przyjęto rzeczywiste podłożę gruntowe występujące pod fundamentem komina, tj. piaski średnio zagęszczone, dla których  $\nu=0,30$ ;  $\rho=1700 \text{ kg/m}^3$ ;  $G=106,25 \text{ MPa}$ .

Zagadnienie własne dla układu o skończonej liczbie stopni swobody ma postać, [3]:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{K}\mathbf{q} = \mathbf{0} \quad (3)$$

gdzie:  $\mathbf{M}$ ,  $\mathbf{K}$ ,  $\mathbf{q}$  oznaczają odpowiednio macierz bezwładności, macierz sztywności i poszukiwany wektor przemieszczeń rozpatrywanego modelu obliczeniowego komina.



Rys. 2. Trzy pierwsze częstotliwości i postacie drgań własnych modelu obliczeniowego komina: a) z założeniem pętnego utwierdzenia podstawy fundamentu, b) z uwzględnieniem podatności podłoża gruntowego

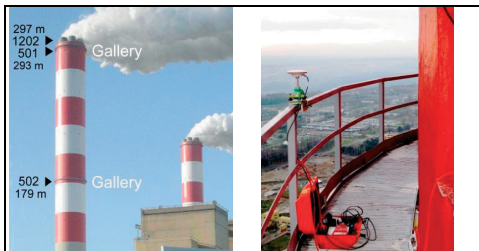
Obliczenia zagadnienia własnego wykonano za pomocą programu komputerowego SAP 90+. W toku obliczeń, sztywność obrotową  $K_\phi$  zastąpiono szeregiem liniowych więzi sprężystych pionowych, zaczepionych w węzłach dyskretyzacji u podstawy fundamentu i przyjęto ruch wszystkich węzłów wokół osi obrotu (Rys. 1 e). Analizę wykonano także dla modelu obliczeniowego, w którym założono pełne utwierdzenie podstawy fundamentu.

Trzy pierwsze częstości i postacie drgań własnych dla modelu obliczeniowego z założeniem pełnego utwierdzenia podstawy fundamentu i z uwzględnieniem podatności podłoża gruntowego przedstawiono na Rys. 2.

### 3. Pomiary drgań wymuszonych kominą powodowanych wiatrem

#### 3.1. Zestaw pomiarowy GPS i jego rozmieszczenie na kominie

Pomiary wykonano za pomocą czterech odbiorników należących do systemu Leica GPS, tj. dwóch Leica GPS 500 (oznaczonych numerami 501, 502) i dwóch Leica GPS 1200 (oznaczonych numerami 1201, 1202), rejestrujących przemieszczenia z częstością do 10 Hz. Wykonano dwie sesje pomiarowe, tj. w dniach 1-3.12.2008r. i 20-24.05.2011r. Na Rys. 3 i 4 przedstawiono lokalizację odbiorników ruchomych na kominie i sposób ich instalacji w czasie dwóch sesji pomiarowych. Sposób instalacji anten GPS w punktach pomiarowych kominą, warunki odbioru sygnałów satelitarnych i warunki meteorologiczne w czasie dwóch sesji pomiarowych przedstawiono w pracy [4].



Rys. 3. Lokalizacja 3 anten GPS typu „rover” na kominie i sposób ich instalacji do barierki galerii zewnętrznych w dniach 1-3.12.2008r.



Rys. 4. Lokalizacja 3 anten GPS typu „rover” na kominie i sposób ich instalacji do elementów poziomych w dniach 20-24.05.2011r.

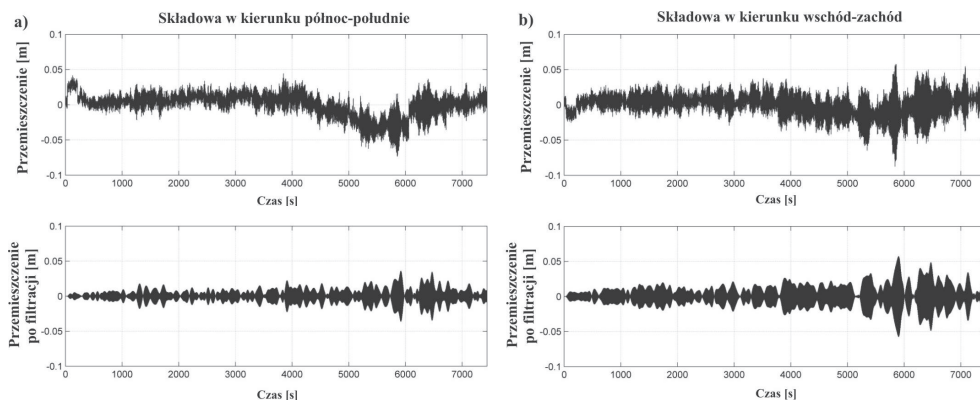
#### 3.2. Wyniki pomiarów z dnia 1.12.2008 r.

Na Rys. 5 przedstawiono wyniki pomiarów przemieszczeń wierzchołka kominą w płaszczyźnie poziomej spowodowanych działaniem wiatru w kierunku północ-południe i wschód-zachód. Pomiary wykonano z częstotliwością próbkowania 10 Hz w dniu 1.12.2008r. w czasie od 14:31:00 do 16:35:00 (124 minuty). Prędkość wiatru mierzona na wysokości wierzchołka kominą została oszacowana w przedziale od 18 do 26 m/s, zaś średni azymut wiatru wyniósł  $150^0$ , co oznacza wiatr południowo-wschodni.

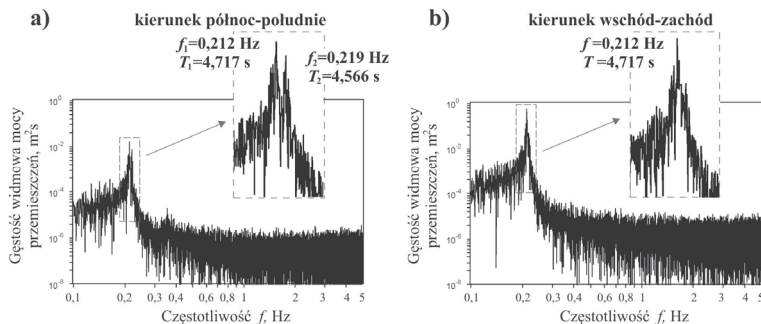
Wyniki pomiarów przemieszczeń przedstawione na Rys. 5 (pierwsze rysunki a i b) zawierają błędy pomiarowe systemu GPS (pseudo-drgania), które mogą być wywołane następującymi zjawiskami, tj.: zasłanianiem odbioru sygnałów satelitarnych przez kominą, błędem atmosferycznym (błędem jonosfery i troposfery), błędem wzajemnego ustawienia satelitów, błędem wielotorowości i błędem odbiornika. W pracy [5] wykazano, że błędy pomiarowe systemu GPS mają charakter losowych drgań o małych i większych okresach, które można opisać matematycznie jako procesy stochastyczne stacjonarne o właściwościach ergodycznych. Znając charakterystyki widmowe błędu losowego i znając

częstości drgań własnych budowli można dokonać odfiltrowania tych błędów od pomiarów przemieszczeń drgającej konstrukcji.

Ze względu na czas trwania zarejestrowane przemieszczenia umożliwiają określenie częstotliwości drgań swobodnych komina za pomocą szybkiej transformacji *Fouriera* (Rys. 6). Na wykresach widoczna jest wyraźna dominacja wartości maksymalnych, które na osi odciętych odpowiadają częstościom drgań swobodnych komina 0,212 Hz i 0,219 Hz. W celu ograniczenia wpływu błędów pomiarowych systemu GPS wykonano filtrację przemieszczeń za pomocą filtru Chebysheva typ 1, pasmowo-przepustowego dla częstości w przedziale 0,205 – 0,225 Hz. Przeszaczenia punktu wierzchołkowego komina po filtracji przedstawiono na Rys. 5 (drugie rysunki a i b).



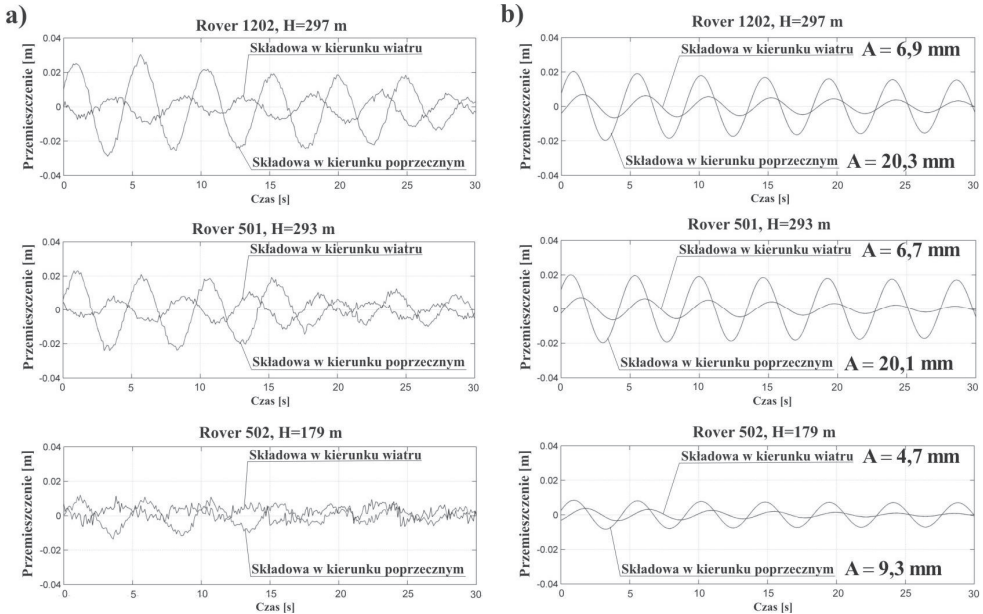
Rys. 5. Przeszaczenia punktu wierzchołkowego komina Elektrowni Bełchatów zarejestrowane z częstością próbkowania 10 Hz w czasie od 14:31:00 do 16:35:00 w dniu 1.12.2008r. przed i po filtracji w kierunkach: a) północ-południe i b) wschód-zachód



Rys. 6. Wykresy funkcji gęstości widmowej odpowiedzi wierzchołka komina Elektrowni Bełchatów w dniu 1.12.2008r. przed i po filtracji w kierunkach: a) północ-południe i b) wschód-zachód

W czasie badań wykonano krótkotrwałe cykle pomiarowe, trwające 3 minuty i 50 sekund każdy, za pomocą trzech odbiorników GPS zainstalowanych na różnych wysokościach komina, tj. 297, 293 i 179 m. Wszystkie odbiorniki rejestrowały dane jednocześnie w tych samych odstępach czasu z częstością próbkowania 10 Hz. Wyniki pomiarów dynamicznych przemieszczeń komina w płaszczyźnie poziomej spowodowanych działaniem wiatru w kierunku jego działania i w kierunku poprzecznym z dnia 1.12.2008r. w czasie od 21:03:00 do 21:03:30 przed i po filtracji przedstawiono na Rys. 7. Na rysunku podano także wartości maksymalnych przemieszczeń dynamicznych zarejestrowanych jednocześnie w tym samym czasie za pomocą odbiorników GPS na trzech różnych wysokościach.

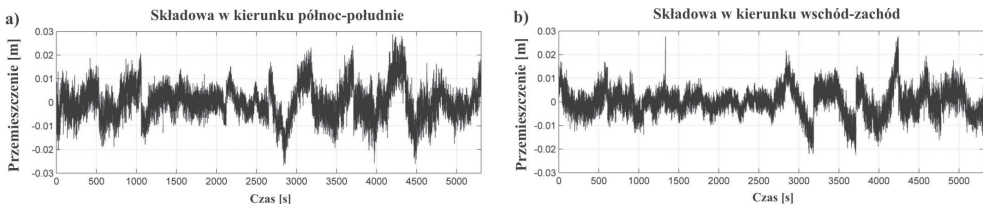




Rys. 7. Przeszaczenia dynamiczne z dnia 1.12.2008r. w czasie od 21:03:00 do 21:03:30 w kierunku wiatru i w kierunku poprzecznym na trzech różnych wysokościach komina: a) przed filtracją, b) po filtracji i maksymalne przeszaczenia dynamiczne w obu kierunkach

### 3.3. Wyniki pomiarów z dnia 23.05.2011r.

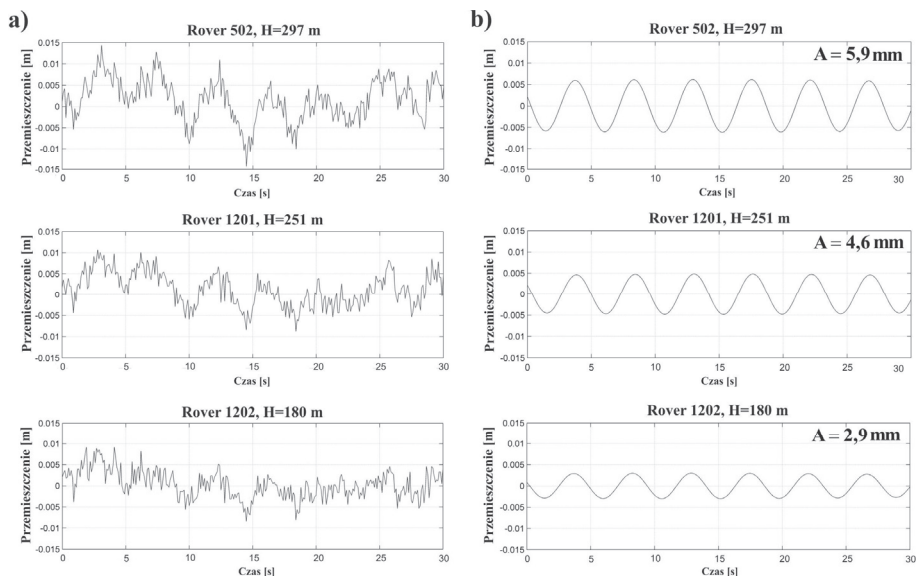
W czasie drugiej sesji wykonano szereg cykli pomiarowych, trwających 8 minut i 50 sekund każdy, za pomocą trzech odbiorników GPS jednocześnie zainstalowanych na różnych wysokościach komina, tj. 297, 251 i 180 m. Na Rys. 8 przedstawiono wyniki pomiarów przeszaczeń wierzchołka komina w płaszczyźnie poziomej spowodowanych działaniem wiatru w kierunku północ-południe i wschód-zachód, które otrzymano przez połączenie 10 cykli pomiarowych, trwających łącznie ponad 88 minut, wykonanych w dniu 23.05.2011r. w czasie od 2:30:00 do 7:10:00. Pomiarzy wykonano z częstotliwością próbkowania 10 Hz. Pomierzone częstotliwości drgań swobodnych komina wyniosły 0,213 Hz i 0,219 Hz. Prędkość wiatru mierzona na wysokości wierzchołka komina została oszacowana w przedziale od 12 do 19 m/s, zaś średni azymut wiatru wyniósł  $292^{\circ}$  (wiatr północno-zachodni).



Rys. 8. Przeszaczenia punktu wierzchołkowego komina Elektrowni Bełchatów zarejestrowane z częstotliwością próbkowania 10 Hz w czasie 10 cykli pomiarowych trwających 8 minut i 50 sekund od 2:30:00 do 7:10:00 w dniu 23.05.2011r. w kierunkach: a) północ-południe i b) wschód-zachód

Na Rys. 9 przedstawiono wyniki pomiarów dynamicznych przeszaczeń komina na trzech różnych wysokościach w płaszczyźnie poziomej spowodowanych działaniem wiatru

w kierunku północ-południe z dnia 23.05.2011r. w czasie od 6:05:15 do 6:05:45 przed i po filtracji. Podano także wartości maksymalnych przemieszczeń dynamicznych zarejestrowanych jednocześnie za pomocą odbiorników GPS na trzech różnych wysokościach.



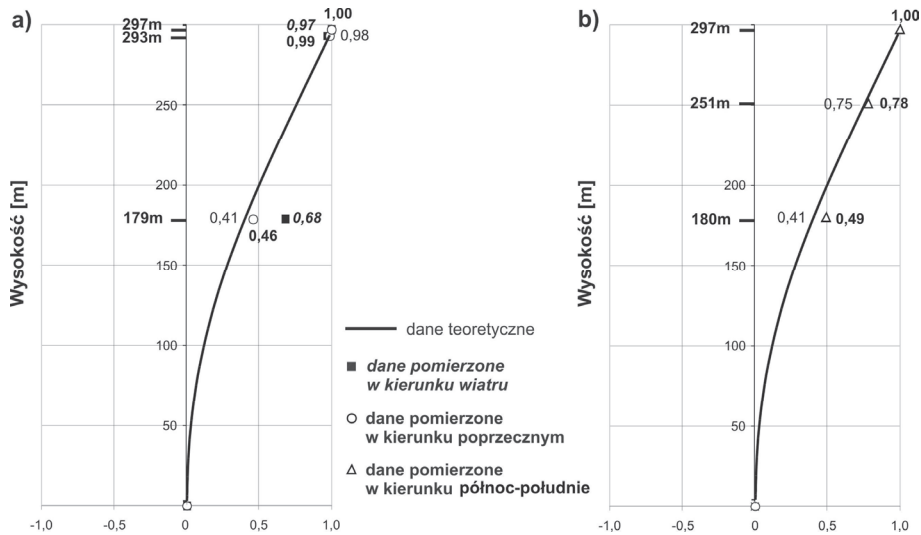
Rys. 9. Przemieszczenia dynamiczne z dnia 23.05.2011r. w czasie od 6:05:15 do 6:05:45 w kierunku północ-południe na trzech różnych wysokościach komina: a) przed filtracją, b) po filtracji i maksymalne przemieszczenia dynamiczne

#### 4. Porównanie wartości obliczonych i pomierzonych

W Tabeli 1 przedstawiono porównanie obliczonych i pomierzonych częstości drgań własnych (swobodnych) i liczb tłumienia komina. Na Rys. 10 przedstawiono porównanie pierwszej postaci drgań własnych komina otrzymanej na podstawie analizy numerycznej z uwzględnieniem podatności podłoża gruntowego i pomierzonych maksymalnych przemieszczeń dynamicznych komina w płaszczyźnie poziomej jednocześnie na trzech różnych wysokościach.

Tabela 1. Porównanie obliczonych częstości drgań własnych i pomierzonych częstości drgań swobodnych i liczb tłumienia komina

Częstość drgań	Obliczone wartości częstości drgań własnych [Hz]		Pomierzone wartości				
			częstości drgań swobodnych [Hz]		kol.2 – kol.3	kol.2 – kol.3	
	z założeniem pełnego utwierdzenia	z założeniem podatności podłoża gruntowego	kol.2 – kol.3	i liczby tłumienia [%]		kol.3 – kol.5	kol.3 – kol.6
			kol.3 [%]	z dnia 1.12.2008r.	z dnia 23.05.2011 r.	kol.5 [%]	kol.6 [%]
1	2	3	4	5	6	7	8
$f_1$	0,243	0,236	<b>3,0</b>	0,212 (0,47) 0,219 (0,52)	0,213 (0,64) 0,219 (0,53)	<b>11,3</b> <b>7,8</b>	<b>10,8</b> <b>7,8</b>
$f_2$	1,229	1,146	<b>7,2</b>	-	-	-	-
$f_3$	3,086	2,192	<b>40,8</b>	-	-	-	-



Rys. 10. Porównanie rzędnych pierwszej postaci drgań własnych z uwzględnieniem podatności podłoża gruntowego i maksymalnych przemieszczeń dynamicznych na trzech różnych wysokościach komina na podstawie pomiarów w dniu: a) 1.12.2008r. i b) 23.05.2011r.

## 5. Wnioski

Uwzględnienie podatności podłoża gruntowego pod fundamentem komina ma najbardziej znaczący wpływ na trzecią częstotliwość drgań własnych (wpływ ten wynosi około 40 %) i trzecią postać drgań własnych. Na częstotliwość drgań podstawowych wpływ ten wynosi około 3 %.

Na podstawie pomiarów wykonanych w czasie dwóch sesji określono dwie zbliżone do siebie częstotliwości drgań swobodnych komina. Wartości doświadczalne, tj.  $f_1=0,212$  Hz i  $f_2=0,219$  Hz różnią się od częstotliwości drgań podstawowych otrzymanej z analizy numerycznej z uwzględnieniem podatności podłoża gruntowego o około 11 % i 8 %. Można przypuszczać, że różnice te wynikają z niepewności danych dotyczących własności mechanicznych betonu trzonu komina i własności podłoża gruntowego, które przyjęto do analizy.

Stwierdzono dobrą zbieżność rzędnych pierwszej postaci drgań własnych i pomierzonych w czasie dwóch sesji przemieszczeń dynamicznych komina w punktach pomiarowych na wysokościach od 251 m. Znacznie większą różnicę, tj. około 66% stwierdzono w punkcie pomiarowym na wysokości 179 m, prawdopodobnie spowodowaną wielotorowością odbieranych sygnałów w tym punkcie pomiarowym.

Uzyskane doświadczalnie parametry drgań, tj. pierwsze postacie i częstotliwości drgań własnych, liczby tłumienia i maksymalne przemieszczenia, potwierdzają możliwość stosowania techniki GPS w ocenie stanu technicznego wysokich i smukłych budowli.



## Literatura

- 1 Solari G., Stura D. An evaluation technique for vibration modes of structures interacting with soil. Istituto di Scienza delle Costruzioni, Facolta di Ingegneria, Via Montallegro 1, 16145 Genova, Italy 1980.
- 2 Gazetas G. Analysis of machine foundation vibrations: state of the art. Soil Dynamics and Earthquake Engineering Vol. 2/1 (1983) 2-42.
- 3 Chmielewski T., Zembaty Z. Podstawy dynamiki budowli. Arkady, Warszawa, 1998.
- 4 Breuer P, Chmielewski T, Górski P, Konopka E, Tarczynski L. Investigations of dynamic characteristics of a tall industrial chimney due to light wind and solar radiation. Budownictwo i Architektura Vol. 12/2 (2013) 87-94.
- 5 Chmielewski T., Górski P., Tarczyński L. Poprawa dokładności pomiarów przemieszczeń komina przemysłowego techniką GPS. Materiały Budowlane 5 (2014) 11-13.

## Comparison of computed and measured dynamic characteristics of industrial chimney by GPS technology

Tadeusz Chmielewski<sup>1</sup>, Piotr Górski<sup>2</sup>, Peter Breuer<sup>3</sup>, Eduard Konopka<sup>4</sup>

<sup>1,2</sup> Department of Structural Mechanics, Faculty of Civil Engineering, Opole University of Technology, e-mail: <sup>1</sup>t.chmielewski@po.opole.pl, <sup>2</sup>p.gorski@po.opole.pl

<sup>3</sup> Stuttgart University of Applied Sciences, Stuttgart, Germany, e-mail: peter.breuer@hft.stuttgart.de

<sup>4</sup> Stuttgart University of Applied Sciences, Stuttgart, Germany,  
e-mail: eduard.konopka@hft.stuttgart.de

**Abstract:** In the paper, the theoretical natural vibration frequencies and mode shapes of the chimney with and without the flexibility of soil were compared with the experimental results of two field tests carried out in December 2008 and in May 2011 by using GPS technology. Three GPS rover receivers were installed at three various levels. The GPS was able to measure only the first natural frequencies and mode shapes of the chimney. The damping ratios and maximum displacements of the chimney using the band-pass filtering technique for both tests were also determined. The measured dynamic characteristics are important for the assessment of the technical state of the chimney. The estimated dynamic characteristics, using GPS measurements, are compatible with the computed results.

**Keywords:** Industrial chimney, free vibrations, displacement measurement, GPS, dynamic characteristics

