

# Określenie pionowego profilu przemieszczeń wysokiego kominia przemysłowego techniką satelitarną GPS

Prof. dr hab. inż. Tadeusz Chmielewski, dr inż. Piotr Górski, Politechnika Opolska, Prof. Dr.-Ing. Peter Breuer, Dr.-Ing. Eduard Konopka, Stuttgart University of Applied Sciences

## 1. Wprowadzenie

W czasie ostatnich piętnastu lat system satelitarny GPS znalazł zastosowanie w inżynierii lądowej do pomiarów przemieszczeń poziomych i pionowych dużych konstrukcji budowlanych charakteryzujących się dostatecznie długim okresem drgań własnych, do których należą: wysokie budynki (ponad 20 pięter), mosty wiszące lub wantungowe o znacznych rozpiętościach, wysokie kominy przemysłowe i wieże radiowo-telewizyjne, i których ruch jest spowodowany działaniem wiatru, trzęsieniami ziemi i/lub zmienną temperaturą otoczenia. W literaturze istnieje szereg publikacji dotyczących tej problematyki [1–6].

Ważną zaletą systemu GPS jest możliwość natychmiastowego wyznaczenia przez odbiornik GPS przemieszczeń obiektów budowlanych, w ciągu całej doby, bez względu na warunki atmosferyczne, bez konieczności zapewnienia widoczności urządzenia naziemnego z badanym obiektem i przy całkowitej automatyzacji pomiarów. Istotną cechą pomiarów odpowiedzi konstrukcji budowlanych na działanie wiatru wykonywanych systemem GPS jest możliwość określenia składnika quasi-statycznego i dynamicznego przemieszczeń. Ograniczeniem zastosowania tej techniki jest konieczność zapewnienia odbioru sygnału satelitów przez odbiornik, co wymaga in-

stalacji anten GPS w miejscach zapewniających im dobrą widoczność niebosktonu, tj. najczęściej w punktach wierzchołkowych budowli.

Od roku 2006 prowadzone są cykliczne pomiary poziomych przemieszczeń punktów wierzchołkowych dwóch kominów przemysłowych Elektrowni Bełchatów [7] spowodowanych działaniem wiatru i/lub łącznym działaniem dobowej zmiany temperatury powietrza i radiacji słonecznej. W niniejszym artykule przedstawiono wyniki badań przemieszczeń kominia przemysłowego nr 1 Elektrowni Bełchatów pod wpływem wiatru i dobowej zmiany temperatury w czasie sesji pomiarowej trwającej dwie doby, tj. w dniach 1–3.12.2008 r. z zastosowaniem czterech anten GPS. Celem pomiarów było określenie częstości drgań własnych kominia i badanie możliwości określenia pionowego profilu przemieszczeń kominia mimo zakłóceń odbioru sygnałów satelitarnych przez anteny na niższych wysokościach spowodowanych trzonem kominia. Takie badania służą celowi monitorowania stanu technicznego kominia na podstawie badań zmian jego cech dynamicznych [4].

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

Pomiary wykonano za pomocą systemu Leica GPS. Zestaw pomiaro-



Rys. 1. Lokalizacja 3 anten GPS typu rover na kominie

wy składał się z czterech wysokiej jakości odbiorników, tj. dwóch Leica GPS 500 (w czasie badań oznaczonych numerami 501, 502) i dwóch Leica GPS 1200 (oznaczonych numerami 1201, 1202). Odbiornik nr 1201 stanowił stację referencyjną i został umieszczony w stałym położeniu na ziemi, na trójnogu w odległości około 555 m od kominia. Pozostałe trzy odbiorniki stanowiące stacje ruchome typu rover, zostały przymocowane do sztywnych barier ochronnych galerii po zewnętrz-

nej stronie trzonu komina na trzech różnych wysokościach, tj. odbiornik nr 1202 na najwyższym stopniu na wysokości 297 m nad poziomem terenu, odbiornik nr 501 na galerii zewnętrznej w pobliżu wierzchołka komina na wysokości 293 m, a odbiornik nr 502 do galerii zewnętrznej na wysokości 179 m. Wszystkie odbiorniki ruchome zamocowane były od strony południowej wzdłuż pionowej linii, od której odchylenie nie przekraczało 3 m. Na rysunku 1 przedstawiono widok ogólny komina nr 1 Elektrowni Bełchatów i lokalizację odbiorników ruchomych na kominie.

### 3. Dane meteorologiczne

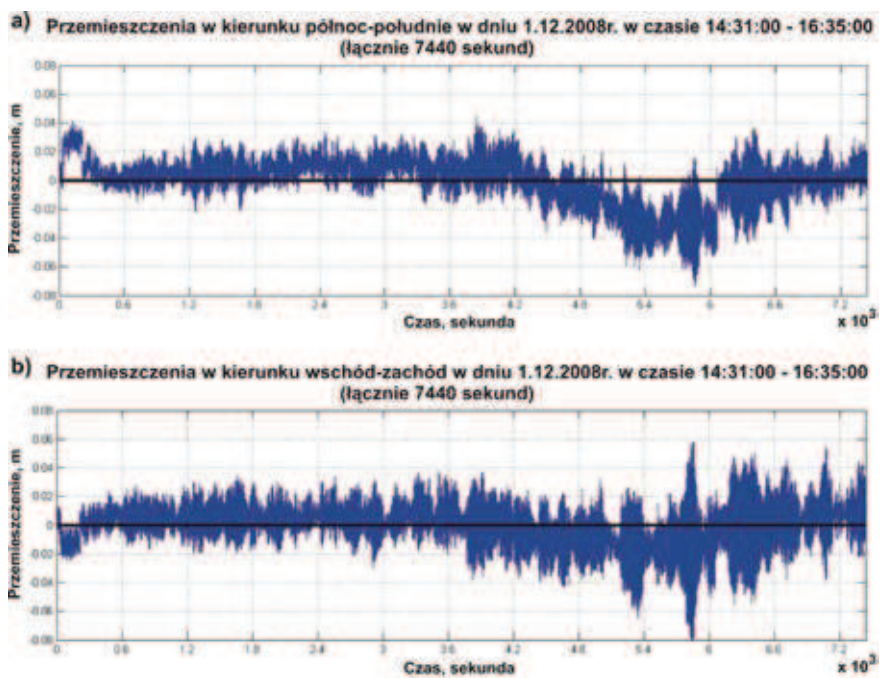
Wielkości meteorologiczne w czasie sesji pomiarowych rejestrowane były za pomocą przenośnej stacji meteorologicznej bezpośrednio na najwyższym stopniu komina, tj. na wysokości 297 m nad poziomem terenu. Wyniki pomiarów prędkości i kierunku wiatru przedstawiono na rysunku 2. Należy podkreślić, że nie są to wartości miarodajne, tj. mierzone w terenie otwartym przed budowlą, a jedynie są to wartości poglądowe, informujące kiedy w czasie pomiarów występowały największe prędkości wiatru i jaki był jego kierunek.

### 4. Wyniki pomiarów przemieszczeń poziomych komina i ich analiza spektralna

Na rysunku 3 przedstawiono wyniki pomiarów przemieszczeń wierzchołka komina w płaszczyźnie poziomej spowodowanych działaniem wiatru w kierunku północ-południe (rys. 3a) i wschód-zachód (rys. 3b). Pomiar wykonano z częstotliwością próbkowania 10 Hz 1.12.2008 r. w czasie od 14:31:00 do 16:35:00 (124 minuty). Prędkość wiatru mierzona na wysokości wierzchołka komina została oszacowana w przedziale od 18 do 26 m/s, zaś średni azymut wiatru wyniósł 150°, co oznacza wiatr południowo-wschodni. Wyniki pomiarów przemieszczeń



Rys. 2. Prędkość i kierunek wiatru uzyskane z przenośnej stacji meteorologicznej na stopniu zwieńczającym komin w dniach 1–3 grudnia 2008 r.



Rys. 3. Wyniki pomiarów przemieszczeń punktu wierzchołkowego komina Elektrowni Bełchatów z częstotliwością próbkowania 10 Hz w dniu 1.12.2008r. w kierunkach: a) północ-południe i b) wschód-zachód



Rys. 4. Wykres funkcji gęstości widmowej odpowiedzi komina Elektrowni Bełchatów w kierunku wschód-zachód w punkcie pomiarowym na wysokości 297 m

punktu wierzchołkowego komina przedstawione na rysunku 3 pozwoliły na określenie, za pomocą szybkiej transformacji Fouriera, częstotliwości drgań własnych (swobodnych) komina. Wykres funkcji gęstości wid-

mowej odpowiedzi komina w kierunku wschód-zachód przedstawiono na rysunku 4. Na wykresie widoczna jest wyraźna dominacja wartości maksymalnej, która na osi odciętych odpowiada częstotliwości drgań wła-



nych komina 0,212 Hz (okres drgań własnych wynosi 4,72 s).

## 5. Dobowy ruch komina na różnych wysokościach

Długotrwały cykl pomiarowy zarejestrowano w okresie od 1 grudnia 2008 r. od godz. 13:00 do 3 grudnia 2008 r. do godz. 14:00. W czasie pomiarów wpływ nasłonecznienia był nieznaczny, tj. temperatura powietrza mierzona na wysokości ostatniego stropu komina była ustalona i wyniosła około 10°C w ciągu dnia, zaś w ciągu nocy około 3°C. Z tego powodu nie zarejestrowano znaczących przemieszczeń komina pod wpływem dobowej zmiany temperatury powietrza i radiacji słonecznej.

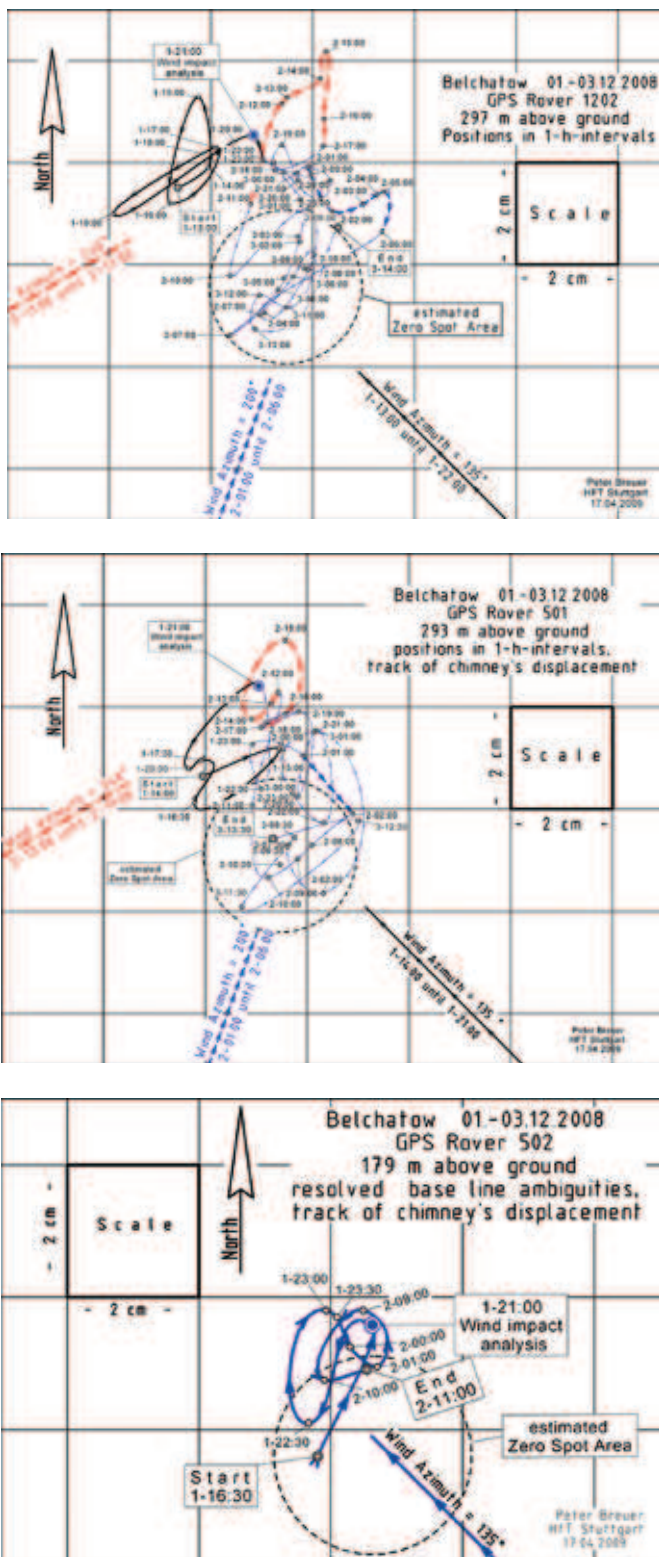
Na rysunku 5 przedstawiono wolnozmienne przemieszczenia komina wyznaczone co 1 godzinę w płaszczyźnie poziomej jednocześnie na trzech różnych wysokościach, tj. na wysokości 297 m, 293 m i 179 m nad poziomem terenu, spowodowane różnicą temperatury płaszcza komina od strony południowej i północnej. Współrzędne określające położenie punktów pomiarowych w czasie badań ustalono po uśrednieniu trzech kolejnych współrzędnych otrzymanych z pomiarów w odstępach co 30 minut. Tor ruchu komina zarejestrowany przez odbiornik nr 1202 na wysokości 297 m i odbiornik nr 501 na wysokości 293 m wyznaczony jest łącznie przez 50 pozycji, natomiast przez odbiornik nr 502 na wysokości 179 m tylko przez 10 pozycji. Ponadto na rysunku 5 oznaczono linią przerywaną kołowy obszar graniczny położenia punktu pomiarowego w stanie równowagi statycznej komina, tj. gdy na komin nie działa znaczące obciążenie wiatrem i radiacja słoneczna.

## 6. Składnik dynamiczny przemieszczenia komina spowodowany działaniem wiatru na trzech różnych wysokościach

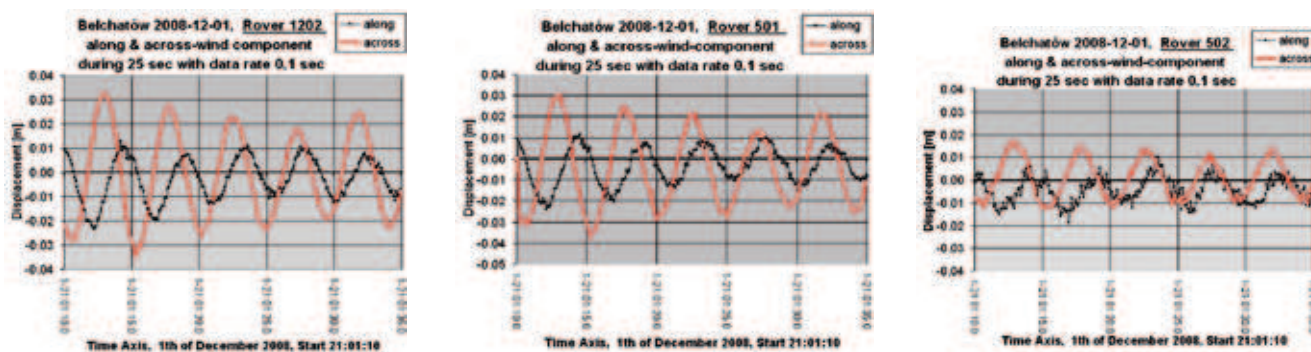
W czasie badań wykonano krótkotrwałe cykle pomiarowe, trwające 3 minuty i 50 sekund, za pomocą trzech

odbiorników GPS zainstalowanych na różnych wysokościach komina, tj. 297 m, 293 m i 179 m. Wszystkie odbiorniki rejestrowały dane jednocześnie w tych samych odstępach cza-

su z częstotliwością próbkowania 10 Hz. Wyniki pomiarów dynamicznych przemieszczeń komina w płaszczyźnie poziomej spowodowanych działaniem wiatru w kierunku jego działa-



**Rys. 5.** Ruch wierzchołka komina nr 1 Elektrowni Belchatów w ostępach co godzinę od 1.12.2008 r. do 3.12.2008 r.



**Rys. 6.** Pomiar na trzech różnych wysokościach komina, tj. 297, 293 i 179 m z częstotliwością próbkowania 10 Hz w dniu 1.12.2008 r. w czasie 21:01:10 – 21:01:35 przemieszczeń dynamicznych w kierunku wiatru i w kierunku poprzecznym

nia i w kierunku poprzecznym, które zarejestrowano 1.12.2008 r. w czasie od 21:01:10 do 21:01:35 przedstawiono na rysunku 6. W czasie pomiarów prędkość wiatru została oszacowana w przedziale od 21 do 25 m/s, zaś średni azymut wiatru wyniósł  $135^\circ$  (rys. 2).

Przedstawione na rysunku 6 czasowe przebiegi drgań wymuszonych komina na trzech różnych wysokościach spowodowanych działaniem wiatru w dwóch prostopadłych do siebie kierunkach mają postać zbliżoną do funkcji harmonicznym o zmiennej amplitudzie drgań i potwierdzają narastanie maksymalnych przemieszczeń komina wraz z jego wysokością. W tabeli 1 przedstawiono wyznaczone na podstawie pomiarów na trzech różnych wysokościach komina największe quasi-statyczne przemieszczenia i maksymalne przemieszczenia dynamiczne komina wywołane działaniem wiatru w płaszczyźnie poziomej.

**Tabela 1.** Największe quasi-statyczne i dynamiczne przemieszczenia komina w płaszczyźnie poziomej wywołane działaniem wiatru na trzech różnych wysokościach

Składowe przemieszczeń pod wpływem wiatru	Wysokość komina			
	297 m	293 m	179 m	kol. 1 kol. 3
	1	2	3	4
Przemieszczenie dynamiczne w kierunku poprzecznym	6,9 cm	6,8 cm	2,9 cm	2,4
Przemieszczenie dynamiczne w kierunku wiatru	3,4 cm	3,3 cm	2,0 cm	1,7
Przemieszczenie quasi-statyczne w kierunku wiatru (rys. 5)	2,0 cm	2,0 cm	0,5 cm	4,0

## 8. Wnioski

Pomiary przemieszczeń wysokiego komina przemysłowego nr 1 Elektrowni Bełchatów zostały wykonane satelitarnym systemem GPS z zastosowaniem czterech odbiorników (trzy anteny ruchome i jedna w stałym położeniu) zainstalowanych od strony południowej komina na trzech różnych wysokościach, tj. 179 m, 293 m i 297 m.

Pomiary przemieszczeń wykonane jednocześnie za pomocą wszystkich anten GPS z częstotliwością próbkowania 10 Hz pozwoliły na identyfikację tylko pierwszej częstotliwości drgań własnych komina, tj. 0,212 Hz. Należy przypuszczać, że wynika to z ograniczonych możliwości technicznych systemu GPS wpływających na dokładność pomiarów przemieszczeń poziomych, która dla obecnie dostępnych na rynku odbiorników GPS wynosi do 5 mm.

Potwierdzono możliwość określenia pionowego profilu przemiesz-

czeń komina przemysłowego nr 1 Elektrowni Bełchatów w płaszczyźnie poziomej pod wpływem wiatru, mimo zakłóceń odbioru sygnałów satelitarnych przez anteny na niższych wysokościach spowodowanych trzonem komina. Ze względu na małą liczbę punktów pomiarowych (tylko trzy punkty pomiarowe) określenie profilu należy uznać jako przybliżone.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Çelebi, M., GPS in dynamic monitoring of long-period structures. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 20, 2000, pp. 477-483
- [2] Lovse J., Teskey W., Lachapelle G., Cannon M., Dynamic deformation monitoring of tall structure using GPS technology. *Journal of Surveying Engineering*, Vol. 121, No. 1, 1995, pp. 35-40
- [3] Ashkenazi V., Roberts G. W., Experimental monitoring of the Humber bridge using GPS. *Proceedings – Institution of Civil Engineers*, 120, 1997, pp. 177-182
- [4] Breuer P., Chmielewski T., Górski P., Konopka E., Tarczyński L.; The Stuttgart TV-Tower – displacement of the top caused by the effects of sun and wind. *Engineering Structures*, 30, 2008, pp. 2771-2781
- [5] Breuer P., Chmielewski T., Górski P., Konopka E., Application of GPS technology to measurements of displacement of high-rise structures due to wind. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamic*, Vol. 90, 2002, pp. 223-230
- [6] Chmielewski T., Breuer P., Górski P., Konopka E., Monitoring of tall slender structures by GPS measurements. *Wind & Structures*, Vol. 12, 2009, pp. 401-412
- [7] Breuer P., Chmielewski T., Górski P., Konopka E., Tarczyński L.: Measurements of elastic displacements of chimneys caused by effects of the sun. *Environmental Effects on Buildings, Structures, Materials and People*, Lublin University of Technology, Lublin, 2007, pp. 323-326