

Monitorowanie przemieszczeń poziomych konstrukcji wysokich i smukłych techniką GNSS z wykorzystaniem

Z odbiornikiem na

Współczesne systemy pomiarowe i diagnostyczne w sposób radykalny podnoszą wiarygodność ekspertyz dotyczących stanu technicznego obiektów budowlanych. Coraz częściej podstawowym elementem tych systemów są odbiorniki GNSS.

Mariusz Figurski

Maciej Wrona

Grzegorz Nykiel

Wniedalekiej przeszłości ciężar pozyskania precyzyjnej informacji o geometrii konstrukcji spoczywał na geodetach korzystających głównie z optycznych instrumentów pomiarowych. Wobec skali dzisiejszych projektów budowlanych tradycyjne metody geodezyjne okazały się niejednokrotnie niewystarczające do pełnej diagnozy stanu konstrukcji. Technologiczny postęp w dziedzinie narzędzi i technologii pomiarowych doprowadził do powstawania nowych, specjalistycznych rozwiązań z zakresu pozyskiwania informacji o dynamicznym i geometrycznym stanie konstrukcji.

W świetle najnowszych publikacji z dziedziny geodezji inżynierskiej oraz osiągnięć z zakresu geodezyjnego pozyskiwania i przetwarzania danych coraz wyraźniej widoczny jest wzrost liczby instalacji wykorzystujących technikę GNSS (Global Navigation Satellite System) jako narzędzia do detekcji przemieszczeń elementów konstrukcji – monitoring strukturalny GNSS. Początkowo

były to prace oparte na pomiarach statycznych (metodzie zapewniającej wówczas odpowiednią dokładność) mające na celu detekcję długoterminowych odkształceń konstrukcji powodowanych przez napór wody lub lodu, zmiany temperatury czy powolne zmiany tektoniczne (Bond et al., 2007; Chrzanowski et al., 2007). Z biegiem lat szybkość procesorów wykorzystywanych w odbiornikach pozwoliła na wzrost częstotliwości wyznaczania współrzędnych do 100 Hz. Umożliwiło to podjęcie prób detekcji deformacji konstrukcji wywołanych przez szybkozmiennne w czasie czynniki zewnętrzne, jak wiatr, trzęsienia ziemi czy działalność człowieka (Breuer et al., 2008).

• Zintegrowane systemy pomiarowe

Mimo licznych zalet GNSS w wielu przypadkach system ten nie jest możliwy do zastosowania lub nie daje spodziewanych efektów (Nikitopoulou et al. 2006). Do podstawowych wad tej techniki należą:

- wymóg odśrogniętego horyzontu;
- pomiar techniką różnicową (potrzebne minimum 2 odbiorniki);
- dokładność pozycji w trybie postprocessingu: 1 cm dla

składowej poziomej, 2 cm dla składowej wysokościowej;

- dokładność pozycji w trybie Real Time Kinematic: 1-2 cm dla składowej poziomej, 2-4 cm dla składowej wysokościowej;

- w porównaniu z czujnikami innego typu niska częstotliwość akwizycji (maksymalnie 100 Hz).

Oprócz pierwszej z wymienionych wad pozostałe można zredukować, wykorzystując architekturę systemu zintegrowanego. Koncepcja ta polega na pomiarze wybranych elementów konstrukcji w tym samym czasie z wykorzystaniem czujników różnych wielkości fizycznych. Informacja pomiarowa z wielu instrumentów jest numerycznie integrowana dla wyznaczenia badanej wielkości fizycznej, jak np. wektor przemieszczenia. Pozwala to m.in. na wzajemną kontrolę jakości informacji pozyskiwanych przez różnego typu czujniki oraz wyliczenie badanej wielkości z większą dokładnością i wiarygodnością (Tamura, 2009; Ni et al., 2009).

Na świecie od dłuższego czasu prowadzone są prace nad zintegrowanymi systemami pomiaru konstrukcji inżynierskich z wykorzystaniem GPS (np. Roberts et al., 2006; Hide et al., 2005). Najczęściej spotykanym rozwiązaniem jest wprowadzenie dodatkowo czujnika przyspieszenia

– INS (Cazzaniga et al., 2006), a doświadczenia wykazały znaczną poprawę wyników pomiaru po zastosowaniu numerycznej integracji GPS/INS (Meng et al. 2007). Widoczna jest również wysoka zbieżność rezultatów transformacji Fouriera uzyskanych na podstawie danych GPS i czujników przyspieszenia (Cosser, 2003). Do integracji danych najczęściej wykorzystywany jest algorytm numerycznej filtracji Kalmana. Badania nad tą tematyką zaowocowały wieloma wdrożeniami systemów pomiaru konstrukcji opartych na GNSS. Są to przeważnie dużej skali obiekty geotechniczne i mostowe oraz konstrukcje wysokie i smukłe (Chmielewski et al. 2009; Beshor et al., 2006).

Centrum Geomatyki Stosowanej na Wydziale Inżynierii Lądowej i Geodezji WAT rozpoczęło prace nad zastosowaniem wysokoczęstotliwościowych pomiarów GNSS w połowie 2007 roku. Myślą przewodnią było efektywne wykorzystanie możliwości techniki pomiarów satelitarnych w aplikacjach ciągłego monitorowania geometrii konstrukcji. Wykonywane testy opierały się wówczas przede wszystkim na wynikach postprocessingu przeprowadzanego na klastrze komputerowym Fenix z wykorzystaniem zmodyfikowanej aplikacji TRACK (Trajectory Calculation with

sieci ASG-EUPOS

kominie

Kalman Filter) z Massachusetts Institute of Technology (Chen et al., 1998). Od tego czasu wykonano wiele testów pomiarowych i zrealizowano kilka pionierskich w Polsce projektów (Wrona, 2010). Obecnie zakres działalności CGS został poszerzony o zagadnienia związane z akwizycją, integracją i dystrybucją danych pomiarowych z różnego typu czujników w czasie rzeczywistym oraz o budowę autorskiego systemu badania przemieszczeń. System ten jest obecnie wdrażany w wersji przeznaczony dla obiektów wieżowych i smukłych.

• Charakterystyka konstrukcji wieżowych i smukłych

Budowle wieżowe, inaczej nazywane wysmukłymi, to takie, których wymiary spełniają warunek:

$$\frac{h}{b_{max}} \geq 5,$$

gdzie:

h – wysokość budowli,

b_{max} – maksymalna szerokość budowli.

Definicja ta nie jest w pełni precyzyjna, ponieważ nie odnosi się do pewnych rodzajów budowli, które tradycyjnie zaliczane są do budowli wieżowych, między innymi do chłodni kominowych oraz silosów. Z drugiej jednak strony obejmuje słupy i maszty, które mimo spełniania wyżej wymienionego warunku stanowią oddzielną grupę budowli. Przyjmowana jest zatem definicja ujęta wzorem matematycznym, jednakże z wyłączeniem omówionym

Najwyższe kominie w Polsce

Typ i lokalizacja obiektu	Wysokość [m]
Komin Elektrowni Jaworzno III	306
Komin Ciepłowni Kawęczyn	300
Bliźniacze kominie Elektrowni Bełchatów	300
Komin Elektrowni Rybnik	300
Komin Elektrowni Kozienice	300
Komin Elektrociepłowni EC-4 w Łodzi	265
Komin Elektrowni Siersza	264
Komin Elektrowni Rybnik	260
Komin Elektrociepłowni Kraków	260
Komin Elektrociepłowni Pruszków II	256

powyżej, i z jednoczesnym poszerzeniem grupy budowli wieżowych o takie, które kryterium matematycznego nie spełniają, ale do grupy zostały włączone umownie.

Kominie wznoszone na potrzeby przemysłu osiągają coraz większą wysokość, ponieważ promień i szerokość strefy opadania pyłów emitowanych przez komin przemysłowy rosną w przybliżeniu proporcjonalnie do trzeciej potęgi wysokości. Podwyższenie kominu pozwala na dokładniejsze rozproszenie w atmosferze wydostających się produktów spalania. Odpowiedniemu zmniejszeniu ulega wielkość zapylenia przypadająca na jednostkę powierzchni.

W okresie, gdy budowano kominie o wysokości 50-70 metrów, dominującym materiałem była cegła. Przy zwiększonych wysokościach kominów bardziej ekonomiczne i wytrzymałe są konstrukcje żelbetowe. Komin żelbetowy o wysokości 150 metrów jest prawie dwukrotnie lżejszy od kominu z cegły i bardziej odporny na wpływy sejsmiczne.



Komin w Ciepłowni Kawęczyn

Konstrukcja budowli wieżowej wznosi się znacznie ponad powierzchnię terenu, co sprawia, że jest narażona na wyjątkowo dużą ilość obciążeń zewnętrznych. Najbardziej ogólny podział obciążeń działających na budowlę wieżową obejmuje wpływy: mechaniczne, termiczne i fizykochemiczne.

Wpływy mechaniczne budowli wysokich i smukłych obejmują przede wszystkim obciążenia powodowane przez ciężar własny obiektu oraz wpływy podłoża gruntowego. Ciężar własny budowli to ciężar trzonu lub powłoki, wykładziny żaroodpornej, zraszalnika i urządzeń dodatkowych. Ciężar ten decyduje o stateczności budowli.

Grupą obciążeń działających na tego typu konstrukcje, trudną do opisanego tradycyjnymi metodami geodezyjnymi, są wymuszenia dynamiczne. Głównymi źródłami tego typu obciążeń są:

- procesy wibracyjne przeprowadzane przez człowieka w celach technologicznych,

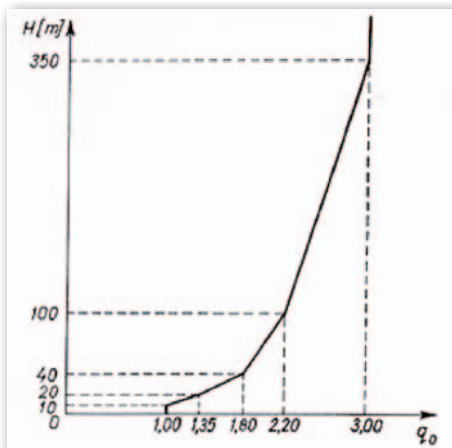
- urządzenia techniczne wywołujące drgania na skutek własnej pracy,

- zjawiska losowe, niezależne od człowieka (przede wszystkim ruchy tektoniczne).

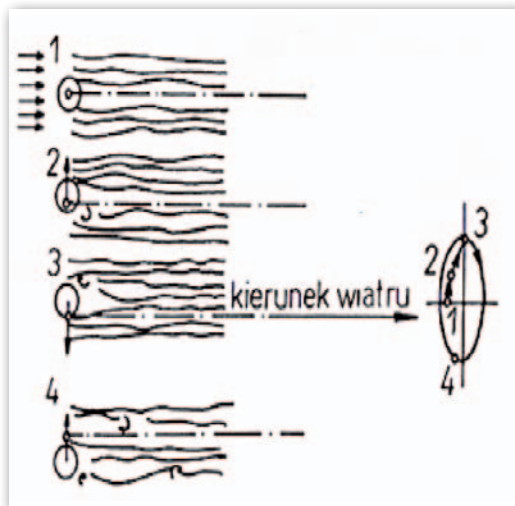
• Obciążenia wiatrem

Duże powierzchnie boczne budowli wieżowych i ich znaczne wysokości sprawiają, że budowle te przejmują na siebie obciążenia powstałe od parcia wiatru. Powoduje to zjawiska, które mogą mieć istotny wpływ na pomiary geodezyjne wykonywane zarówno podczas wznoszenia budowli, jak i kontroli istniejących obiektów.

Wraz ze wzrostem wysokości nad powierzchnię terenu wyraźnie zmienia się prędkość wiatru, jak również jego struktura. Rozkład prędkości wiatru w zależności od wysokości nad powierzchnią terenu określa w Polsce norma PN-70/b-02011 – *Obciążenia w obliczeniach statycznych. Obciążenia wiatrem*. Z rysunku 1 zaczerpniętego



Rys. 1. Zależność między wysokością nad powierzchnią terenu (H) a współczynnikiem wzrostu szybkości wiatru (q_0)



Rys. 2. Zjawisko tzw. wirów Karmana

z tej normy wynika, że prędkość wiatru rośnie nieliniowo wraz z wysokością. Natomiast od 350 metrów nad powierzchnią terenu zachowuje stałą wartość, która jest trzykrotnie większa od szybkości wiatru na wysokości 0-10 metrów.

Struktura strugi wiatru składa się z części dynamicznej (porywy) i części statycznej. Część dynamiczna powoduje powstawanie sprężystych drgań własnych badanej konstrukcji. Wykorzystywana wówczas metoda postprocesingu danych GNSS do wyznaczenia wektora przemieszczeń wybranych elementów konstrukcji została z powodzeniem użyta w pomiarach na moście Siekierkowskim w Warszawie i w Zakroczymiu na moście im. Obrońców Modlina w 1939 r. (Figurski et al., 2007; Wrona, 2010).

Następnym krokiem było zastosowanie techniki GNSS czasu rzeczywistego (rok 2011). Opracowany w CGS system pomiarowy bazuje na odbiornikach GNSS i wykorzystuje metodę pomiarową RTK (Real Time Kinematic), która pozwala w czasie rzeczywistym uzyskiwać dokładności rzędu 1 cm dla składowych poziomych i pionowych. Powstała aplikacja posłużyła do zbudowania systemu pomiarowego czasu rzeczywistego opartego na lokalnej bazie GNSS lub sieci stacji referencyjnych ASG-EUPOS dostarczających dane on-line do bazy danych CGS.

• Prace badawcze CGS

Pierwsze próby pomiarowe z wykorzystaniem odbiorników GNSS 10 Hz prze-

prowadzono w CGS w lipcu 2007 roku. Doświadczenia miały na celu dostarczenie informacji o możliwościach detekcji przemieszczeń pionowych i poziomych z wykorzystaniem wysokoczęstotliwościowych danych GPS. Testy zakończyły się sukcesem, wskazując na możliwość wiarygodnego pozyskiwania informacji zarówno o amplitudzie, jak i częstotliwości drgań własnych badanej konstrukcji. Wykorzystywana wówczas metoda postprocesingu danych GNSS do wyznaczenia wektora przemieszczeń wybranych elementów konstrukcji została z powodzeniem użyta w pomiarach na moście Siekierkowskim w Warszawie i w Zakroczymiu na moście im. Obrońców Modlina w 1939 r. (Figurski et al., 2007; Wrona, 2010).

Następnym krokiem było zastosowanie techniki GNSS czasu rzeczywistego (rok 2011). Opracowany w CGS system pomiarowy bazuje na odbiornikach GNSS i wykorzystuje metodę pomiarową RTK (Real Time Kinematic), która pozwala w czasie rzeczywistym uzyskiwać dokładności rzędu 1 cm dla składowych poziomych i pionowych. Powstała aplikacja posłużyła do zbudowania systemu pomiarowego czasu rzeczywistego opartego na lokalnej bazie GNSS lub sieci stacji referencyjnych ASG-EUPOS dostarczających dane on-line do bazy danych CGS.

Na mocy porozumienia pomiędzy Wojskową Akademią Techniczną i Vattenfall Heat Polska prowadzone są pomiary na obiekcie kominowym w Ciepłowni Kawęczyn (fot. na s. 5). Wzniesiona w 1983 roku żelbetowa konstrukcja o wysokości 300 m jest jedną z najwyższych tego typu w Polsce. W przekroju poprzecznym komin jest sześciobokiem foremnym stworzonym przez 6 płaszczyzn pionowych – 6 słupów ustawionych na okręgu o promieniu 2,50 m. Konstrukcja wieży posadowiona jest na pierścieniu żelbetowym o wysokości 1,2 m spoczywającym na fundamencie komin. Na podstawie danych konstrukcyjnych maksymalny przewidywalny wektor przemieszczenia wierzchołka komin pod zewnętrznym obciążeniem wiatrem może dochodzić do kilkudziesięciu centymetrów.

Pierwsze pomiary techniką GNSS przeprowadzono już w listopadzie 2010 roku. Wykorzystano wówczas cztery odbiorniki (Trimble 5700 i SPS); dwa jako bazy w umieszczone w odległości około 150 m od konstrukcji komin oraz dwa umieszczone na wierzchołku konstrukcji. Na podstawie zarejestrowanych danych przeprowadzono proces wyliczenia pozycji w trybie kinematycznym z wykorzystaniem aplikacji TRACK (Trajectory Calculation with Kalman Filter) oraz

RTKLib 2.3. Zadowalające wyniki postprocesingu pozwoliły na podjęcie kolejnego kroku zmierzającego do stworzenia systemu pomiarowego działającego w czasie rzeczywistym.

• System pomiarowy czasu rzeczywistego

Konstrukcje wysokie, a kminy żelbetowe szczególnie, wymagają specjalnego podejścia podczas procesu monitorowania ze względu na trudne warunki pomiarowe, tj. problemy z zasilaniem, wysokie różnice temperatur czy zapylenie wewnątrz komin. Standardowe metody pomiaru są niewystarczające przy tego typu pracach ze względu na niską częstotliwość pomiaru, niską dokładność oraz brak możliwości automatyzacji całego procesu. W związku z powyższym zespół Centrum Geomatyki Stosowanej opracował system pomiarowy, którego głównym zadaniem jest monitorowanie przemieszczeń poziomych oraz dynamiki kominów żelbetowych. Obecnie jest on w fazie wdrażania na obiekcie kominowym w Ciepłowni Kawęczyn. W jego skład wchodzi trzy wzajemnie uzupełniające się czujniki pomiarowe, serwer obliczeniowy, serwer bazy danych oraz serwer WWW. Schemat systemu przedstawiono na rysunku 3.

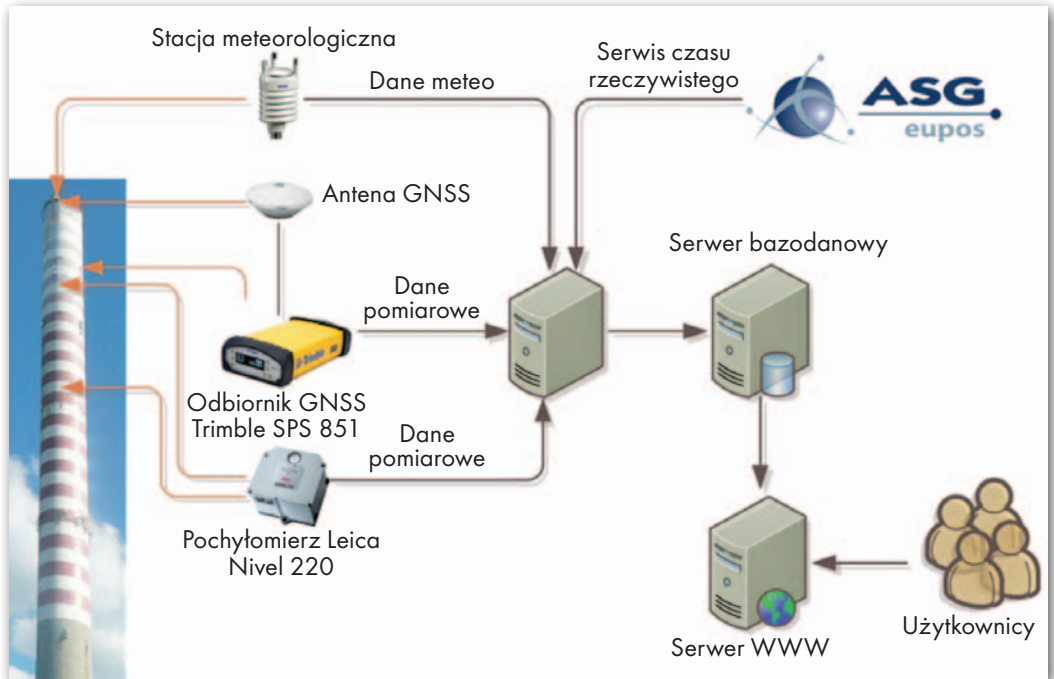
Na szczycie komin zamontowana została antena GNSS połączona z odbiornikiem satelitarnym Trimble SPS851 znajdującym się na ostatnim piętrze budowli. Stanowi on główny instrument pomiarowy, który może wyznaczać pozycję z częstotliwością do 20 Hz. W najbliższym czasie przy antenie GNSS zostanie zainstalowana stacja meteorologiczna, dzięki której możliwe będzie dokładne określenie wpływów warunków pogodowych na stan geometryczny konstrukcji. W środku komin na konstrukcji żelbetowej zamocowano również dwa pochy-

łomierze precyzyjne Leica Nivel220 służące do weryfikacji danych pochodzących z odbiornika GNSS.

Ze względu na duże odległości pomiędzy urządzeniami pomiarowymi a stacją roboczą wszystkie dane są przesyłane z wykorzystaniem sieci LAN, dzięki czemu zmniejszone zostały opóźnienia sygnału.

Serwer obliczeniowy, który jest głównym elementem całego systemu, znajduje się w środku komina na wysokości 200 m nad poziomem gruntu. Jego usytuowanie podyktowane było dostępnością stałego zasilania elektrycznego oraz łącza internetowego. Na komputerze zainstalowano specjalnie opracowane oprogramowanie, którego głównym zadaniem jest integracja danych ze wszystkich czujników pomiarowych z wykorzystaniem czasu GPS, pobieranie strumienia danych z serwisów czasu rzeczywistego ASG-EUPOS oraz przetwarzanie i zapis danych do serwera bazodanowego. Wykorzystanie poprawek z systemu ASG-EUPOS umożliwiło uzyskiwanie dokładności poziomych oraz pionowych rzędu 1 cm.

Zainstalowany system pomiarowy cały czas podłączony jest do internetu, co pozwala m.in. na zdalne zarządzanie procesem pomiarowym z dowolnego komputera z dostępem do sieci oraz prezentację danych przez interfejs graficzny, którym jest strona internetowa umieszczona na serwerze WWW znajdującym się na kominie (rys. 3). Dzięki takiemu rozwiązaniu użytkownicy systemu mogą stale obserwować zachowanie konstrukcji w czasie rzeczywistym. Wykresy na rysunku 4 przedstawiają efekt opisanych powyżej wirów Karmana przy prędkości wiatru ok. 9 m/s. Strona WWW na razie jest w fazie testowej i będzie rozbudowywana na przykład o dane pochodzące ze stacji meteorologicznej.



Rys. 3. Poglądowy schemat funkcjonowania systemu opracowanego przez CGS

Docelowo na konstrukcji komina zostanie umieszczonych kilka typów czujników: odbiorniki GNSS, pochyłomierz i stacja meteorologiczna. Dzięki zaawansowanym rozwiązaniom teletransmisyjnym możliwe będzie prowadzenie ciągłego monitorowania stanu geometrycznego konstrukcji w czasie rzeczywistym (z opóźnieniem nieprzekraczającym 1 sekundy).

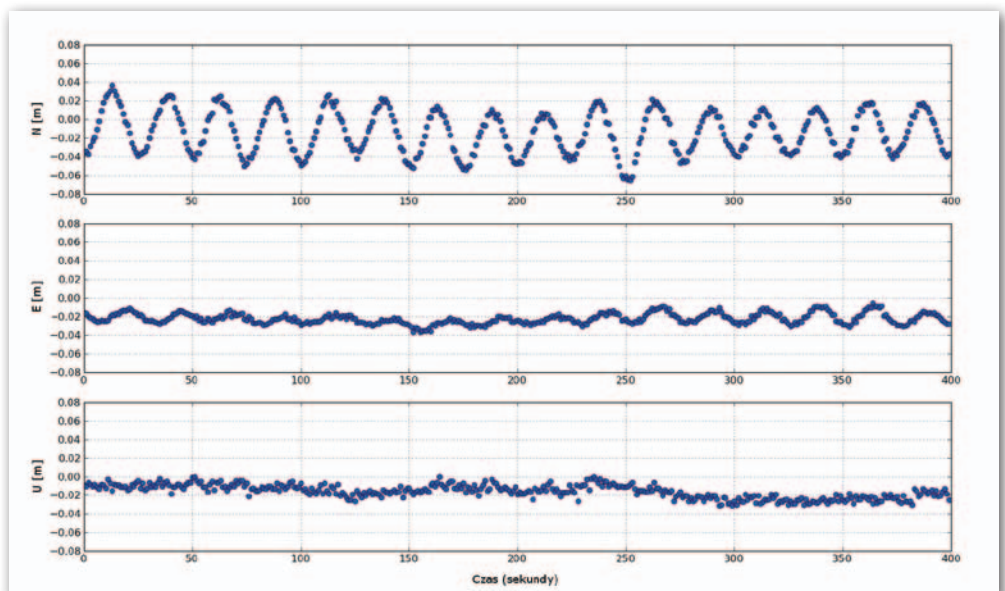
System jest jeszcze na etapie testów i implementacji kolejnych rozwiązań służących

przede wszystkim podniesieniu wiarygodności i zachowaniu ciągłości prowadzonych pomiarów. Kolejnym krokiem będzie implementacja algorytmu pozwalającego na diagnozowanie stanu technicznego i użytecznego konstrukcji w sposób zautomatyzowany. Wyniki prowadzonych prac zostaną szczegółowo opisane GEODECIE.

• Wyniki

Wykres na rysunku 5 przedstawia 45-sekundowy inter-

wał, w którym autorski system pomiarowy opracowany w CGS zarejestrował w czasie rzeczywistym przemieszczenia odbiornika ruchomego na szczycie komina. Są to trzy składowe pozycje, które ujawniają dynamiczną pracę konstrukcji wobec jednostajnego naporu wiatru o prędkości ok. 8 m/s z kierunku północnego. Różnica ciśnień powstała na skutek załamania się strumienia powietrza na kominie wywołuje ruchy konstrukcji w kierunku prostym do



Rys. 4. Efekt wirów Karmana zaobserwowany na 300-metrowym kominie w Ciepłowni Kawęczyn technika GNSS czasu rzeczywistego. Wartości względne przemieszczenia odbiornika ruchomego wyrażone w układzie ENU

kierunku wiatru. Zjawisko to, zwane wirami Karmana, dzięki możliwościom techniki GNSS staje się coraz lepiej rozpoznane i opisane (Himani et al., 2007).

Wyniki pomiaru potwierdziły użyteczność technologii GNSS w badaniu dynamiki zmian geometrii dużych konstrukcji inżynierskich. Wnioski końcowe można sformułować następująco:

- technika GNSS pozwala na badanie zarówno przemieszczeń poziomych, jak i częstotliwości drgań własnych obiektu,

- technika GNSS daje możliwość pomiaru poziomych składowych wektora przemieszczeń w trybie PPK z dokładnością poniżej 1 cm, co w przypadku przeważającej liczby konstrukcji kominowych o dużym znaczeniu gospodarczym jest w zupełności wystarczające,

- technika GNSS jest w stanie dostarczyć wiarygodnej informacji o częstotliwości drgań własnych konstrukcji oraz jej zmianach w czasie; obliczone częstotliwości z dwóch niezależnych odbiorników GNSS oraz dwóch niezależnych metod (GNSS i inklinometr) wynoszą 0,205 Hz, co jest zgodne z wynikami badań prowadzonych do tej pory na świecie,

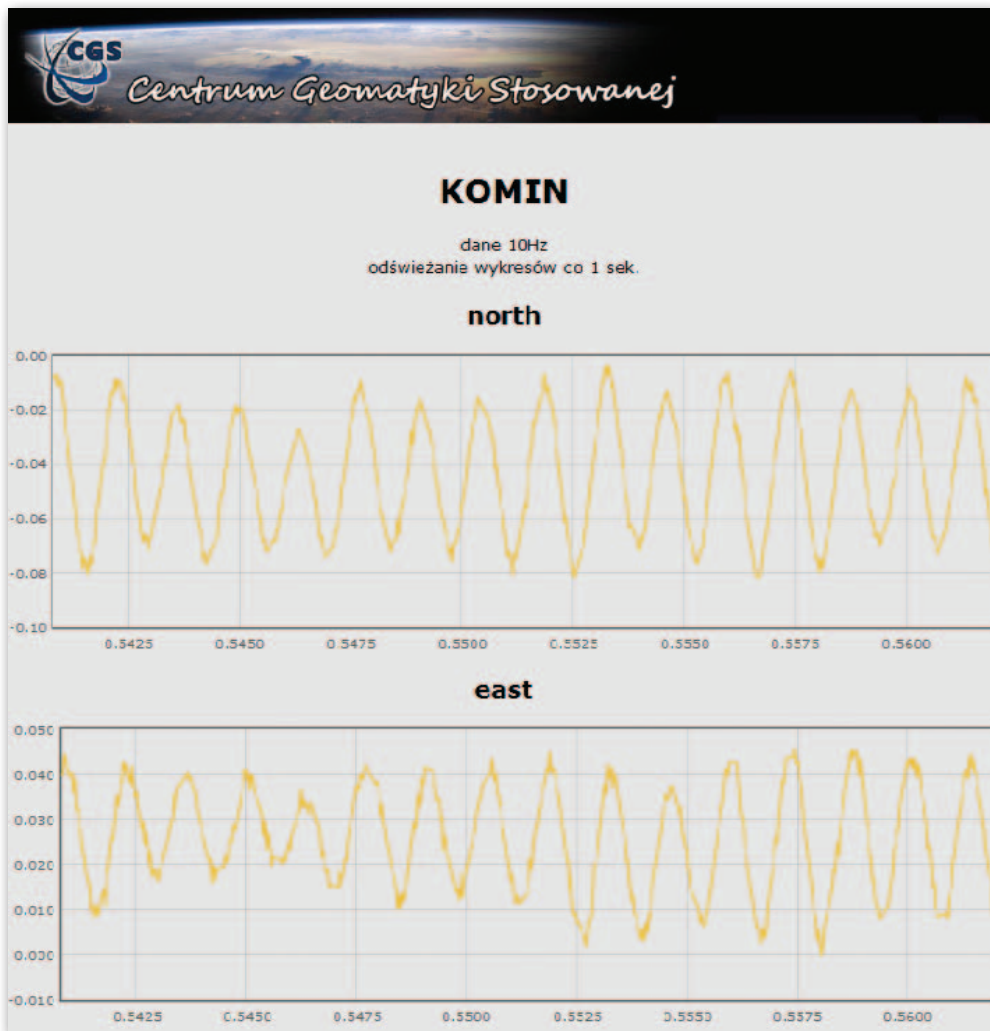
- dużym atutem techniki satelitarnej jest możliwość realizacji ciągłych pomiarów bez względu na porę dnia lub nocy w sposób w pełni zautomatyzowany,

- dla pełnej weryfikacji stanu konstrukcji pomiarom geometrii powinny towarzyszyć pomiary wielkości meteorologicznych, tj. prędkości i kierunku wiatru oraz pomiary parametrów termicznych.

dr hab. inż. Mariusz Figurski, prof. WAT
mgr inż. Maciej Wrona
mgr inż. Grzegorz Nykiel

Centrum Geomatyki Stosowanej
 Wojskowa Akademia Techniczna

Autorzy dziękują firmom: Czarski Trade Polska, Geotronics, GPS.PL oraz Leica Geosystems za pomoc w pracach opisanych w niniejszym artykule



Rys. 5. Przykładowy zrzut ekranowy z interfejsu użytkownika systemu z lutego 2012 r. Prędkość wiatru ok. 9 m/s

Literatura

- Beshor R., Kijewski-Correa T., Kochly M., Kareem A., Full-scale monitoring of wind induced response of tall buildings, Proceedings 4th World conference on structural control and monitoring, 2006;
- Bond J., Chrzanowski A., Kim D., Bringing GPS into harsh environments for fully automated deformation monitoring, Springer-Verlag, 2007;
- Breuer P., Chmielewski T., Górski P., Konopka E., The Stuttgart TV Tower – displacement of the top caused by the effects of Sun and wind, Engineering Structures, 2008, pp.2771-2781;
- Cazzaniga N.E., Pinto L., Bettinali F., Frigerio A., Structural monitoring with GPS and accelerometers the chimney of the power plant in Piacenza, Italy, 12th FIG Symposium, Baden, 2006;
- Chen G., Herring T.A. and King R.W., TRACK software manual, MIT, 1998;
- Chmielewski T., Breuer P., Górski P., Konopka E., Monitoring of tall slender structures by

- GPS measurements, Wind and Structures, 2009, pp.401-412;
- Chrzanowski A., Wilkins F., Accuracy evaluation of geodetic monitoring of deformations in large open pit mines. Proceedings of the 12th FIG symposium on deformations measurements Baden, Austria, 21-24 May 2007;
- Cosser E., Bridge deflection monitoring and frequency identification with single frequency GPS receiver, Institute of Engineering Surveying and Space Geodesy, University of Nottingham, 2003;
- Figurski M.; Gatuszkiewicz M.; Wrona M.; A bridge deflection monitoring with GPS; Artificial Satellites-Journal of Planetary Geodesy; Vol. 42 No. 4 2007, 229-238;
- Hide C., Blake S., Meng X., Roberts G., Moore T., Pack D., An investigation in the use of GPS and INS sensors for structural health monitoring, Institute of Engineering Surveying and Space Geodesy, University of Nottingham, 2005;
- Himani H., Knor K., Godbole P.N., Across-wind loading

- of tall buildings, Proceedings of Third National Conference on Wind Engineering, Kolkata, 2007;
- Ni Y.Q., Xia Y., Liao W.Y. and Ko J.M., Technology innovation in developing the structural health monitoring system for Guangzhou New TV Tower, Structural control and earth monitoring, 2009;
- Nickitopoulou A., Protopsalti K., Stiros S., Monitoring dynamic and quasi-static deformations of large flexible engineering structures with GPS: Accuracy, limitations and promises, Engineering Structures Vol 28, 2006, pp.1471-1482;
- Roberts G., Brown C., Meng X., Using GPS to monitor the Forth Road Bridge, Shaping the change – XXIII FIG Congress, Monachium, 2006;
- Tamura Y., Wind induced damage to buildings and disaster risk reduction, Proceedings of the APCWE-VII, Taipei, Taiwan, 2009;
- Wrona M., GNSS Application for Structural Monitoring Systems, Recent advantages in research on environmental effects on buildings and people, Polish Association for Wind Engineering, 2010, pp. 463-472.