

Nic nie jest statyczne, czyli system strukturalnego monitoringu przemieszczeń i odkształceń

LEICA GeoMoS

Postęp w zakresie pozyskiwania i wizualizacji danych, elektroniki oraz telekomunikacji umożliwia służbom geodezyjnym i geotechnicznym coraz sprawniejsze badanie stanu obiektów inżynierskich oraz przemieszczeń i odkształceń. Przykładem systemu integrującego różne techniki pomiarowe z oprogramowaniem sterująco-analitycznym jest GeoMoS firmy Leica Geosystems.

KRZYSZTOF KARŚNIA

• DYNAMICZNY ŚWIAT

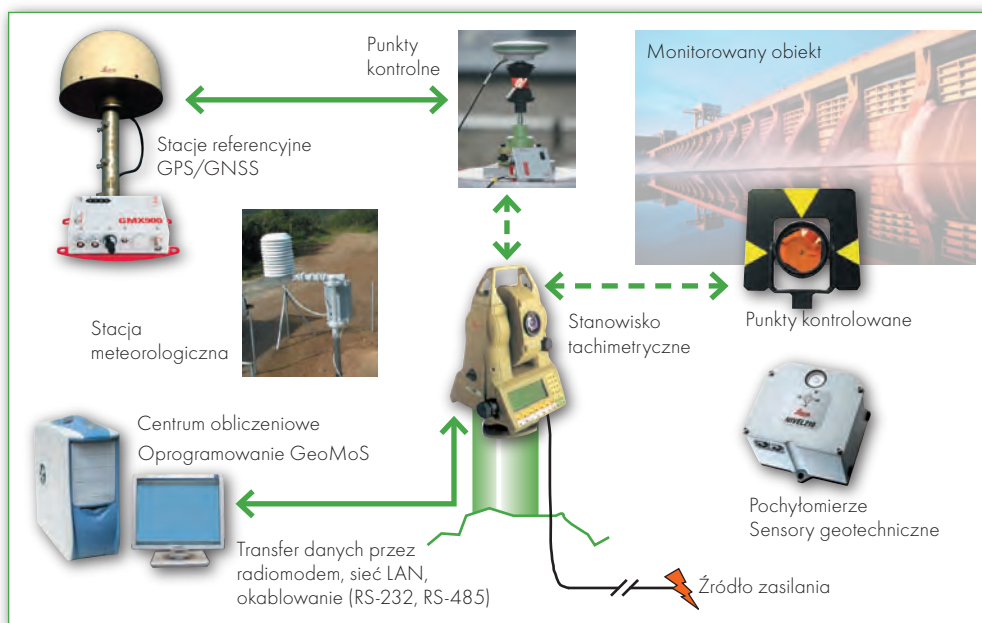
W świecie nic nie jest statyczne – nawet pozornie „stałe” układy odniesienia podlegają przecież zmianom, wywołanym choćby dynamicznym charakterem naszej planety. Na Ziemi trwają procesy geologiczne związane z ruchem płyt kontynentalnych i struktur tektonicznych. Słyszmy ciągle o wstrząsach, osuwiskach czy o erupcjach wulkanów. Oprócz skali globalnej, do czynienia mamy także z wydarzeniami lokalnymi, takimi jak powstawanie deformacji terenu, wychyłanie się masztów i wież, drgania konstrukcji mostowych czy odkształcanie się i przemieszczanie obiektów budowlanych.

W specjalnych zadaniach inżynierskich związanych z monitorowaniem tych zmian coraz szersze zastosowanie znajdują rozwiązania z zakresu integracji pomiarów geodezyjnych. To, co do niedawna było jeszcze przedmiotem rozważań czysto teoretycznych, dziś staje się standardową praktyką. Pozyskiwanie tym sposobem danych geometrycznych i geotechnicznych na temat obiektów naturalnych lub wzniesionych przez człowieka oraz prowadzenie

wnioskowania zakończonego podjęciem odpowiednich decyzji nazywamy monitoringiem strukturalnym. Zadania monitoringu strukturalnego stanowią jedno z najciekawszych i najbardziej zaawansowanych technologicznie wyzwań stawianych współczesnej geodezji. Prace takie wymagają wysokich dokładności, maksymalnego zaufania i sprawności instrumentarium.

Dzięki metodom geostatystycznym oraz numerycznym jesteśmy w stanie wykonywać analizy oraz przewidywać zachowanie się obiektów na podstawie

zbieranych okresowo danych. Na przykład coroczne kontrolne pomiary konstrukcji budowlanych, zbiorników wodnych czy zapór pozwalają badać ich stan oraz wyznaczać długookresowe zmiany. Nasuwa się jednak pytanie, co począć w przypadku wystąpienia nagłych, nieprzewidzianych czynników, których wychwycenie bez prowadzenia pomiaru ciągłego byłoby wręcz niemożliwe? Możemy wprawdzie analizować statyczny model obiektu, ale co z rzeczywistością, która wcale nie musi wyglądać tak, jak na to wskazują wyniki opracowań nume-



Rys. 1. Ogólny schemat budowy systemu monitoringu strukturalnego Leica GeoMoS



rycznych? Najdogodniejszym rozwiązaniem, dającym pełny obraz zachowania się badanej struktury, byłyby zatem pomiary ciągle prowadzone w czasie rzeczywistym.

Jak wiadomo, do wykonania każdej roboty geodezyjnej przeznaczony jest odpowiedni instrument. O różnych dokładnościach mówimy przecież w przypadku niwelacji precyzyjnej, tachimetrii elektronicznej czy pomiarów GPS prowadzonych w trybie RTK. Dodać należy, iż istnieje szeroki zakres urządzeń innych niż geodezyjne, dzięki którym pozyskujemy informacje o obiekcie – mowa o sensorach geotechnicznych, hydrotechnicznych czy budowlanych. Każdy instrument mierzy w nieco inny sposób, z inną częstotliwością pracy oraz inne cechy danego obiektu. Gdyby zatem połączyć zalety wszystkich tych urządzeń oraz zapewnić ich skoordynowane działanie, można by uzyskać wiarygodne informacje na temat rzeczywistego stanu obiektu w danym momencie. Nadal będzie to model, ale – co ważne – model dynamiczny, najbardziej przystający do rzeczywistości.

● SYSTEM MONITORINGU STRUKTURALNEGO GeoMoS

Takim kompleksowym rozwiązaniem spełniającym założenie budowania dynamicznego modelu obiektu terenowego jest system kontrolno-pomiarowy GeoMoS firmy Leica Geosystems. Nazwa jest akronimem angielskiej nazwy Geo-

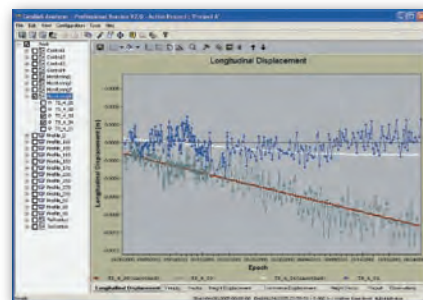
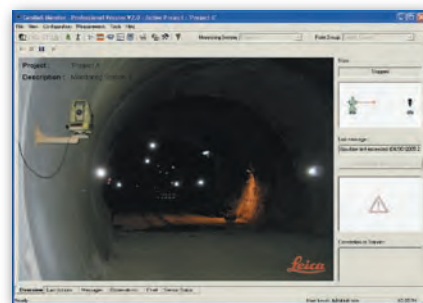
detic Monitoring System i oznacza system monitoringu geodezyjnego. Należy jednak zwrócić uwagę na fakt, że oprócz instrumentarium używanego w geodezji, system ten wykorzystuje także sensorykę geotechniczną (jak choćby precyzyjne pochłomierze) czy meteorologiczną (stacje mierzące temperaturę i ciśnienie atmosferyczne). Schemat budowy systemu monitoringu strukturalnego Leica GeoMoS przedstawiono na rysunku 1.

Wykorzystanie zalet integracji pomiarów geodezyjnych i geotechnicznych przy zastosowaniu budowanego na bieżąco modelu meteo staje się możliwe dzięki oprogramowaniu sterującemu. System musi zostać przede wszystkim odpowiednio skonfigurowany, skalibrowany i zaprogramowany do wykonywania określonych sekwencji pomiarowych. Sygnał pochodzący z danego urządzenia, czyli wynik pomiaru punktu kontrolowanego, musi zostać zinterpretowany i przygotowany do dalszej analizy. Instrumenty muszą mierzyć zgodnie z ustalonym porządkiem – czy to poszczególne punkty kontrolowane, czy też całe profile składające się z wielu punktów. Jest to bardzo ważne w procesie interpretacji wyników. W omawianym systemie rolę takiego „koordynatora” pełni aplikacja GeoMoS Monitor. Dodatkowo jest ona odpowiedzialna za współpracę z innym oprogramowaniem (przykładem jest choćby Spider zarządzający stacjami referencyjnymi GPS/GNSS) lub bazą danych SQL Server. Ponieważ interfejs graficzny przemawia

do użytkownika bardziej niż tylko „zwyczajny” zestaw zakładek, okien dialogowych i linii komend, moduł posiada funkcję wizualnej prezentacji wyników pracy w czasie rzeczywistym.

Dane należy wprawdzie pozyskać, ale powodzenie naszej pracy zależy głównie od ich właściwej analizy, przeprowadzenia wnioskowania oraz podjęcia odpowiednich decyzji. Służy do tego aplikacja GeoMoS Analyzer. Do jej zadań należy „obróbka” danych, przyjmowanie wyników postprocessingu danych GPS/GNSS, budowanie wykresów przemieszczeń i odkształceń, prezentacja trendów i korelacji między wynikami pomiarów pochodzących z różnych źródeł oraz informowanie o występujących zdarzeniach.

Wspomniane wykresy obrazujące dynamikę obiektu prezentowane są w różnych



Rys. 2. Widok okien dialogowych modułów GeoMoS Monitor, Analyzer oraz Site Map

formach: wizualizacji przemieszczeń pionowych, poziomych, względem osi lokalnego układu odniesienia, a także zaobserwowanych różnic wysokości punktów kontrolowanych.

Dzięki funkcji umożliwiającej wczytanie podkładu rastrowego lub mapy bitowej badanego obiektu operator systemu uzyskuje łatwy wgląd do jego punktów charakterystycznych (moduł Site Map). Otrzymanie informacji na temat przemieszczeń i odkształceń występujących w określonym miejscu staje się możliwe po wskazaniu na nie kursorem i kliknięciu przyciskiem myszy. Intuicyjny rozkład okien dialogowych oraz popularny interfejs użytkownika wpływa znacząco na szybkość i sprawność pracy. Zalety intuicyjnej obsługi doceniamy szczególnie w przypadku konieczności podejmowania natychmiastowych decyzji.

● SENSORYKA

Jak już wspomniano, jakość prowadzonego monitoringu przemieszczeń i odkształceń (czyli dokładność i wiarygodność pozyskania danych oraz budowy modelu badanego obiektu) zależy w równej mierze od oprogramowania analitycznego oraz od sensoryki, czyli użytego zestawu instrumentów. Oprócz dokładności pomiarów, przy założeniu specyficznych (czytaj: trudnych) warunków pracy, liczą się także przedział ufności (w zakresie którego znajdują się wyniki pomiarów powtarzalnych), ergonomia urządzenia oraz jego trwałość mechaniczna. Należałoby dodatkowo wspomnieć o problemie interoperacyjności, który normy ISO serii 19100 („Systemy informacji geograficznej”) definiują jako zdolność systemu do pełnej wymiany danych oraz współpracy z innymi systemami bez utraty jakichkolwiek informacji. GeoMoS z założenia jest systemem interoperacyjnym i otwartym. Producent przewidział bowiem możliwość wykorzystania jego „produktów” przez inne oprogramowanie, służące np. do zarządzania pracą przedsiębiorstwa, do kontrolowania procesów wydobywania kopaliny, czy zarządzania mapami oraz informacją przestrzenną (SIT).

Do pozyskiwania danych terenowych w ramach systemu GeoMoS firma Leica Geosystems poleca stosowanie instrumentarium dedykowanego specjalnie na potrzeby monitoringu strukturalnego (oczywiście istnieje również możliwość pracy z modelami znanymi z codziennej praktyki terenowej). Przewidziano zatem wykorzystanie jedno- i dwuczęsto-



Rys. 3. Odbiorniki GPS/GNSS serii GMX900 w zastosowaniach monitoringu strukturalnego

ściowych odbiorników GPS/GNSS, precyzyjnych tachimetrów elektronicznych, niwelatorów cyfrowych oraz sensorów geotechnicznych i meteorologicznych.

● **Odbiorniki GPS.** GMX901 to jednoczęstościowy, zintegrowany odbiornik GPS/GNSS przeznaczony do pomiarów długookresowych. Pozwala na prowadzenie ciągłych obserwacji aktywnych obiektów, jak mosty, zapory, ściany, budynki czy osuwające się skarpy. Posiada solidną obudowę, odporną na działanie wody, wysokich temperatur i wibracji. Natomiast GMX902 to pierwszy dwuczęstościowy precyzyjny odbiornik satelitarny przeznaczony specjalnie do monitoringu inżynierskiego. Zapewnia wykonanie pomiarów z bardzo wysoką dokładnością, a przy wykorzystaniu standardu NMEA może z łatwością zasilać danymi dowolne oprogramowanie zewnętrzne. Odbiornik spełnia kryteria

najważniejsze dla pracy ciągłej w terenie: niski pobór energii, łatwość obsługi oraz trwałość. GMX902 ukazuje swoje wszystkie możliwości dopiero podczas współpracy z zaawansowanym oprogramowaniem Spider – rejestrującym dane surowe, obsługującym sieci GPS/GNSS i prowadzącym zaawansowane obliczenia. Odbiorniki GPS/GNSS produkowane na potrzeby monitoringu strukturalnego GeoMoS przedstawia rys. 3. W ramach systemu GeoMoS zastosowanie znajdują także odbiorniki GPS/GNSS serii Leica 1200, a więc GX1230, GRX1230 lite, classic i pro (również z opcją pomiarów satelitów GLONASS).

● **Tachimetry elektroniczne.** Monitorowanie punktów kontrolowanych może przebiegać w sposób zdalny z wykorzystaniem precyzyjnej tachimetrii elektronicznej. W tym przypadku nie występuje ograniczenie liczby punktów



Rys. 4. Kontener pomiarowy oraz zmotoryzowana stacja tachimetryczna TCA2003

kontrolowanych – może ich być 10, 100 lub 1000. Dzięki zastosowaniu zmotoryzowanych stacji tachimetrycznych punkty te podlegają ciągłym obserwacjom w ramach kolejnych serii pomiarowych. Podstawowymi instrumentami są tutaj Leica TCA1201M oraz TCA2003 (rys. 4). Urządzenia te cechuje bardzo wysoka dokładność pomiarów kąta (odpowiednio 1" oraz 0,6") i odległości (1-2 mm dla standardowych długości celowych do 1000 m) oraz zwiększony zasięg – do 8 km przy jednym lustrze. Dzięki funkcji „skanowania sygnału” lokalizowane są nawet daleko położone punkty kontrolowane. Rozwiązanie to umożliwia efektywne wyznaczenie przemieszczeń dla wielkoobszarowych obiektów, takich jak kopalnie odkrywkowe, zapory wodne czy duże skarpy. Tachimetry elektroniczne umieszczane są na ogół w przeszklonych i klimatyzowanych kontenerach posiadających stałe źródło zasilania (rys. 4). W takich warunkach instrument może pracować w trybie ciągłym, niezależnie od warunków atmosferycznych, zabezpieczony przed uszkodzeniami, korozją i wandalizmem.

● **Pochyłomierze.** Pomiaru ciągle wartości pochyłeń oraz kierunków ich występowania zapewniają precyzyjne pochylomierze Nivel210 oraz Nivel220 (rys. 5), których działanie oparte jest na specjalnych rozwiązaniach optyczno-elektronicznych przy uwzględnieniu aktualnej temperatury otoczenia. Urządzenie charakteryzuje dokładność kątowna rzędu 3^{cc} przy precyzji pojedynczego odczytu 0,6^{cc}. Pochyłomierz Nivel210 posiada złącze RS-232, które umożliwia bezpośrednią wymianę danych z systemem GeoMoS. Natomiast wyposażony w RS-485 Nivel220 pozwala na połączenie wielu takich samych sensorów i jednocześnie ich pracę w strukturze sieci. Pochyłomierze Nivel wykorzystywane są z powodzeniem w monitoringu zapór i mostów, ale także wysokich budynków zarówno podczas budowy, jak i w trakcie późniejszej ich eksploatacji.

● **Niwelatory kodowe.** Dane niwelacyjne pozyskiwane są za pomocą urządzeń serii DNA (dla niwelacji precyzyjnej oraz technicznej o podwyższonej dokładności) lub Sprinter (dokładność rzędu 2 mm/1 km niwelacji). Instrumenty te znane są ze standardowej praktyki geodezyjnej (Sprinter) oraz z licznych zastosowań w realizacji i w pracach badawczych (DNA).

● **Sensory meteorologiczne.** Dodatkowo stosowane zasilają system monitorin-

gu informacjami służącymi do zbudowania dla danego terenu lokalnego modelu refrakcji. Oferowane przez Leica Geosystems urządzenie STS DTM Sensor pozwala mierzyć temperaturę oraz ciśnienie atmosferyczne, a także przesłać te dane do komputera sterującego.

Oprócz kwestii instrumentalnych, priorytetowego znaczenia nabierają telekomunikacja i łączność. Jedną z podstaw systemu monitoringu Leica jest szeroki zakres obsługiwanych technologii służących przesyłaniu danych z sensorów do komputera sterującego. W zależności od potrzeb oraz konfiguracji projektowanego systemu wyniki pomiarów terenowych mogą być transmitowane w sposób klasyczny (kabel), drogą radiową, przez sieć LAN, WLAN, za pomocą GSM/GPRS, UMTS czy też WiMax. O ewentualnym przekroczeniu zadanych wartości przemieszczeń, pojawieniu się różnych zdarzeń lub niespełnieniu warunków zdefiniowanych testów kontrolnych system GeoMoS poinformuje odpowiednio służby przez e-mail, SMS, komunikat pojawiający się w linii komend lub za pomocą określonego urządzenia zewnętrznego (sygnał ostrzegawczy, syrena itp.).

W tym miejscu należy ponownie odnieść się do wspomnianej wcześniej interoperacyjności i wskazać na jej pierwszoplanową rolę w sprawnym i wiarygodnym funkcjonowaniu całego środowiska pracy. Wysokiej klasy instrumentarium musi bowiem sprawnie działać w ramach jednej, spójnej instalacji badającej przemieszczenia i odkształcenia danego obiektu. Od jakości pracy i niezawodności technologii teleinformatycznych zależy zatem bezpośrednio bezpieczeństwo ludzi oraz mienia. Ponadto operator systemu musi mieć łatwy wgląd w działanie poszczególnych jego komponentów oraz możliwość przeprowadzenia szybkiego rozpoznania i zlokalizowania ewentualnego problemu.

● ZASTOSOWANIA

Na świecie spotkać możemy wiele zastosowań systemu GeoMoS różniących się charakterystyką oraz specyfiką badanych obiektów. Koncern Leica Geosystems wdrożył już ponad trzysta instalacji tego typu, a ich liczba stale się powiększa. Systematycznie wzrasta zapotrzebowanie na monitoring strukturalny. Szacuje się, że zainteresowane nim przedsiębiorstwa, organizacje oraz instytucje przeznaczają łącznie prawie pół miliarda dolarów rocznie, by móc w czasie rzeczywistym obserwować poziom przemieszczeń i od-



Rys. 5. Precyzyjny pochylomierz Leica Nivel wraz z przykładową instalacją na obiekcie

kształceń obiektów inżynierskich. Obserwacje geodezyjne i geotechniczne prowadzone w długich interwałach czasu nie są już wystarczające. Stan obiektu może bowiem ulec zmianie z godziny na godzinę, a wczesne wykrycie niepokojących tendencji skutecznie ustrzeże przed trudnymi do oszacowania konsekwencjami. Ponadto automatyzowane wykonywanie pomiarów cyklicznych oznacza ich standaryzację, czyli zapewnia pełną powtarzalność, co z kolei umożliwia prowadzenie wiarygodnych analiz danych oraz ich modelowanie.

Mówiąc o monitoringu strukturalnym GeoMoS, można by pokusić się o pewne pogrupowanie jego zastosowań. Permanentnym obserwacjom geodezyjnym i geotechnicznym podlegają więc mosty, osuwiska, budowle hydrotechniczne, kopalnie odkrywkowe czy tunele. Na przykład nowoczesne konstrukcje mostów przenoszą ogromne obciążenia, pracując zależnie od natężenia ruchu pojazdów, wpływu czynników atmosferycznych i meteorologicznych. Niezbędny więc staje się ciągły monitoring drgań i przemieszczeń, prowadzony np. za pomocą zintegrowanej pracy odbiorników GPS/GNSS. Na szczególną uwagę zasługują takie wdrożenia z Hongkongu, Chin i Japonii na konstrukcjach wiszących o rozpiętości od 620 m do 2,2 km, których dynamika pracy obserwowana jest przez 24 godziny na dobę z milimetrową dokładnością.



Rys. 6. Stacji bazowa GPS na tle monitorowanego mostu w Jiangyin, Chiny

Osuwiska powodują wielomilionowe straty oraz spadek dochodów kopalń i przedsiębiorstw produkcyjnych, a także uszkodzenia nawierzchni dróg i linii kolejowych. Wdrożenie systemu monitoringu dla tych obiektów odgrywa zatem kluczową rolę w zarządzaniu ryzykiem. Odpowiednie służby otrzymują szczegółowe i aktualne informacje na temat stabilności zboczy oraz deformacji terenów przyległych. W tym miejscu przytoczyć można przykładowe instalacje w odkrywcach Hambach, Rheinbraun (Niemcy), Československé armády, Most (Czechy) oraz w licznych kopalniach odkrywkowych Afryki, Azji, Ameryki Północnej czy Południowej. Ciekawe rozwiązania monitoringu strukturalnego prowadzone są także na zboczach Wulkanu Stromboli oraz w miejscowości Cortenova (Włochy), gdzie badane są procesy charakterystyczne dla aktywnych stref tektonicznych naszego kontynentu.

Obiekty, takie jak duże zbiorniki wodne i betonowe zapory, odgrywają niewątpliwie kluczową rolę podczas zaopatrzenia w wodę oraz w produkcji energii elektrycznej. Aby zapewnić bezpieczeństwo ludzi i mienia, stałym obserwacjom poddawane są przemieszczenia wywołane zmieniającym się poziomem wody w zbiorniku. Badana jest także stabilność obiektu hydrotechnicznego oraz aktywność sejsmiczna otaczającego terenu. Zastosowanie efektywnego systemu monitoringu umożliwia wczesne zlokalizowanie niepokojących zjawisk oraz określenie potencjalnych zagrożeń.

Wczesne wykrycie „słabych punktów” struktury obiektu pozwala na szybkie dokonanie stosownych napraw.

Systemy monitoringu przemieszczeń i odkształceń GeoMoS mają spory wkład w procesy sterowania pracami tunelowymi oraz w określanie deformacji terenów przyległych. Ciągły monitoring tuneli dostarcza bowiem niezbędnych informacji na temat warunków naprężenia górotworu. Wdrożenie na podobnych obiektach instalacji monitorujących bezpieczeństwa oznacza wzrost bezpieczeństwa zarówno samej budowy, jak i dla okolicznych osiedli oraz infrastruktury technicznej. Jako przykład podać można szwajcarski tunel Vereina oraz przebudowywany autostradowy węzeł Zurychu. Szczegółowe informacje na temat wielu wdrożeń systemu GeoMoS znajdują się na stronie internetowej http://www.leica-geosystems.com/pl/pl/lgs_1690.htm

Oprócz badania przemieszczeń i odkształceń dużych obiektów geotechnicznych, struktur geologicznych i konstrukcji inżynierskich, prezentowany system znajduje także wiele zastosowań w zakresie wyznaczania parametrów osiadań terenów budowlanych oraz w trakcie obsługi inwestycji.

● MONITOROWANIE ZMIAN KLUCZEM DO ROZWOJU

Wdrożenie systemu monitoringu strukturalnego w znacznym stopniu ogranicza możliwość występowania wszelkich zagrożeń związanych z obiek-

tem. Dzięki stałemu pozyskiwaniu oraz analizowaniu danych przestrzennych jesteśmy w stanie zrozumieć oraz przewidzieć procesy powodujące występowanie przemieszczeń i odkształceń. Zminimalizowane jest również zagrożenie integralności oraz bezpieczeństwa monitorowanych obiektów.

Bardzo szeroki zakres projektów realizowanych za pomocą środowiska GeoMoS w dziedzinie monitoringu mostów, wysokich budynków, tuneli, elektrowni, osuwisk, kopalń odkrywkowych czy zapór dowodzi konieczności stałego rozwoju opisywanej technologii. Prace nad nią prowadzone są przez specjalistów z Leica Geosystems już od ponad 15 lat. Rozwiązanie GeoMoS jest bowiem kontynuacją znanego z początku lat 90. XX wieku systemu APS-Win. Obecnie mamy do czynienia z wersją systemu 3.0, która między innymi oferuje użytkownikowi możliwość w pełni zdalnego zarządzania pracą wszystkich urządzeń (np. poprzez wykorzystanie transmisji danych GPRS). Daje to możliwość koordynacji wielu obiektów z poziomu jednego centrum zarządzania. Natomiast mająca się wkrótce ukazać tzw. wersja webowa o architekturze typu „klient-serwer” w pełni zintegruje system GeoMoS ze znanymi rozwiązaniami SIT.

Nic dookoła nas nie jest statyczne. Zarówno na skutek działalności człowieka, jak i w rezultacie naturalnych procesów świat, w którym żyjemy, podlega ciągłym zmianom. Skuteczne zarządzanie tymi zmianami jest elementem kluczowym dla rozwoju społecznego i ekonomicznego.

KRZYSZTOF KARSZNIA

jest pracownikiem Leica Geosystems Polska odpowiedzialnym za monitoring strukturalny

Zdjęcia z archiwum Leica Geosystems

Źródła:

- Góral W., Szewczyk J. (2004): Zastosowanie technologii GPS w precyzyjnych pomiarach deformacji, Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne AGH, Kraków;
- James H. (2006): Automatic deformation monitoring, „The American Surveyor”, March/April 2006;
- Cavanagh J. (1999): Geomatics, New Jersey;
- Sippel K. (2001): Modern monitoring system development, Proceedings of the 10th FIG Symposium on Deformation Measurements, Session III - „Software for deformation data collection, processing and analysis”, 19-22 March 2001, Orange, California USA;
- Czy interesują Państwa przemieszczenia? Leica Geosystems Sp. z o.o., Warszawa 2007;
- Strukturalny monitoring przemieszczeń i odkształceń Leica Geosystems, Leica Geosystems Sp. z o.o., Warszawa 2007;
- <http://www.iso.org>
- http://www.leica-geosystems.com/corporate/en/products/monitoring/lgs_4211.htm
- http://www.leica-geosystems.com/pl/pl/lgs_1690.htm