

OCENA TECHNOLOGII ZINTEGROWANEGO MONITORINGU OBIEKTÓW INFRASTRUKTURALNYCH

Streszczenie

W artykule przedstawiona została problematyka zintegrowanego monitoringu obiektów infrastrukturalnych z uwzględnieniem podejścia metrologicznego oraz fizykalnego. Infrastruktura techniczna, w szczególności kolejowa i drogową, wymaga utrzymania - kontroli stanu, badania stabilności posadowienia czy oceny warunków eksploatacji. Wspomniane zadania wykonywane są na bazie obowiązujących przepisów prawa oraz norm i wytycznych. Postęp w dziedzinie nowoczesnych technologii pomiarowych wprowadza, jednakże, wiele nowych możliwości, których praktyczne wdrażanie przynosi wiele korzyści o wymiarze materialnym i niematerialnym. Aspekt materialny dotyczy konkretnych oszczędności lub zwiększenia przychodów i wyraża się w wartościach liczbowych. Niektóre cechy mogą mieć również wymiar niematerialny – zwiększenie poczucia bezpieczeństwa, udostępnienie technologii szerszemu gronu odbiorców, czy choćby zwiększenie zainteresowania użytkowników stanem infrastruktury, co pośrednio może wiązać się ze zwiększeniem kultury użytkownika. Zintegrowane systemy monitoringu stanowią tego bardzo dobry przykład.

WSTĘP

Bezpieczeństwo infrastruktury technicznej stanowi jedno z głównych zagadnień współczesnego świata. Mówiąc o bezpieczeństwie, mamy na myśli bardzo wiele czynników oraz przypadków, które świadczą o jego wielowymiarowości. Z innymi bowiem zasobami będziemy mieli do czynienia w przypadku omawiania kwestii bezpieczeństwa międzynarodowego, publicznego, energetycznego, bezpieczeństwa państwa, technologii czy danych. Każde ze wspomnianych zagadnień jest takim swoistym wymiarem.

Rozpatrując tematykę bezpieczeństwa infrastruktury, mówimy zarówno o zapewnieniu sprawności środków transportu, wykrywaniu awarii i usterek, identyfikowaniu potencjalnych zagrożeń, a także zjawisk, których oddziaływanie na dany obiekt wywołuje określone skutki. Przykładów z tego zakresu może być bardzo wiele, ponieważ zapewnienie bezpieczeństwa dotyczy praktycznie każdego aspektu życia ludzkiego.

W przypadku infrastruktury, szczególnego znaczenia nabiera badanie jej sprawności i wytrzymałości. Obiekty infrastrukturalne – od dróg, budynków czy mostów po gazociągi lub bloki energetyczne – podlegają wnikliwym badaniom w trakcie budowy oraz okresowym ocenom podczas późniejszej eksploatacji. Kontrole takie określane są przepisami prawa oraz standardami technicznymi, a za ich realizację odpowiedzialne są specjalistyczne służby. Bardzo często, oprócz klasycznego podejścia pomiarowo-kontrolnego, mówimy o złożonych systemach monitorujących. W odniesieniu do konstrukcji budowlanych oraz maszyn, stosowane jest określenie „monitoringu stanu technicznego” (MST) – z ang. „Structural Health Monitoring” (SHM). Z zakresu tejże tematyki, w literaturze światowej istnieje bardzo bogaty zasób przedstawiający tak konkretne przypadki użycia systemów MST/SHM, jak również prezentujący rozważania naukowe. Warto w tym miejscu wymienić choćby pozycje: [3] czy [6]. Bardzo interesujące rozważania opisano również na stronach internetowych, spośród których z pewnością warto odwiedzić choćby [4] oraz [5].

Omawiając tematykę systemów monitorujących, warto doprecyzować samą terminologię, bowiem zamienne stosowanie określeń „monitoring” oraz „pomiar kontrolny” nie jest do końca poprawne. W

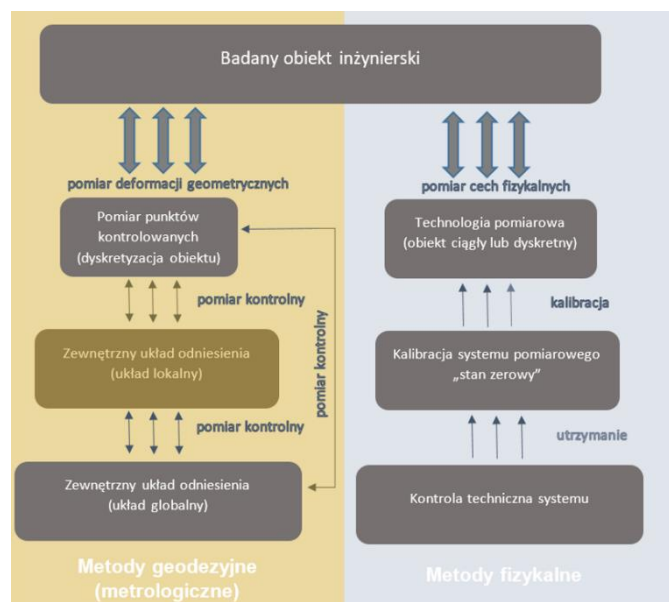
sposób jednoznaczny, problematykę tę definiuje prof. Piotr Witkowski [13]. Określa on mianowicie, w jakim przypadku mówimy o monitoringu, a kiedy przedmiotem rozważania jest zwykła obserwacja. Słowo „monitoring” pochodzi z łaciny i oznacza „przypominający” bądź „ostrzegający”. W związku z tym, istnieje konieczność określenia rodzaju zagrożenia, z którego wpływem na obiekt musimy się zmierzyć, by następnie dobrać odpowiednią technologię, która w najbardziej odpowiedni sposób zagrożenie to zdiagnozuje. W kolejnych etapach, należy tak skonstruowany system zainstalować na obiekcie, przetestować, by w efekcie uzyskać najbardziej wiarygodny obraz zachodzących zmian w kontekście przyczynowo - skutkowym. W tym miejscu, zastosowanie znajduje kluczowy moduł systemu monitoringu, a mianowicie przypominania i ostrzegania. Bez niego, system taki przybiera funkcję pomiarowo-kontrolną dokumentując niejako stan zachodzących zmian w czasie. Jest to podejście pasywne, które – co prawda – daje pewien obraz zachowania się badanego obiektu, nie informuje jednak w sposób należyty o budzących się trendach i zjawiskach oraz nie ostrzega odpowiedzialnych służb o możliwości wystąpienia potencjalnego zagrożenia.

1. INTEGRACJA SYSTEMOWA

Monitoring zmian stanu obiektów infrastrukturalnych może mieć wyraz fizykalny bądź metrologiczny [7], [14]. Podejście fizykalne – związane bezpośrednio z MST/SHM polega głównie na zastosowaniu czujników wielkości fizycznych w celu określenia charakterystyki badanego obiektu zmieniającej się w czasie. Wyrażane w ten sposób zmiany odnoszą się raczej do cech fizycznych konstrukcji – zmian naprężeń, częstotliwości drgań, temperatury itp. Nieco inne podejście reprezentowane jest w systemach monitoringu metrologicznego (inaczej: geodezyjnego, określanego mianem SMG – „systemy monitoringu geodezyjnego” bądź z ang. GMS – „geodetic monitoring systems”) [10]. Systemy SMG/GMS przedstawiają dokładny obraz zmian geometrii przedmiotu badań – konstrukcji budowlanej, elementu maszynowego, drogi, linii kolejowej, masztu etc.

Do niedawna, oba podejścia funkcjonowały niejako niezależnie dostarczając szeregi obserwacji o odmiennych charakterystykach i obrazujących różne właściwości obiektów. Dzięki postępowi naukowemu oraz technologicznemu, coraz częściej systemy fizykalne i me-

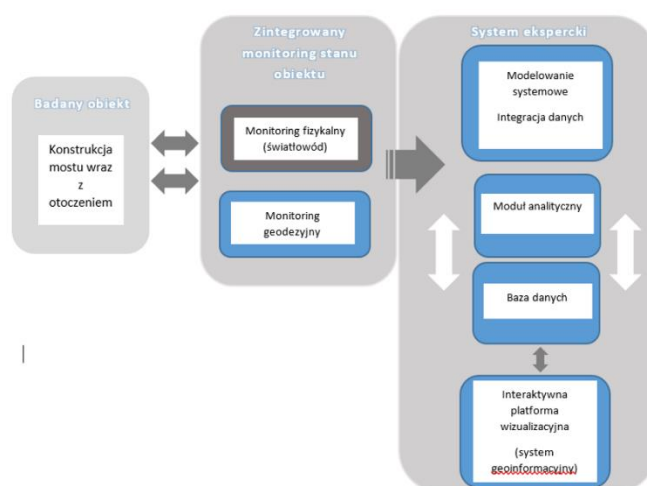
trologiczne podlegają integracji, najczęściej przy wykorzystaniu metod geoinformacyjnych. To właśnie geoinformacja spaja i integruje dane pomiarowe pochodzące z różnych źródeł, a także nadaje im wymiar przestrzenny. Kluczowym zadaniem jest tutaj odpowiednie pozyskiwanie, przetwarzanie oraz modelowanie danych reprezentujących różne cechy badanych obiektów. Będą to zatem analizy sieci dróg, linii energetycznych, lokalizacja obiektów, prowadzenie analiz zasięgu zjawisk lub zarządzanie strategiczne i kryzysowe. Bardzo istotnym elementem jest także należyta koordynacja pracy służb zajmujących się zapewnianiem bezpieczeństwa ludzi oraz mienia. Wiąże się ona z należytą analizą i interpretacją danych przestrzennych pozyskiwanych i aktualizowanych w bazach oraz zasobach geoinformacyjnych. Duże znaczenie przypisać można także geodezyjnemu monitoringowi przemieszczeń i deformacji, którego działanie bądź bezpośrednio zapobiega awariom i katastrofom, bądź też pozwala odpowiednio zareagować odpowiedzialnym służbom zanim zachodzące zjawisko przerodzi się w uszkodzenie, awarię bądź – w ekstremalnym stadium – w katastrofę. Schematyczne ujęcie funkcjonalne w kompleksowym monitorowaniu obiektów infrastrukturalnych przedstawia rys. 1.



Rys. 1. Schemat funkcjonowania systemów monitoringu obiektów infrastrukturalnych (źródło: [7])

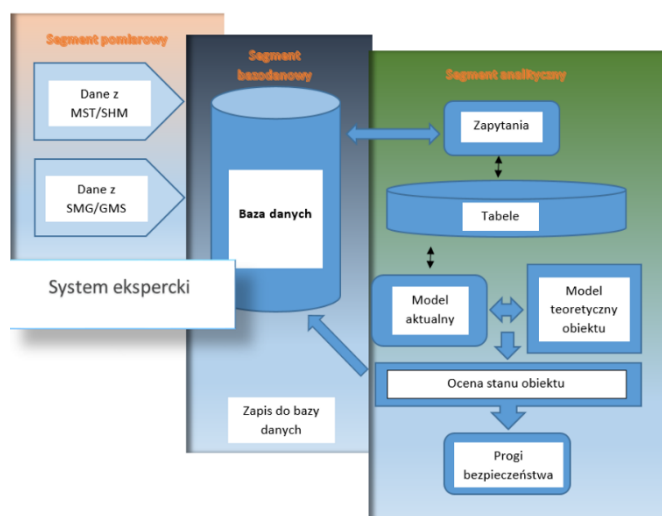
To co w podejściu geodezyjnym stanowi pomiar wyjściowy, do którego odnoszone są kolejne pomiary kontrolne, w systemach fizycznych określane jest mianem kalibracji. Po zainstalowaniu na obiekcie, czujniki podlegają kalibracji, czyli wyznaczeniu ich wewnętrznych parametrów odniesienia dostosowanych do warunków, w których będą pracowały.

Integracja obydwu podejść pozwala na zbudowanie systemu eksperckiego, dającego pełny obraz stanu obiektu, a także będącego trzonem kompleksowego zarządzania jakością oraz ryzykiem. Schemat przedstawiający propozycję integracji systemowej zaprezentowano na rys. 2.



Rys. 2. Schemat zintegrowanego działania systemów monitoringu obiektu infrastrukturalnego (źródło: [7])

Trzonem tak zaprojektowanego systemu eksperckiego jest baza danych, na bieżąco uzupełniana odczytami z czujników, replikowana i archiwizowana. Dzięki możliwościom oferowanym przez współczesne systemy geoinformacyjne, możliwe jest prowadzenie automatycznych analiz tak przestrzennych jak i atrybutowych, a także – na podstawie informacji zapisywanych w bazie danych, budowa i analiza modelu wyjściowego oraz aktualnego dla badanego obiektu (rys. 3).



Rys. 3. Schemat działania systemu eksperckiego zbudowanego dla monitorowanego obiektu infrastrukturalnego (oprac. własne)

Zagadnieniem wymagającym dużego nakładu pracy analitycznej jest ustalenie właściwych progów bezpieczeństwa, czyli poziomów alertowo-alarmowych, które informują użytkownika na temat aktualnego stanu obiektu. Większość istniejących rozwiązań informatycznych z dziedziny monitoringu wyposażona jest w takie moduły – problem polega, jednakże, na ich właściwym skonfigurowaniu. Wprowadzenie arbitralnych wartości zaczerpniętych ze specyfikacji technicznych bądź z innych opracowań, w większości przypadków nie sprawdza się lub stanowi jedynie rozwiązanie połowiczne. System monitoringu działa bowiem w konkretnych warunkach obrazujących unikalne zjawiska występujące na obiekcie. Sama konfiguracja czujników oraz instrumentarium geodezyjnego determinuje określony poziom dokładności pomiaru – nie bez znaczenia pozostaje choćby wpływ geometrii sieci kontrolnej (rozkład punktów odniesienia wraz z punktami kontrolowanymi) czy panujących w otoczeniu obiektu warunków meteorologicznych. Poprawne zdefiniowanie tzw. progów

bezpieczeństwa jest zatem elementem najistotniejszym i zarazem najbardziej skomplikowanym w konstruowaniu systemów monitoringu inżynierskiego. Swoje zastosowanie znajdują tutaj osiągnięcia współczesnej matematyki takie jak sztuczna inteligencja (np. sieci neuronowe), zastosowanie drzew decyzyjnych [xxx] czy uczenia maszynowego (z ang. „machine learning”).

2. PRZYKŁADY

Przykładem interesującego rozwiązania fizycznego monitoringu szlaków kolejowych jest rozwiązanie francuskich firm Cementys oraz Sateba [9]. Wykorzystanie czujników punktowych połączonych światłowodem miało na celu:

- zbudowanie trwałego systemu monitoringu służącego do badania obciążeń torów kolejowych w trakcie ich eksploatacji,
- opracowanie systemu niepodatnego na działanie pól elektromagnetycznych,
- skonstruowanie systemu pomiarów dynamicznych umożliwiającego badanie częstotliwości drgań i wibracji torów kolejowych w trakcie szybkiego przemieszczania się po nich składów kolejowych.

Na rys. 4 przedstawiono sposób umiejscowienia linii światłowodowych w prefabrykowanych podkładach kolejowych.



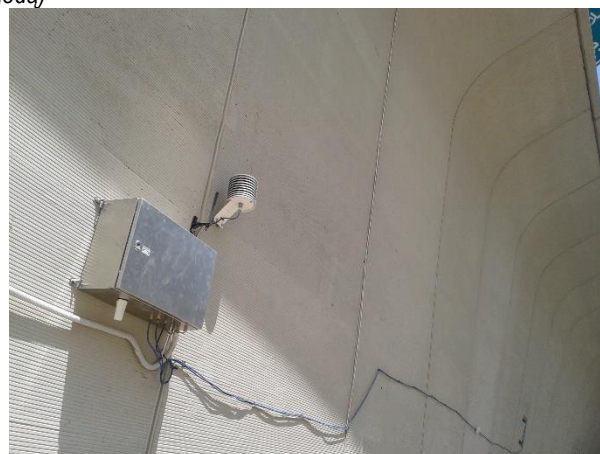
Rys. 4. Widok betonowego podkładu kolejowego wyposażonego w połączone światłowodami czujniki tzw. „siatki Bragga” (FBG) – fot. Cementys (zamieszczono za zgodą)

Wewnątrz prefabrykowanego podkładu betonowego umieszczono czujniki tzw. „siatki Bragga” (z ang. „Fibre Bragg Grating” – FBG). Ich ogólna zasada działania bazuje na detekcji zmian okresowej modulacji fal elektromagnetycznych powodowanych zaburzeniami położenia czujnika wywołanymi np. przez drgania. Oddziaływania takie znajdują swoje odzwierciedlenie w modyfikacji długości odbitej fali, co z kolei ustalane jest na etapie filtracji dokonywanej przez specjalne urządzenie odczytowo-analityczne zwane również „interrogatorem”. Jak podają autorzy, każdy podkład kolejowy wyposażony został w sześć czujników FBG. Wyposażenie infrastruktury podkładów kolejowych w infrastrukturę monitorującą (o nazwie „Smart Sleeper”) umożliwiło użytkownikowi badanie parametrów technicznych podkładów kolejowych, efektywne wykrywanie usterek kół i przeciążeń taboru, dokonywanie analiz jego starzenia się jak również na wykrywanie potencjalnych zagrożeń eksploatacji.

Spośród innych zrealizowanych projektów [5], na uwagę zasługuje również konstrukcja mostu podwieszanego (rys. 5), której szczegóły znajdują się na stronie internetowej <http://structurae.net/structurae/wadi-leban-bridge>. Szczegóły tego projektu opisano m.in. w [5], [7]. W przypadku tego obiektu, znacząca rolę odgrywa rozszerzalność termiczna materiałów. Obserwacjom podlega ponadto gradient spadku naprężeń w wantach, co może skutkować zaburzeniami w stateczności pylonów oraz występowaniem spękań betonu. Do badania podobnych konstrukcji używane są najczęściej zestawy czujników przedstawione w tabeli 1 (rys. 6).



Rys. 5. Widok przykładowego mostu podwieszanego z wdrożonym systemem monitoringu fizycznego – fot. Cementys (zamieszczono za zgodą)



Rys. 6. Widok instalacji sieci czujników systemu monitoringu dla mostu podwieszanego – fot. Cementys (zamieszczono za zgodą)

Tab. 1. Przykładowy zestaw czujników do monitoringu fizycznego konstrukcji mostu (na podstawie [7])

Rodzaj pomiaru	Rodzaj czujnika	Przeznaczenie
Pochylenie pylonów	Pochylomierz	Pomiary stanu wychyleń pylonów. Pomiary przemieszczeń poziomych.
Przemieszczenia i zmiany położenia konstrukcji mostu	Czujniki przemieszczeń	Badanie zmian stanu konstrukcji powodowanej różnymi czynnikami zewnętrznymi.
Pomiar szczelin i pęknięć	Szczelinomierz	Badanie zmian wielkości szczelin.
Ugięcia i przemieszczenia kierunkowe	Czujniki osiadań z punktem odniesienia na styku kolejnych przęsła	Monitoring przemieszczeń nawierzchni mostu i przerwania ciągłości.
Naprężenia w linach	Monitoring naprężeń lin	Monitoring ewentualnego przerwania lin.

Przykładem wykorzystania instrumentarium geodezyjnego w monitorowaniu obiektów infrastrukturalnych może być zastosowanie precyzyjnych zrobotyzowanych tachimetrów elektronicznych (z ang.

„robotic total-station” – RTS). Na rys 7 i 8 przedstawiono przykładowe instalacje systemów monitoringu bazujące na wspomnianych instrumentach.

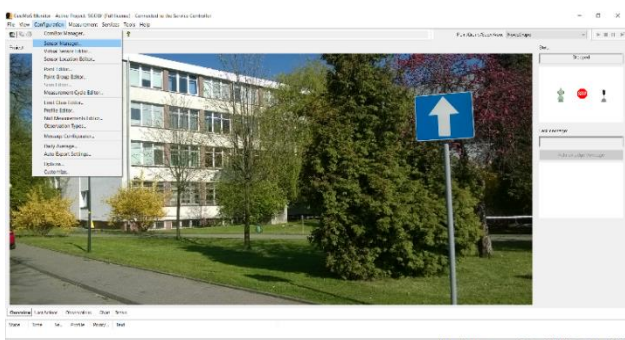


Rys. 7. Widok zrobotyzowanego tachimetru elektronicznego Leica TCRP1201 (fot. K.Karsznia)



Rys. 8. Widok zrobotyzowanej tachimetrycznej stacji skanującej Leica Nova MS50 (fot. K.Karsznia)

Po podłączeniu do oprogramowania sterująco-analitycznego (np. Leica GeoMoS) – rys. 9 – możliwe jest prowadzenie pomiarów automatycznych bądź do zastabilizowanych uprzednio na obiekcie specjalnych reflektorów zwrotnych (rys. 10), bądź też bezpośrednio do powierzchni badanego obiektu (tzw. „pomiar bezreflektorowy” z wykorzystaniem wiązki czerwonego lasera).



Rys. 9. Widok ekranu głównego aplikacji Leica GeoMoS Monitor (lic. Katedra Inżynierii Budowlanej SGGW)



Rys. 10. Widok przykładowego reflektora zwrotnego - fot. K.Karsznia

Taka metoda pomiaru deformacji oraz prowadzenia monitoringu obiektów infrastrukturalnych charakteryzuje wysoka dokładność (na poziomie milimetrowym) oraz możliwość określania zmian geometrycznych względem zewnętrznych układów odniesienia. W praktyce geodezyjnej, znane są liczne zastosowania zrobotyzowanych stacji tachimetrycznych w monitoringu [2], [11], [12], [15]– zarówno pojedynczych instalacji, jak również rozbudowanych, kompleksowych systemów złożonych z wielu instrumentów pracujących jednocześnie.

Metodą pomiarową o dużym znaczeniu praktycznym jest również wykorzystanie satelitarnych odbiorników GNSS (z ang. „Global Navigation Satellite Systems”). Geodezja satelitarna umożliwia pozycjonowanie punktów w czasie rzeczywistym na poziomie centymetrowym. Przy zastosowaniu odpowiedniej metodyki pomiaru (statyczny pomiar wektorów za pomocą odbiorników GNSS), możliwe jest osiągnięcie dokładności milimetrowych, co znajduje swoje zastosowanie w monitoringu deformacji różnych obiektów inżynierskich –naturalnych (osuwiska), antropogenicznych (wzrostki górnicze, wały przeciwpowodziowe) oraz konstrukcji budowlanych o dostępnym horyzoncie (konieczność zapewnienia odbioru sygnałów satelitarnych przez odbiorniki GNSS).

PODSUMOWANIE

Oceniając różne aspekty bezpieczeństwa infrastruktury technicznej, szczególną uwagę zwrócić należy tzw. interoperacyjności systemowej, czyli sprawnego, zintegrowanego działania różnych systemów w celu dostarczenia wiarygodnej informacji dotyczącej stanu przedmiotu prowadzonych badań. Ważną rolę w takich zadaniach odgrywa nowoczesna technologia pomiarowa oraz rozwijane metody analiz numerycznych, włącznie z probabilistyką oraz uwzględnianiem różnych typów danych. Budowa i rozwój takich zintegrowanych modeli jest jednym z głównych nurtów badań prowadzonych tak w Polsce jak i w wiodących ośrodkach naukowych całego świata. W problematykę jakości i aktualności pozyskanych danych o obiekcie wpisuje się również ich standaryzacja i normalizacja.

Dzięki integracji pomiarów oraz odpowiedniej synchronizacji baz danych w celu zbudowania spójnego systemu eksperckiego o obiekcie, możliwa jest wiarygodna ocena jego stanu, co w efekcie przyczynia się do efektywnego zarządzania jakością oraz ryzykiem.

BIBLIOGRAFIA

1. Ćmielewski K. (2007), Zastosowanie technik światłowodowych i laserowych w precyzyjnych pomiarach kształtu i deformacji

- objektów inżynierskich, Wydawnictwo Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu
2. Dominici D., Galeota D., Gregori A., Rosciano E., Alicandro M., Elaiopoulos M. (2014), Integrating geomatics and structural investigation in post-earthquake monitoring of ancient monumental Buildings Journal of Applied Geodesy 2014; 8 (2):141–153
 3. Ettouney M.I., Alampalli S. (2012), Infrastructure Health in Civil Engineering Theory and Components, Taylor & Francis Group
 4. <http://www.bezprzewodoweczujniki.pl>
 5. <http://www.cementys.com>
 6. Karbhari V. M., Ansari F. (2009), Structural health monitoring of civil infrastructure systems, Woodhead Publishing Limited, Oxford, Cambridge, New Delhi
 7. Karsznia K. (2016), Pomiary zintegrowane z użyciem światłowodów w monitorowaniu obiektów mostowych, Mosty 4/2016, str. 24-27.
 8. Karsznia K. (2014), Geoinformacja a bezpieczeństwo obiektów infrastruktury technicznej – podejście interdyscyplinarne, Geoinformacja jako metoda ochrony przed geozagrożeniami -monografia pod redakcją Krzysztofa Karsznia i Konrada Podawcy, Wydawnictwo SGGW 2014, Warszawa, s.7-21.
 9. Loaec A., Petit Ch., Lanticq V., Lamour V. (2014), Smart Sleeper - Measurement of bending moments in concrete sleepers laid on ballast tracks Transport Research Arena 2014, Paris
 10. Prószyński W. (2016), Illustrative presentation of some basic concepts of network internal reliability with comments as regards engineering surveys, Reports on Geodesy and Geoinformatics vol. 101/2016, str. 54-59
 11. Psimoulis P.A., Stiros S.C. (2007), Measurement of deflections and of oscillation frequencies of engineering structures using Robotic Theodolites (RTS), Engineering Structures 29 (2007) 3312–3324
 12. Stiros S.C., Psimoulis P.A (2012), Response of a historical short-span railway bridge to passing trains: 3-D deflections and dominant frequencies derived from Robotic Total Station (RTS) measurements, Engineering Structures 45 (2012) 362–371
 13. Witakowski P. (2007), Zdalne monitorowanie obiektów budowlanych podczas budowy i eksploatacji, Czasopismo Techniczne, Biblioteka Cyfrowa, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej
 14. Wolski B. (2006), Monitoring metrologiczny obiektów geotechnicznych, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków
 15. Yang By In Tae, Park J.K. Kim D.M. (2007), Monitoring the Symptoms of Landslide Using the Non-Prism Total Station, KSCE Journal of Civil Engineering, Vol. 11, No. 6 / November 2007, pp. 293-301

THE ASSESSMENT OF INTEGRATED MONITORING TECHNOLOGIES APPLIED ON INFRASTRUCTURAL OBJECTS

Abstract

The article presents the problems of integrated monitoring of infrastructure facilities in metrology and physical aspects. Technical infrastructure, especially rail and road requires maintenance – so called health monitoring examining its stability and other factors that take place during construction and further exploitation. Such tasks are based on the applicable standards and guidelines. The progress observed in the development of modern measurement technologies provides, however, a lot of new possibilities, which practical implementation are beneficial. Material aspects concern savings, increase revenues and can be expressed in numerical values. Some features may also have an immaterial dimension – for example increased security or the fact that modern technology is provided to a wider audience. Implementing of infrastructure safety systems may also be indirectly associated with increased use of good practices. Integrated monitoring systems exemplify that very well.

Autor:

dr inż. **Krzysztof Karsznia** – Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Katedra Inżynierii Budowlanej, tel. 022 5935143, e-mail: Krzysztof_Karsznia@sggw.pl,