

Pomiary zintegrowane z użyciem światłowodów w monitorowaniu obiektów mostowych

dr inż. Krzysztof Karsznia

Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie
Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska
Katedra Inżynierii Budowlanej

Monitoring stanu konstrukcji inżynierskich (SHM) stanowi jeden z głównych tematów poruszanych w budownictwie oraz w naukach pokrewnych, a także we współczesnej geodezji inżynierskiej. Monitoring fizyczny różni się jednak nieco w swoich założeniach od technologii monitoringu geodezyjnego. Dotychczas systemy te pracowały na obiektach w sposób niezależny, a uzyskane wyniki zestawiano i porównywano na etapie późniejszych analiz. W artykule zaproponowano koncepcję integracji obu podejść w celu zasilenia spójnej bazy wiedzy o obiekcie.

W świecie geoinformacji od wielu lat uwagę naukowców oraz wykonawców projektów budowlanych zwraca integracja różnych źródeł danych. Takie podejście pozwala bowiem lepiej rozpoznać charakter zmian zachodzących na badanym obiekcie, a tym samym – lepiej zweryfikować model z rzeczywistością. Integracja pomiarów stanowi rozwiązanie komplementarne – nie możemy mówić bowiem o „wyższości” którejkolwiek z wdrożonych technik pomiarowych. Kompleksowa ocena zachowania się konstrukcji, jak również warunków panujących w jej otoczeniu pozwala na zachowanie unikalności każdego nowo obserwowanego obiektu, a poprzez zbudowanie tzw. „bazy wiedzy” daje możliwość lepszego doboru technologii monitorujących obiekt oraz pełniejszego wykorzystania dostarczanych danych. Budowane w ten sposób rozwiązania przyjmują znamiona systemów eksperckich o różnym stopniu zaawansowania. Specjalistyczne grupy robocze złożone z naukowców współpracujących z firmami wykonawczymi tworzą niekiedy bardzo zaawansowane technologicznie rozwiązania wykorzystujące nierzadko najnowocześniejszą algorytmikę czy sztuczną inteligencję. Biorąc pod uwagę złożoność obiektów, ich usytuowanie w niekiedy bardzo niedogodnych, a wręcz trudnych warunkach terenowych, z ograniczoną dostępnością czy też – choćby z racji ograniczeń wynikających z przepisów BHP – brakiem możliwości wiarygodnej oceny niektórych elementów badanej konstrukcji – należy stwierdzić, że coraz częściej stosowane są wysublimowane zabiegi technologiczne. Polegają one na korzystaniu z najmniej „inwazyjnych”, w dużej mierze zdalnych technologii pomiarowych (geodezyjnych, metrologicznych, termowizyjnych czy meteorologicznych) wspieranych przez metody fizyczne. Te ostatnie w coraz większym zakresie wykorzystują technologie światłowodowe, które z racji swojej trwałości i niezawodności znajdują zastosowanie na różnego typu obiektach budowlanych i topograficznych. Dodatkowym atutem technologii światłowodowych jest możliwość uzyskiwania praktycznie ciągłych strumieni danych, a tym samym informujących o wykrytych zmianach zachowania się konstrukcji w czasie rzeczywistym. Z racji uwarunkowań konstrukcyjnych pomiary światłowodowe wykorzystywane są w przeważającej mierze do badań fizycznych, aczkolwiek, dzięki dynamicznemu rozwojowi technologii oraz postępowi naukowemu, stosuje się je również w pomiarach względnych, pozwalając choćby na precyzyjne wyznaczanie deformacji konstrukcji w 3D. Pomiary te są jednak odnoszone do tzw. „stanu zerowego” określonego czujnika – oznacza to, że pomiarem wyjściowym będzie stan wskazany po instalacji systemu na obiekcie. Uzupełnieniem takiego podejścia może być wykorzystanie metod geodezyjnych bazujących na układach odniesień i, dzięki temu, pozwalających na określenie zachowania badanej konstrukcji w stosunku do środowiska zewnętrznego przy założeniu jego stałości lub uwzględnieniu błędności wyznaczenia układu zewnętrznego. Schematycznie przebieg pomiaru deformacji obiektu inżynierskiego przedstawiono na rys. 1.

I SUMMARY

Integrated surveying aided by fibre optics in the structural monitoring of bridges

Structural health monitoring (SHM) of engineering structures belongs to the main topics discussed in civil engineering and its related sciences. It is also one of the principle subjects of geodetic engineering which applies the latest achievements of mechanics, electronics and robotics, particularly in its instrumentation. Nevertheless, SHM differs from technologies used in geodetic structural monitoring. Until now, both these diagnostic systems have been working on engineering structures independently and the collected data have been compared in further analyses. The paper presents a concept of the integration of both methodologies in order to provide a common database with a coherent information about a structure. As a result, an expert system will be developed, underlying the modelling of the deformation process and identifying phenomena affecting the tested structures.

Keywords: geodetic monitoring, structural health monitoring, geoinformation, expert system, fibre optics



Widok mostu Wadi Leban w Rijadzie, na którym wdrożono system geomonitoringu

Metody geodezyjnego monitorowania obiektów mostowych opisywano już wielokrotnie na łamach „Mostów”, np. [3, 4]. Na przestrzeni lat do systemów wdrażanych na różnych obiektach wprowadzano głównie nowe rozwiązania instrumentalne, co pewien czas pojawiały się również aktualizacje oprogramowania umożliwiającego automatyczne pozyskiwanie i przetwarzanie danych przestrzennych. Obecnie jednym z głównych tematów badawczo-rozwojowych jest integracja systemowa polegająca na budowaniu modeli deformacji konstrukcji obserwowanego obiektu na podstawie różnych danych. Schematyczne ujęcie takiego spójnego systemu eksperckiego przedstawiono na rys. 2. Coraz częściej w procesach identyfikacji zjawisk oraz w opracowaniu wyników pomiarów kontrolnych dla obiektów inżynierskich stosowane są metody sztucz-



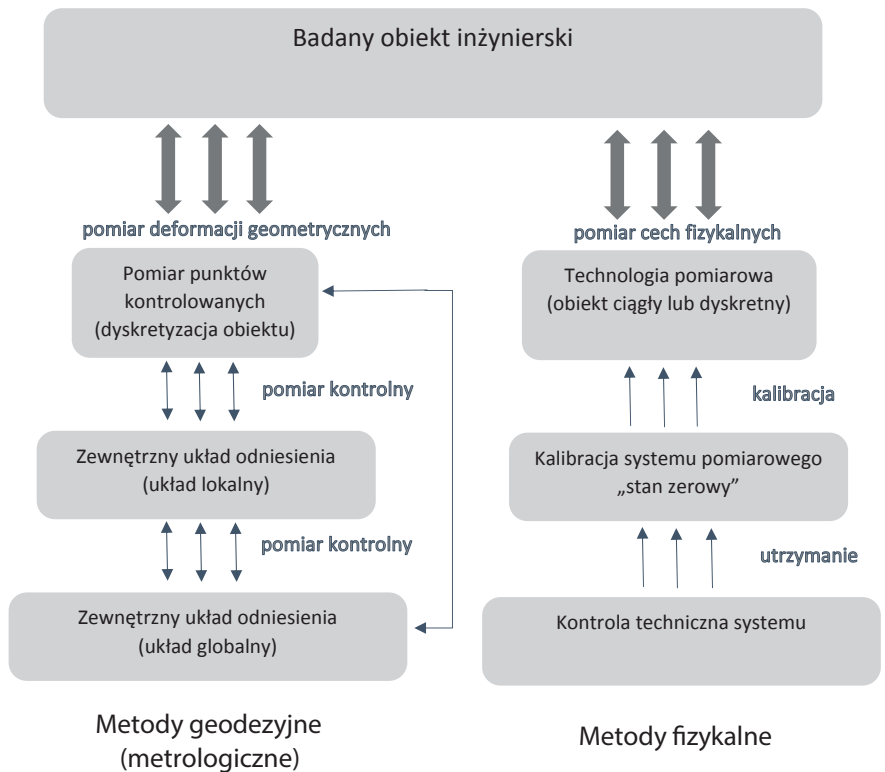
Widok konstrukcji mostu Wadi Leban w Rijadzie, na którym wdrożono system geomonitoringu



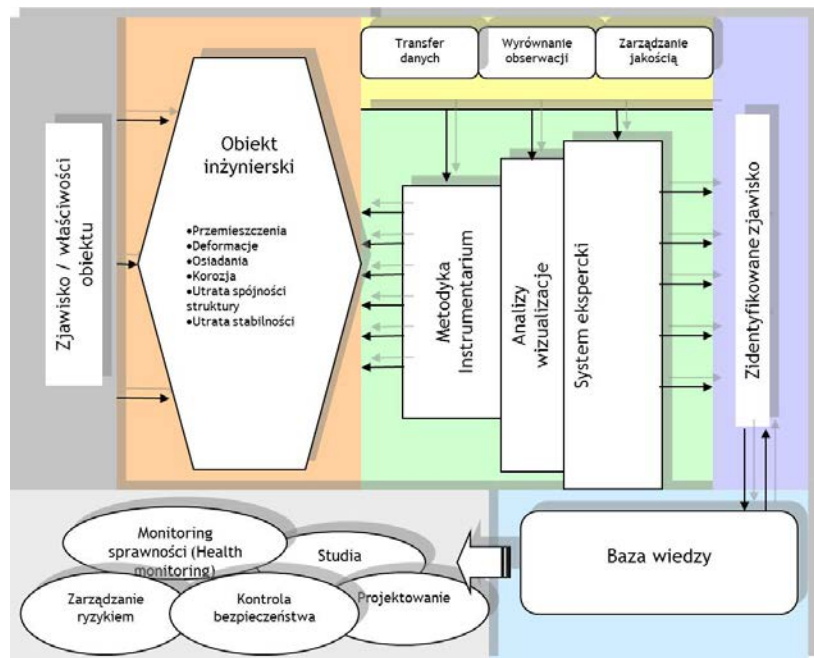
Widok konstrukcji mostu Wadi Leban w Rijadzie, na którym wdrożono system geomonitoringu

nej inteligencji [2]. Postęp technologiczny w zakresie rozwiązań informatycznych umożliwia optymalizowanie przetwarzania danych (również dużych zbiorów danych – tzw. „Big Data”), jak również opracowywanie modeli integracji danych pochodzących z różnych źródeł [5]. Podobne badania prowadzone są również w Katedrze Inżynierii Budowlanej na Wydziale Budownictwa i Inżynierii Środowiska warszawskiej SGGW.

W ostatnich latach w monitorowaniu obiektów inżynierskich nastąpił dynamiczny rozwój metod światłowodowych [10]. Jako jedna z czołowych technologii monitoringu fizykalnego znajduje ona szerokie zastosowanie w monitoringu mostów, dostarczając wiarygodnych i bieżących informacji na temat stanu konstrukcji (jej temperatury, drgań czy deformacji). Ponadto dzięki zastosowaniu odpowiednich przetworników można



Rys. 1. Schemat przebiegu pomiaru deformacji obiektu inżynierskiego. Opracowanie własne

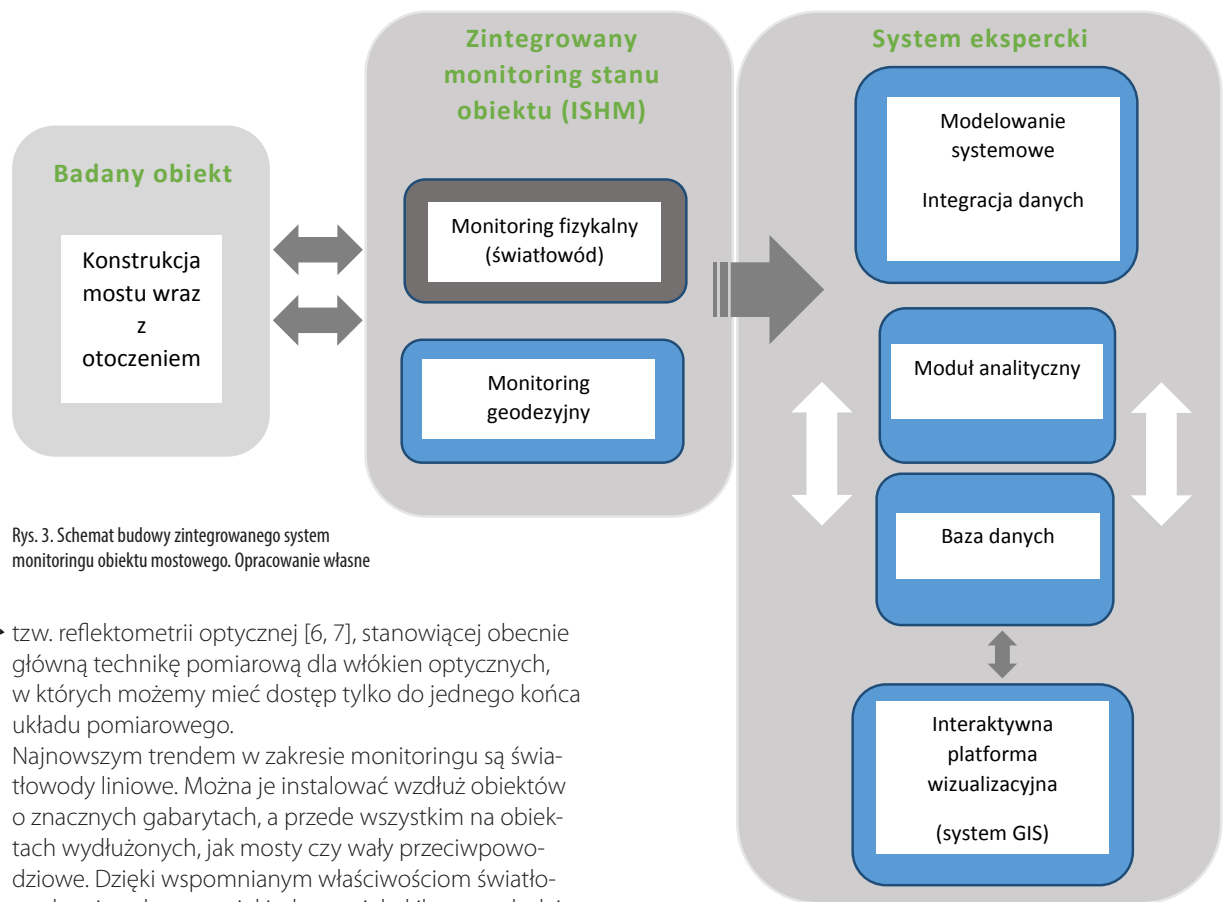


Rys. 2. Schemat systemu eksperckiego dla monitorowanego obiektu inżynierskiego. Opracowanie własne

wnioskować o zmianach temperatury obiektu oraz o innych zjawiskach wywołanych zmiennymi warunkami meteorologicznymi [6].

Światłowodowe systemy monitoringu – dlaczego się je stosuje?

Główną zaletą światłowodowych systemów monitoringu jest fakt, że elementem pomiarowym jest cały światłowod. Istnieje zatem możliwość badania stanu obiektu z zachowaniem wiernego odwzorowania jego elementów. Dzięki właściwościom światłowodu, takim jak niewielka średnica przekroju włókna oraz elastyczność, może on zostać dopasowany praktycznie do dowolnego kształtu elementu konstrukcji. Ponadto duża odporność na działanie warunków termicznych oraz innych czynników zewnętrznych powoduje, że systemy monitoringu bazujące na światłowodach cechują dużą niezawodność oraz wiarygodność pozyskanych danych. Światłowodowe pomiary monitorujące są możliwe dzięki zastosowaniu



Rys. 3. Schemat budowy zintegrowanego systemu monitoringu obiektu mostowego. Opracowanie własne

Piśmiennictwo

- Bernstein H.: *Messelektro-nik und Sensoren*. Springer Fachmedien, Wiesbaden 2014.
- Gałuszka A.: *Wybrane aspekty planowania zadań w hybrydowych modelach sztucznej inteligencji*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2012.
- Karsznia K.: *Geodezyjny monitoring obiektów mostowych*. „Mosty”, 6/2011, s. 24-31.
- Karsznia K.: *Monitoring mostów – zastosowanie serwisów internetowych*. „Mosty”, 6/2012, s. 24-27.
- Mayer-Schönberger V., Cukier K.: *Big Data – rewolucja, która zmieni nasze myślenie, pracę i życie*. Wydawnictwo MT Biznes, Warszawa 2015.
- Rębosz D.: *Światłowody w monitoringu*. „Inżynier Budownictwa”, 12/2015, s. 72-74.
- Romaniuk R.: *Miernictwo światłowodowe*. Instytut Systemów Elektronicznych, Politechnika Warszawska, Warszawa 2001.
- Salamak M.: *Obiekty mostowe na terenach z deformującym się podłożem w świetle kinematyki brył*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2013.
- <http://www.cementys.com> („Innovative Fiber Optic monitoring Bridge”).
- Wenzel H.: *Health monitoring of bridges*. John Wiley & Sons, Ltd., 2009.

▶ tzw. reflektometrii optycznej [6, 7], stanowiącej obecnie główną technikę pomiarową dla włókien optycznych, w których możemy mieć dostęp tylko do jednego końca układu pomiarowego. Najnowszym trendem w zakresie monitoringu są światłowody liniowe. Można je instalować wzdłuż obiektów o znacznych gabarytach, a przede wszystkim na obiektach wydłużonych, jak mosty czy wały przeciwpowodziowe. Dzięki wspomnianym właściwościom światłowody zainstalowane niekiedy na wielu kilometrach dają możliwość precyzyjnego zidentyfikowania zaistniałych w konstrukcji ruchów lub awarii (jak np.: deformacje podłoża, opisane szczegółowo w monografii [8], wycieki, efekty akustyczne itp.). Zaletą takiego monitoringu jest brak tzw. „martwych miejsc” – jest to zatem pomiar ciągły, realizowany w czasie rzeczywistym, niepodatny na działanie warunków atmosferycznych. Jak podano w artykule [6], jeden światłowód zainstalowany, przykładowo, na długości 20 km infrastruktury jest równoważny 20 tysiącom klasycznych czujników rozmieszczonych wzdłuż tego samego obiektu co 1 m.

Zasady działania systemu

Ciekawe rozwiązania z zakresu zastosowań technologii światłowodowych do monitorowania obiektów inżynierskich przedstawia np. serwis informacyjny firmy Cementys [9]. Wśród opisów zrealizowanych projektów na uwagę zasługuje wzniesiona w 1997 roku konstrukcja mostu wadowego Wadi Leban w Rijadzie w Arabii Saudyjskiej (więcej pod linkiem: <http://structurae.net/structures/wadi-leban-bridge>), której długość wynosi 736 m. W przypadku tej przeprawy pojawiające się problemy dotyczą rozszerzalności termicznej materiałów, z których zbudowana jest konstrukcja. Ponadto obserwacjom podlegają gradient spadku naprężeń w linach (co może zachwiać równowagą konstrukcji pylonów) oraz pojawiające się spękania betonu. Zaproponowany przez Cementys system monitoringu fizycznego tego obiektu składa się z połączenia technologii czujników punktowych (co przedstawiono w tab. 1) oraz światłowodowych.

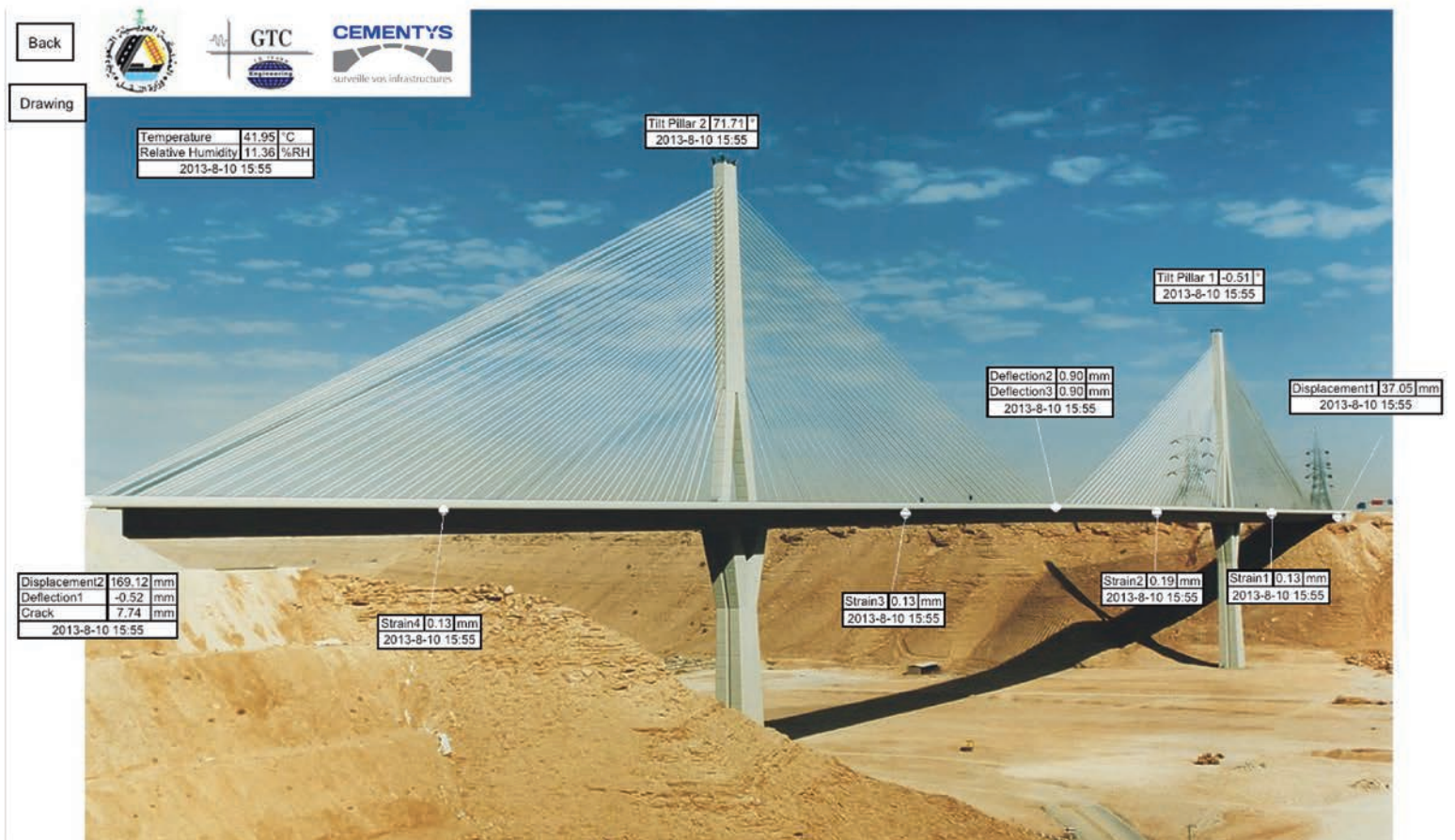
Pozyskiwanie danych odbywa się przy zastosowaniu układu sterującego złożonego z światłowodowej siatki Bragga (*Fiber Bragg Grating*, FBG) oraz optycznego multipleksera zarządzającego pracą sieci czujników. Dane z monitoringu przesyłane są na serwer, z którego pobierane są przez aplikację webową w celach wizualizacji oraz prowadzenia dalszych analiz (system geoinformacyjny).

Wiarygodność analiz dotyczących badanych obiektów inżynierskich zależy od jakości projektu systemu monitoringu. Aby taki system odpowiednio opracować, należy zidentyfikować potencjalne zagrożenia, dobrać stosowną technologię pomiarową oraz przyjęć model opracowania wyników pomiarów. Całość powinna zostać poprzedzona pracami studialnymi angażującymi specjalistów wielu dziedzin – budownictwa, geotechniki, geodezji czy meteorologii. Optymalnym rozwiązaniem będzie więc zbudowanie modelu systemu eksperckiego dedykowanego konkretnemu obiektowi. Jest to możliwe dzięki integracji danych z różnych źródeł, jak również połączeniu cech monitoringu fizycznego z geodezyjnym. Schematyczne ujęcie budowy takiego systemu eksperckiego przedstawiono na rys. 3.

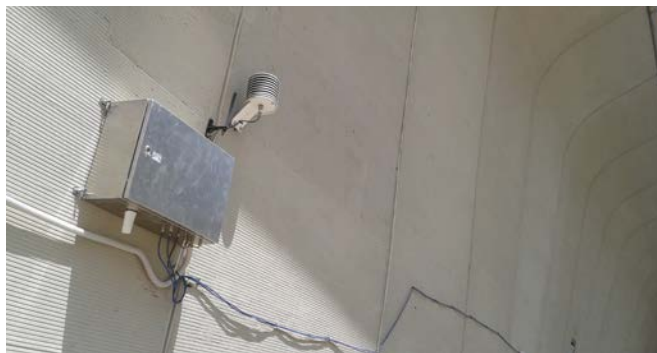
Dotychczas stosowane systemy wykorzystujące technologię pomiaru geodezyjnego pozwalają na prowadzenie obserwacji w uprzednio zdefiniowanych interwałach, a o ich cechach „monitorujących” decyduje zautomatyzowanie procesu pozyskiwania danych przestrzennych. Dane te – podobnie jak w przypadku monitoringu fizycznego – przesyłane są do odpowiednich baz na serwerach, by następnie

Rodzaj pomiaru	Rodzaj czujnika	Zastosowanie (monitoring stanu konstrukcji)
Pochylenie pylonów	Dwa jednoosiowe pochylomierze	Pomiary stanu równowagi wież pylonów, pomiary przemieszczeń poziomych wież pylonów
Przemieszczenia i zmiany położenia krawędzi mostu	Dwa jednoosiowe czujniki przemieszczeń	Badanie rozszerzalności termicznej konstrukcji mostu
Pomiar szczelin i pęknięć	Szczelinomierz	Monitoring wielkości szczelin
Ugięcia i przemieszczenia kierunkowe środkowego przęsła	Dwa czujniki osiadań na środkowym przęsle z punktem odniesienia na styku kolejnych przęseł	Monitoring przemieszczeń nawierzchni mostu i przerwania ciągłości
Naprężenia w linach	Monitoring naprężeń lin	Monitoring ewentualnego przerwania lin

Tab. 1. Zestaw czujników do monitoringu fizycznego konstrukcji mostu Wadi Leban. Opracowanie na podstawie [8]



Widok główny serwisu geoinformacyjnego firmy Cementys prezentującego deformacje konstrukcji mostu Wadi Leban w Rijadzie



Widok linii światłowodowej wraz z przetwornikiem Cementys (z lewej) oraz jej praktyczna instalacja na obiekcie (z prawej)

posłużyć jako materiał wyjściowy w aplikacjach analitycznych. Problemem może być jednak prawidłowe zdefiniowanie wspomnianych cykli pomiarowych. Jak wskazuje praktyka, ustalenia takie dokonywane są często intuicyjnie, bazując na doświadczeniach specjalisty obsługującego system. Brak odpowiedniej standaryzacji takiej procedury może powodować z jednej strony „produkowanie” wielu danych nadliczbowych, z drugiej zaś – może prowadzić do niedostatecznej realizacji pomiaru w miejscach niewralgicznych. Połączenie zalet światłowodów, pozwalających na natychmiastowe zidentyfikowanie miejsc zagrożonych, z metodami automatycznego pomiaru geodezyjnego pozwoli na podjęcie reakcji w postaci zintensyfikowania prowadzenia obserwacji rejonów obiektu, które tego wymagają. Dodatkowo wykorzystanie systemów sztucznej inteligencji w systemach analitycznych da możliwość „nauczenia” takiego zintegrowanego systemu, jak w sposób optymalny „dopasować się” do obiektu. Prowadzone w tym zakresie badania naukowe, jak również współpraca świata nauki z gospodarką dają powody do zadowolenia. Efektem jest intensywna współpraca branż budowlanej z geodezyją, znajdująca swoje odzwierciedlenie w zdobywaniu doświadczeń oraz – w perspektywie – w opracowaniu spójnych przepisów oraz wytycznych służących lepszemu zarządzaniu ryzykiem realizowanych obiektów inżynierskich. □



Widok konstrukcji mostu Wadi Leban w Rijadzie, na którym wdrożono system geomonitoringu

Podziękowanie
 Autor dziękuje firmie Cementys za udostępnienie materiałów oraz opisów technologii monitoringu światłowodowego mostów dla celów niniejszego artykułu.