

## SYSTEMY MONITOROWANIA KONSTRUKCJI W INŻYNIERII LĄDOWEJ – WCZORAJ, DZISIAJ I JUTRO

## STRUCTURAL HEALTH MONITORING SYSTEMS IN CIVIL ENGINEERING – YESTERDAY, TODAY AND TOMORROW

**Tomasz Howiacki**

Politechnika Krakowska  
Wydział Inżynierii Lądowej  
Instytut Materiałów i Konstrukcji Budowlanych  
ul. Warszawska 24  
31-155 Kraków  
e-mail: howiacki.tomasz@gmail.com

**Abstract:** Structural health monitoring systems (SHM) are used to gain information about the work of the structure under real operating conditions, i.e. taking into account the material heterogeneity, geometrical imperfections, cooperation with the subsoil, boundary conditions, real load schemes etc. Design and development of SHM systems requires interdisciplinary cooperation and often individual approach. Today, to build long-term systems we use, among others, vibrating wire gages, whose design allows for measuring various physical quantities, for example strains, linear and angular displacements, stress or pressure. Such sensors perform spot measurements. However, it seems that the future of structural health monitoring systems is closely related to the application of optic fiber technology, which allows for the measurement of various physical quantities continuously along the optical fiber length. The article presents examples of SHM systems recently implemented in Poland and the outline of laboratory tests associated with application of the latest technology.

**Keywords:** structural health monitoring systems, vibrating wire gages, optical fibers.

### Wprowadzenie

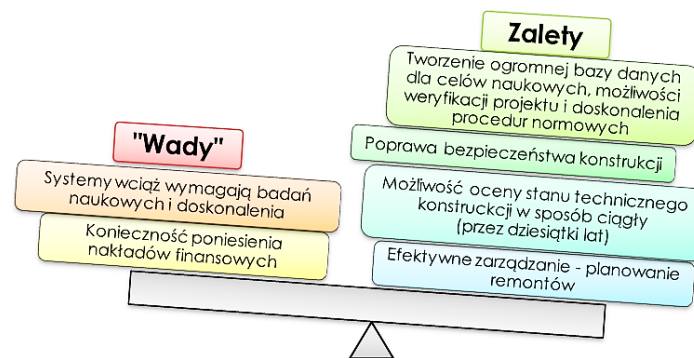
Bezpieczeństwo stanowiło od zawsze podstawowe kryterium projektowania, realizacji i eksploatacji obiektów budowlanych. Początkowo obiekty wznoszone były dzięki doświadczeniu przekazywanemu z pokolenia na pokolenie. Brak specjalistycznej wiedzy, znajomości teoretycznych podstaw oraz umiejętności tworzenia zaawansowanych modeli, kompensowany był zazwyczaj poprzez tworzenie elementów konstrukcyjnych, które dzisiaj nazwalibyśmy przewymiarowanymi. Jednak dopiero rozwój narzędzi matematycznych, a także nauk technicznych obejmujących zagadnienia wytrzymałości materiałów, mechaniki teoretycznej, mechaniki i dynamiki budowli, geotechniki, teorii konstrukcji, ale również statystyki i wielu innych, umożliwił wprowadzenie nowego podejścia do „projektowania”. Wtedy pojawiły się pytania o bezpieczeństwo - inżynierowie zdali sobie sprawę z występowania wielu czynników mających ostateczny wpływ na zachowanie się obiektu. Zwrócono uwagę na niejednorodność materiałów i rozrzut ich właściwości, losowość oddziaływań, niedokładności montażu, błędy ludzkie czy konieczność przyjęcia założeń upraszczających ze względu na trudności w jednoznacznym odwzorowaniu pracy konstrukcji za pomocą jej modelu. Rozpoczęto zatem

rozważania na temat odniesienia wyników analiz teoretycznych do rzeczywistego zachowania się konstrukcji, w myśl słów profesora Wasiutyńskiego: „Łatwiej i lepiej poznać się zjawiska drogą doświadczalną, niż drogą wgłębiania się w schematy teoretyczne, które przecież nigdy nie są w stanie dokładnie zjawisk odzwierciedlać”.

Słowa te bardzo dobrze wpisują się w ideę systemów monitorowania (ang. *Structural Health Monitoring* - SHM), które miały swój początek w przemyśle kosmicznym i lotniczym. Ze względu na budowę maszyn na niespotykaną dotąd skalę, dużą odpowiedzialność, ale także brak wcześniejszych doświadczeń, uzyskanie rzetelnych informacji było niezwykle pożądane. Pozwalały one między innymi na ocenę odpowiedzi układu na przykładane doń oddziaływania w warunkach testowych lub eksploatacyjnych, a co za tym idzie na określenie rzeczywistych zapasów bezpieczeństwa. Dzięki temu możliwe było optymalizowanie poszczególnych elementów, przy zachowanym akceptowalnym ryzyku awarii. Obecnie przyjmowane ryzyko w inżynierii lotniczej jest znacznie wyższe w porównaniu do ryzyka przyjmowanego w przypadku wznoszenia obiektów budowlanych [2]. Fakt ten pozwala sądzić, że rozpowszechnienie systemów monitorowania w zagadnieniach inżynierii lądowej pozwoli na lepsze rozeznanie

występujących zjawisk, bezpieczniejsze projektowanie, a także uzyskanie korzyści ekonomicznych. Należy jednak zwrócić uwagę, że monitorowanie pracy konstrukcji inżynierskich może być znacznie trudniejsze od analizy szczegółowo zdefiniowanych układów mechanicznych [1], ze względu na imperfekcje i niejednorodności materiałów, imperfekcje geometryczne, tolerancje wykonania, współpracę z niejednorodnym podłożem, którego parametry są niemożliwe do jednoznacznego określenia, losowość i niejednorodność schematów obciążeń, wpływ zmęczenia i zjawisk reologicznych oraz wiele innych czynników. Monitorowanie, rozumiane w ogólności jako pozyskiwanie informacji na

temat pracy konstrukcji w rzeczywistych warunkach eksploatacji za pomocą odpowiednich urządzeń technicznych (czujniki, okablowanie, rejestratory, serwery, oprogramowanie, inne), jest zatem uzasadnione z punktu widzenia rozwoju nauki, ale przede wszystkim bezpieczeństwa pracy obiektu w całym okresie jego eksploatacji [3]. Należy podkreślić, że ze względu na stosunkowo niedużą liczbę zrealizowanych projektów oraz brak jednoznacznych norm i wytycznych, projektowanie i wykonywanie systemów monitorowania, a także interpretowanie uzyskanych wyników pomiarów, wymaga odpowiedniego zaplecza technicznego, wiedzy merytorycznej oraz interdyscyplinarnej współpracy (rys. 1).



Rys. 1. Wady i zalety systemów monitorowania konstrukcji.

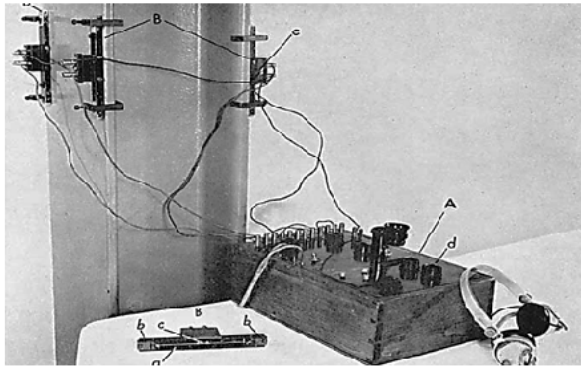
### Czujniki strunowe – rys historyczny

Współcześni inżynierowie dysponują bardzo dokładnymi urządzeniami pomiarowymi, wykorzystującymi w swojej pracy różne prawa fizyczne, np. czujniki mechaniczne, indukcyjne, elektrooporowe, piezoelektryczne, hydrauliczne, mikro-, a nawet nano-elektromechaniczne i wiele innych. Warto jednak wyróżnić strunową technikę pomiarową, która ze względu na wiele zalet [4], znalazła powszechne zastosowanie w budowie długoterminowych systemów monitorowania konstrukcji w Polsce i na świecie. Czujniki strunowe charakteryzują się wysoką dokładnością pomiarów, odpornością na warunki środowiskowe, takie jak temperatura czy wilgotność, możliwością transmisji danych za pomocą sygnału częstotliwościowego na duże odległości bez obawy o zakłócenia czy utratę informacji, a także, co bardzo istotne, potwierdzoną, długoterminową stabilnością. Badania przeprowadzone w Norweskim Instytucie Geotechniki wykazały, że odpowiedź przetwornika strunowego nie zmieniła się więcej niż o 0,1% zakresu pomiarowego w przeciągu blisko trzydziestu lat. Taki wpływ czasu na pracę czujnika z inżynierskiego punktu widzenia może zostać pominięty.

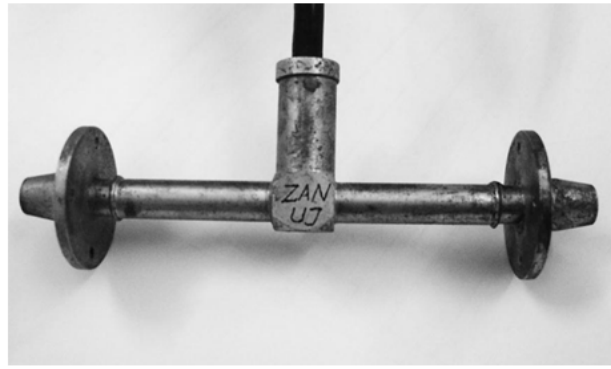
Początkowa koncepcja czujników „z drgającą struną” sięga roku 1888, pierwsze testy wykonano w roku 1928, jednak komercyjny rozwój tej technologii nastąpił początkiem lat 30-tych XX wieku, kiedy to w 1931 r. francuski inżynier André Coyne otrzymał patent na czujnik strunowy, nazwany wtedy przetwornikiem

akustycznym. Szybko wykorzystał swoje urządzenie do monitorowania tam, którym poświęcił w swojej inżynierskiej karierze szczególnie dużo uwagi. Wynalazek Coyne’a niedługo potem znalazł szerokie zastosowanie na skalę światową. Dwie pierwsze fabryki takich czujników powstały w Niemczech (Maihak 1936 r.) oraz we Francji (Telemac 1947 r.). Zasada działania wszystkich czujników strunowych opiera się na prostej zależności: zmiana długości struny (stanowiącej główny element czujnika) rozpiętej między dwoma punktami analizowanego elementu, powoduje zmianę częstotliwości drgań własnych tej struny. Początkowo owo zjawisko analizowane było akustycznie: osoba realizująca pomiar porównywała dźwięk przetwornika zamocowanego do konstrukcji z dźwiękiem odpowiedniego wzornika strojonego przy pomocy śruby mikrometrycznej (rys. 2a). Obecnie do celu wzbudzenia struny oraz odczytu częstotliwości wykorzystuje się cewkę elektromagnetyczną, umieszczoną w środku rozpiętości struny (rys. 2b).

Warto pamiętać, że Polska również ma dobre tradycje związane z rozwojem technologii czujników strunowych. Badaniami naukowymi oraz wdrażaniem do praktycznych zastosowań zajmował się przede wszystkim Zakład Aparatury Naukowej Uniwersytetu Jagiellońskiego w Krakowie oraz Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów w Warszawie. Obecnie prace nad rozwojem czujników strunowych prowadzone są m.in. w Instytucie Mechaniki Górotworu PAN w Krakowie.



a)



b)

Rys. 2. a) - przetwornik akustyczny firmy Maihak [5]; b) - czujnik strunowy produkowany w Zakładzie Aparatury Naukowej Uniwersytetu Jagiellońskiego w Krakowie [3].

W dalszej części artykułu omówiono, na konkretnych przykładach realizacji w Polsce, podstawowe zagadnienia podejmowane w ramach systemów monitorowania konstrukcji inżynierskich. W większości przypadków do budowy prezentowanych systemów wykorzystano czujniki strunowe, które umożliwiają pozyskiwanie informacji na temat zmian wybranych wielkości fizycznych, istotnych z punktu widzenia pracy konstrukcji, w sposób zdalny, automatyczny i ciągły, tj. z częstotliwością rzędu kilku minut. Należy podkreślić, że wszystkie czujniki strunowe są obecnie wyposażane w integralnie wbudowany termistor, dzięki czemu możliwe jest wprowadzanie odpowiednich korekcyjnych terminów do uzyskanych wyników pomiarów oraz globalna ocena konstrukcji poddanej oddziaływaniu temperatury.

## Współczesne systemy monitorowania

### *Monitorowanie geotechniczne*

Rozwój systemów monitorowania w inżynierii lądowej związany był początkowo przede wszystkim z geotechniką. Jednoznaczne określenie parametrów niejednorodnego podłoża do celów projektowych jest praktycznie niemożliwe ze względu na zmienność ich wartości w zależności od miejsca pobrania próbki, wilgotności, temperatury i innych czynników. W zagadnieniach geotechnicznych najczęściej realizowane są pomiary takich wielkości jak wilgotność gruntu, temperatura, ciśnienie wody w porach gruntowych, naprężenia, przemieszczenia, czy też odkształcenia np. zbrojenia geosyntetycznego. Odpowiednie skonstruowanie systemu umożliwia między innymi ocenę postępu konsolidacji nasypów, pracy zapór i tam przeciwpowodziowych, analizę deformacji podłoża pod korpusem dróg i autostrad, zmian grubości wyszczególnionych warstw gruntowych, współpracy fundamentów z podłożem czy też dystrybucji siły przekazywanej na pal wzdłuż jego długości.

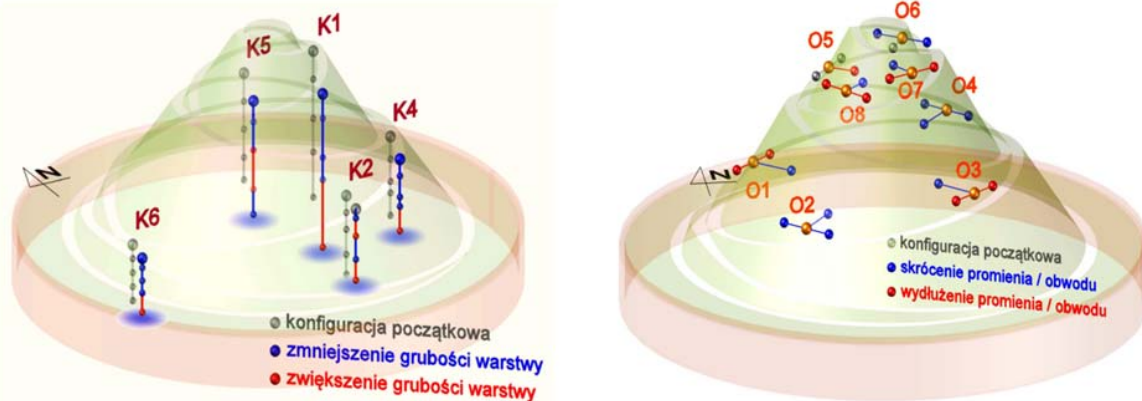
Jednym z najbardziej nietypowych i zaawansowanych systemów geotechnicznych w Polsce został objęty Kopiec Kościuszki w Krakowie. Celem systemu jest m.in.

rozpoznanie mechanizmów pracy warstw gruntowych związanych z postępującą degradacją bryły Pomnika. Strukturę systemu można podzielić na dwie zasadnicze części: monitoring konstrukcji oraz monitoring meteorologiczny. Pierwsza część związana jest bezpośrednio z obserwacją deformacji stożka, zarówno w kierunku pionowym, jak i w płaszczyznach poziomych (radialnie i obwodowo). Zainstalowanie czujników w różnych punktach (na rzucie obiektu) i na różnych głębokościach umożliwiło przestrzenną analizę zmian geometrii bryły. Mierzone są także wielkości fizyczne, które mają bezpośredni wpływ na zachodzące deformacje, tj. temperatura i wilgotność gruntu w przypowierzchniowych warstwach oraz ciśnienie wody w porach gruntowych na większych głębokościach. Na rys. 3 zaprezentowano schemat lokalizacji ekstensometrów pionowych i poziomych w obrębie Kopca Kościuszki wraz z jakościową wizualizacją przemieszczeń i odkształceń w wybranym okresie.

Badania przemieszczeń pionowych klasycznie wykonywane są geodezyjnie. Tego typu pomiary dają nam jedynie informację o globalnym przemieszczeniu danego punktu pomiarowego. Zainstalowane w obrębie bryły Pomnika pionowe ekstensometry ciągnowe realizują pomiar zmian długości czterech odcinków (usytuowanych w jednym pionie) względem wspólnej bazy. Najdłuższy odcinek prowadzony jest praktycznie od stropu skały do powierzchni Kopca, a pozostałe uzyskano dzieląc długość otworu pomiarowego na cztery równe części (każdy czujnik zakotwiony jest między punktem wewnątrz bryły Kopca oraz wspólną bazą). Wykonano pięć punktów pomiarowych. Zastosowano przetworniki strunowe o zakresie pomiarowym 200 i 500 mm, połączone z linkami pomiarowymi ze stali nierdzewnej. Takie podejście umożliwia wyznaczenie zmian grubości warstw gruntowych wewnątrz bryły (odległości pomiędzy poszczególnymi zakotwieniami linek). Procedura polega na odejmowaniu wartości przemieszczeń mierzonych przez kolejne czujniki zainstalowane w jednym pionie. Przykładowo: grubość warstwy trzeciej równa jest zmianie długości odcinka trzeciego pomniejszonego o zmianę długości odcinka drugiego. Zmiany grubości

warstwy pierwszej (wierzchniej) równe są bezpośrednio zmianom długości zmierzonych przez czujnik usytuowany najbliżej powierzchni.

Monitoring konstrukcji Kopca w 2014 roku został uzupełniony o stację meteorologiczną. Dzięki temu istnieje możliwość korelacji wszystkich danych pomia-



Rys. 3. Lokalizacja punktów pomiarowych systemu monitorowania Kopca Kościuszki w Krakowie wraz z jakościową wizualizacją przemieszczeń i odkształceń w okresie 26.06.2013 - 10.09.2014.

### Monitorowanie obiektów wielkopowierzchniowych

Większość obiektów wielkopowierzchniowych na terenie Polski została wybudowana w ostatnich latach. Z wielu względów bardzo korzystnie jest wyposażać tego rodzaju obiekty w automatyczne urządzenia do kontroli stanu technicznego poprzez pomiary wybranych wielkości fizycznych. Najczęściej są to odkształcenia elementów konstrukcyjnych zadaszania, przemieszczenia pionowe (ugięcia), przemieszczenia kątowe (przechyły) oraz temperatury. Pomiary realizowane bezobsługowo i z częstotliwością nawet kilku minut umożliwiają kompleksową ocenę zachowania się konstrukcji w czasie pod wpływem przykładanych do niej oddziaływań. Przygotowywane indywidualnie procedury obliczeniowe i alarmowe umożliwiają czytelną prezentację danych w czasie rzeczywistym, a także natychmiastowe informowanie osób odpowiedzialnych za zarządzanie obiektem o pojawieniu się ewentualnych nieprawidłowości. Konieczność instalowania systemów monitorowania na obiektach wielkopowierzchniowych wynika przynajmniej z kilku czynników: ograniczeń związanych z okresowymi przeglądami technicznymi, dominującego obciążenia śniegiem czy też spełnienia wymogów prawa budowlanego. Wykorzystanie systemów SHM może wspomagać Zarządcę w podejmowaniu decyzji o rozpoczęciu odśnieżania dachu, poprzez automatyczne informowanie o przekroczeniu wartości dopuszczalnych (np. ugięć, odkształceń). Przygotowane schematy postępowania w takich przypadkach pozwalają na sprawne podjęcie działań mających na celu usunięcie przyczyny powstania stanu zagrożenia.

Najlepiej, kiedy uzyskiwane wartości wielkości fizycznych związanych z pracą konstrukcji korelowane są z pomiarami warunków środowiskowych, takich jak opady śniegu, oddziaływanie wiatru czy też obciążenia ter-

rowych z warunkami atmosferycznymi, jakie panują w danym momencie na wzgórzu bł. Bronisławy w Krakowie. Gromadzone są informacje związane z ilością opadów, nasłonecznieniem, siłą i kierunkiem wiatru, a także temperaturą i wilgotnością względną powietrza.

miczne. W takiej sytuacji istnieje możliwość przeprowadzenia kompleksowej analizy wpływu tych czynników na zachowanie się monitorowanej konstrukcji oraz skorygowanie modelu numerycznego, który często stanowi teoretyczne uzupełnienie informacji uzyskiwanych in situ.

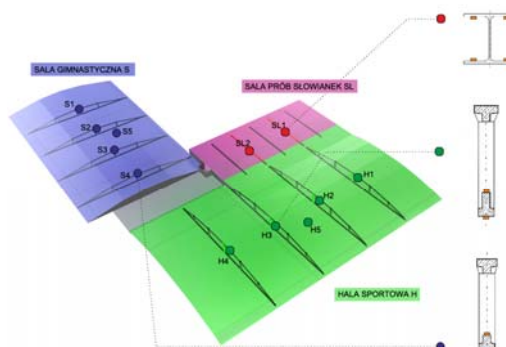
Dobrym przykładem monitorowania obiektów wielkopowierzchniowych może być zespół hal sportowych w Krakowie (rys. 4), gdzie analizie poddano sprężone, kablobetonowe dźwigary typu KBO, eksploatowane przez kilkadziesiąt lat.

Podstawowym celem jest szacowanie zmian wyężenia dźwigarów, które generowane są przede wszystkim przez obciążenie śniegiem. Przyczyną może być także korozyjne zerwanie cięgna sprężającego, załamanie się płyt dachowych czy też odkształcenia powstałe na skutek oddziaływania temperatury. To właśnie temperatura, a w szczególności różnica temperatur między dźwigarami, a płytami dachowymi, będzie miała istotny wpływ na sposób zachowania się dźwigarów [6]. W przypadku tradycyjnego, okresowego pomiaru przemieszczeń należy zatem zwrócić szczególną uwagę na warunki termiczne wykonywania pomiarów, które powinny być możliwie do siebie zbliżone. Prawidłowa ocena pracy dźwigarów w takim przypadku staje się niezwykle trudnym zadaniem. Przewaga automatycznych systemów monitorowania polega w znacznym stopniu na realizowaniu pomiarów odkształceń i temperatur w sposób, z inżynierskiego punktu widzenia, ciągle (w tym przypadku co 15 min). Procedura obliczeniowa uwzględnia ponadto wyznaczanie zmian wartości sił przekrojowych (sił podłużnych i momentów zginających) oraz procentowych wskaźników odpowiadających szacowanemu wyężeniu poszczególnych dźwigarów. Bieżące wartości wskaźników są podstawą do podjęcia lub zaniechania działań. Na analizowanym obiekcie zainsta-

lowano łącznie 28 strunowych czujników odkształceń zintegrowanych z czujnikami temperatury oraz dodatkowo 20 termistorów, realizujących pomiar temperatury



wewnątrz dźwigarów. Czujniki zostały połączone z elementami konstrukcji w sposób zapewniający trwałość połączenia w czasie wieloletniej eksploatacji.



Rys. 4. Widok monitorowanych dźwigarów przekrycia dachowego hali sportowej w Krakowie oraz schemat rozmieszczenia punktów pomiarowych.

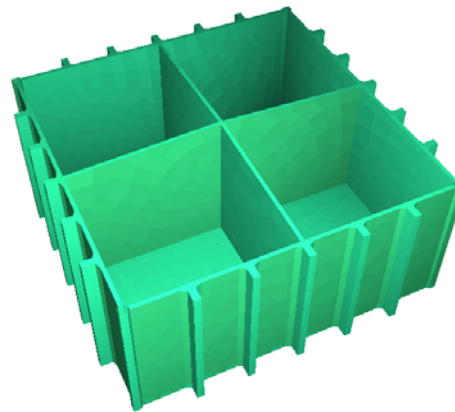
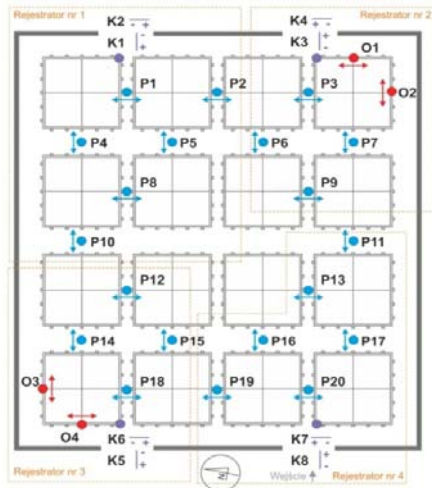
### Monitorowanie bryłowe

Podejście bryłowe do monitorowania konstrukcji inżynierskich wiąże się z przyjęciem założenia, że z całego obiektu wyodrębnić można części, które uznawane są za bryły sztywne (o ile ma to odzwierciedlenie w rzeczywistej pracy konstrukcji). Założenie takie pozwala na ograniczenie liczby wykorzystanych czujników, a zatem przynosi wymierne korzyści ekonomiczne przy zachowaniu użyteczności uzyskiwanych informacji. Zadaniem systemu jest dokonywanie pomiaru względnych przemieszczeń i obrotów wyodrębnionych brył. W przypadku jednoprzęsłowego wiaduktu byłyby to trzy bryły: pomost i dwa przyczółki.

Systemy monitorowania bryłowego są szczególnie zalecane w przypadku obiektów znajdujących się na obszarze działalności górniczej [7]. Odpowiedź konstrukcji na eksploatację górniczą, często w postaci znacznych przechyłów i/lub przemieszczeń, nie jest możliwa do wyznaczenia w sposób dokładny na drodze analizy teoretycznej, wykorzystującej nawet najbardziej zaawansowane modele numeryczne. Najlepszym sposobem zweryfikowania pracy konstrukcji pozostaje wykonanie badań w skali naturalnej. Dzięki SHM możliwe jest zwiększenie jakości i dokładności uzyskiwanych informacji o zmianach w pracy konstrukcji oraz prowadzenie analizy ciągłej w czasie, przy jednoczesnej minimalizacji nakładów na pozyskiwanie i interpretację danych. Przekłada się to w sposób istotny na wzrost bezpieczeństwa monitorowanej konstrukcji. Odnosząc wyniki zrealizowanych pomiarów wybranych wielkości fizycznych do harmonogramu prac górniczych, istnieje możliwość określenia dokładnego wpływu tych prac na zachowanie się konstrukcji i powstanie potencjalnych uszkodzeń. Jako przykład scharakteryzowano system monitorowania zespołu zbiorników zlokalizowanych w Rudzie Śląskiej (rys. 5).

Przedmiotowy kompleks składa się z 16 zbiorników wody pitnej (w tym 12 czynnych) oraz obiektów

towarzyszących wybudowanych w latach 70-tych XX-tego wieku. Wymiary prostokątnego rzutu poziomego kompleksu wynoszą 110 x 97 m. Każdy ze zbiorników zaprojektowano jako niezależną konstrukcyjnie skrzynię o podstawie kwadratu o boku 21 m, podzieloną ścianami wewnętrznymi na cztery komory o boku długości 10 m. Wysokość od dna do stropu wynosi od 8,9 do 9,4 m. Konstrukcję nośną komór stanowi układ pionowych, zamkniętych ram poprzecznych i podłużnych połączonych z układem ścian wewnętrznych i zewnętrznych. Dno, ściany oraz przekrycie zbiorników wykonano jako żelbetowe, monolityczne. Obciążenia ze zbiorników przekazywane są na grunt za pośrednictwem żelbetowego rusztu o wysokości belek równej 1,5 m. System monitorowania zbiorników wody pitnej ma za zadanie rejestrację odpowiedzi konstrukcji na postępującą eksploatację górniczą poprzez ciągły, elektroniczny pomiar zmian względnych przemieszczeń poziomych zbiorników, przechyłów ścian zbiorników narożnych oraz odkształceń górnego wieńca po stronie zewnętrznej zbiorników narożnych. Lokalizację punktów pomiarowych na rzucie z góry oraz wizualizację modelu numerycznego pojedynczego zbiornika przedstawiono na rys. 5. Z uwagi na duże odległości między ścianami zbiorników, punkty zakotwienia w konstrukcji połączono linką wykonaną ze stali nierdzewnej. Na jednym jej końcu znajduje się osprzęt pomiarowy z czujnikiem, na drugim gwintowany pręt służący do wprowadzenia naciągu w linie. Założono, że temperatura wzdłuż długości linki jest stała i równa temperaturze zmierzonej przez czujnik. Obliczając zmianę odległości pomiędzy ścianami, ze względu na konstrukcję zastosowanych zespołów pomiarowych (zmiany długości linek pod wpływem temperatury), wprowadzono odpowiednią korekcję termiczną. W analizie każdy z szesnastu zbiorników potraktowano jako bryłę sztywną, wyznaczając względne przemieszczenia pomiędzy nimi.



Rys. 5. Lokalizacja punktów pomiarowych w ramach systemu monitorowania zespołu zbiorników w Rudzie Śląskiej oraz model numeryczny pojedynczego zbiornika wykonany w programie SOFiSTiK.

Ze względu na przyjęcie do analizy podejścia bryłowego, które w tym przypadku było uzasadnione ze względu na geometrię badanego obiektu, możliwe było zminimalizowanie kosztów wdrożenia poprzez dobór optymalnej liczby czujników. System pomiarowy od momentu instalacji do zakończenia okresu realizowania pomiarów działał bezobsługowo, umożliwiając użytkownikowi centralne zarządzanie danymi poprzez internetową platformę pomiarową, na której dane były przeliczane, analizowane i wizualizowane.

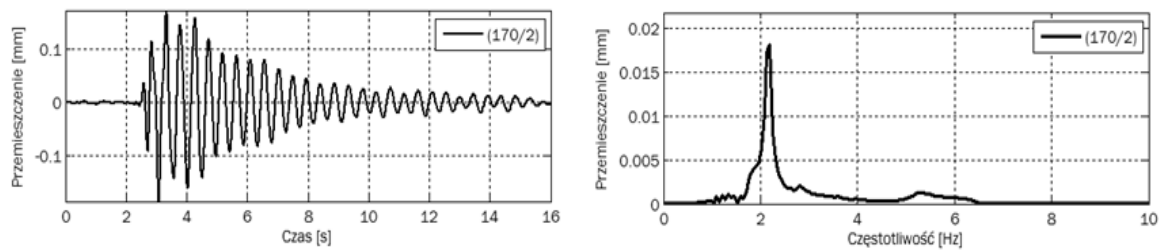
#### **Monitorowanie dynamiczne**

Ocena oddziaływań dynamicznych na konstrukcję i ludzi w budynkach jest zazwyczaj trudnym zadaniem, wymagającym zaawansowanego zaplecza technicznego, a przede wszystkim doświadczenia i podstaw merytorycznych. Do najczęściej występujących przyczyn generowania, niepożądanych z punktu widzenia pracy konstrukcji, przyspieszeń drgań, należy zaliczyć oddziaływania komunikacyjne (przejazdy autobusów, tramwajów, metra), silne podmuchy wiatru, eksploatacja maszyn przemysłowych, prowadzenie prac budowlanych czy też, w określonych rejonach świata, trzęsienia ziemi. W niektórych przypadkach bardzo istotne jest przeprowadzenie analizy modalnej konstrukcji, obejmującej m.in. wyznaczenie częstotliwości drgań własnych obiektu, odpowiadających im postaci drgań, a także wartości tłumienia. Współcześnie w dynamice budowli wykorzystuje się podejście integrujące zalety modelu teoretycznego, najczęściej tworzonego przy użyciu zaawansowanych programów opartych o metodę elementów skończonych, oraz badań wykonywanych in situ. Uzyskane przebiegi czasowe drgań, w warunkach eksperymentalnych lub operacyjnych, mogą być podstawą do kalibracji modelu, weryfikacji poprawności wykonanych obliczeń i przyjętych na etapie projektowania założeń upraszczających. Znajomość charakterystyk dynamicznych konstrukcji jest istotna przy określaniu szeroko rozumianych stanów granicznych, m.in. komfortu wibracyjnego, wzbudzenia rezonanso-

wego, odkształceń czy nośności. Wykorzystanie połączenia zalet teorii oraz praktyki w rozwiązywaniu zagadnień dynamiki budowli jest obecnie rozwiązaniem najlepszym [8].

Najczęściej rejestrowane są przebiegi czasowe drgań w wybranych punktach konstrukcji, na podstawie których identyfikuje się częstotliwości i postaci drgań własnych oraz wartości tłumienia. Takie podejście należy zakwalifikować jako zadanie diagnozy, w którym dany jest obiekt, rzeczywiste oddziaływania oraz przyjęte kryteria oceny, a efektem końcowym m.in. odpowiedź na pytanie, czy istnieje związek przyczynowo-skutkowy między stanem technicznym obiektu, a występującymi oddziaływaniami [9]. Wyniki modelu numerycznego stanowią w takim przypadku uzupełnienie informacji uzyskanych w warunkach in situ.

Pomiary eksperymentalne polegają na rejestrowaniu przebiegów czasowych przyspieszeń drgań wywołanych odpowiednio zaprojektowanym wzbudzeniem. Mają zatem charakter krótkotrwały. W przypadku analizy operacyjnej związanej z rzeczywistymi warunkami eksploatacyjnymi konieczne jest opracowanie bardziej zaawansowanych rozwiązań, dzięki którym możliwe będzie sprawne rejestrowanie i zarządzanie danymi dynamicznymi w dłuższym okresie. Należy podkreślić, że tego typu pomiary realizowane są z częstotliwością rzędu kilku tysięcy Hz, zatem tylko odpowiednie algorytmy, umożliwiające zapisywanie w pamięci komputera wyłącznie istotnych informacji, mogą zapewnić sprawną pracę systemu. Najczęściej w takich przypadkach wyzwalanie zapisu odbywa się w momencie przekroczenia zdefiniowanej wartości progowej przyspieszeń. Systemy monitorowania realizujące ideę pomiarów operacyjnych zrealizowano między innymi na żelbetowych zbiornikach na klinkier w Trzebini (rys. 6), zespole budynków mieszkalno-usługowych w centrum Krakowa, a także stadionach piłkarskich, mostach wiszących i podwieszanych czy też ciągnowych przekryciach hal.



Rys. 6. Przykładowy wykres przemieszczeń [mm] uzyskany na podstawie zarejestrowanego przebiegu przyspieszeń ( $m/s^2$ ) oraz przemieszczeniowe spektrum odpowiedzi (modalna analiza operacyjna żelbetowych zbiorników na klinkier w Trzebini).

### Inne przykłady

Współcześnie systemy monitorowania instalowane są na wielu odpowiedzialnych, nietypowych konstrukcjach inżynierskich. Należą do nich między innymi hale sportowe (np. Kraków Arena, Podium Gliwice), stadiony piłkarskie (np. Stadion Narodowy w Warszawie, Stadion w Gdańsku, Stadion Miejski w Poznaniu, Stadion we Wrocławiu, Stadion w Zabrzu), mosty (np. Most Rędziński, Most w Puławach, Most koło Kwidzyna i wiele innych), liczne wiadukty (np. Wiadukt w Chrzanowie, Rudzie Śląskiej, Pawłowicach i wiele innych), drogi i autostrady (np. autostrada A1 na odcinku Piekary Śląskie – Pyrzowice).

Ponadto, systemy SHM znajdują zastosowanie w monitorowaniu obiektów tunelowych, infrastruktury kolejowej i innych konstrukcji znajdujących się w pobliżu źródła drgań, elektrowniach, budynkach wysokich, nietypowych obiektach kubaturowych. Systemy SHM pełnią bardzo ważną rolę w obiektach geotechnicznych (zmiennosc parametrów i trudności w analizie teoretycznej) oraz hydrotechnicznych.

Warto zwrócić uwagę na monitorowanie, coraz częściej wznoszonych, konstrukcji sprężonych. Są to zazwyczaj obiekty odpowiedzialne, o dużych smukłościach (mosty, belki, stropy, zbiorniki itd.). Zastosowanie m.in. czujników naprężeń i odkształceń wewnątrz betonu pozwala na określenie nie tylko rozkładu odkształceń w przekroju po sprężeniu, ale także parametrów takich jak moduł sprężystości – bardzo istotny z punktu widzenia pracy konstrukcji betonowej czy sprężonej. Stosowane są także siłomierze między czołem elementu, a zakotwieniem, pomocne w oszacowaniu strat siły sprężającej i weryfikacji założeń projektowych.

### Monitorowanie przyszłości

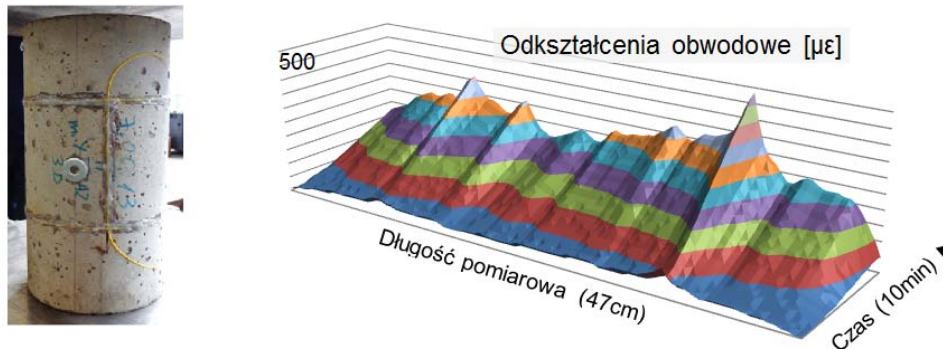
We wszystkich prezentowanych wcześniej systemach monitorowania pomiary realizowane są w sposób punktowy. Zupełnie nową jakością w niedalekiej przyszłości ma szansę wprowadzić światłowódowa technika pomiarowa, umożliwiająca realizowanie pomiarów wybranych wielkości fizycznych w sposób ciągły wzdłuż długości światłowodu. Takie podejście, przy zastosowaniu światłowodu o długości do 70 m i rozdzielczości przestrzennej sięgającej rzędu kilku milimetrów, pozwala zastąpić tysiące pojedynczych, tradycyjnych czujników

odkształceń [11]. Daje to niespotykane dotychczas możliwości analizy konstrukcji, między innymi pod kątem identyfikowania lokalizacji uszkodzeń. Nad rozwojem tej technologii trwają obecnie liczne badania na całym świecie. Również na Politechnice Krakowskiej, w Instytucie Materiałów i Konstrukcji Budowlanych, przeprowadzono pilotażowe badania z wykorzystaniem światłowodu oraz, dzięki uprzejmości firmy INTERLAB, reflektometru optycznego OBR4600 produkcji Luna Technologies. Badania wykonano we współpracy z firmą SHM System realizującą projekt badawczy pt. „Opracowanie nowego czujnika światłowodowego umożliwiającego wyznaczanie profili pionowych i poziomych przemieszczeń badanych obiektów na odcinkach o długości do 120 km.” Projekt ten wykonywany jest w ramach konkursu Narodowego Centrum Badań i Rozwoju z Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój 2014-2020.

Na maszynie wytrzymałościowej poddano ścisaniu normową, betonową próbkę walcową o wysokości 300 mm i średnicy podstawy 150 mm (rys. 7). Na wybranych odcinkach przymocowano światłowód poprzez przyklejenie. Wykonano łącznie 5 odcinków pomiarowych: trzy podłużne o długości ok. 130 mm, rozłożone symetrycznie po obwodzie co  $120^\circ$ , oraz dwa obwodowe (o długości równej ok.  $2\pi=470$  mm) w rozstawie równym długości odcinka podłużnego. Badanie miało na celu ocenę możliwości wykorzystania techniki światłowodowej do m.in. określania parametrów mechanicznych betonu takich jak wytrzymałość czy moduł sprężystości, obserwacji i analizy dystrybucji odkształceń podłużnych i poprzecznych, a także do identyfikowania lokalizacji potencjalnych miejsc uszkodzeń betonu (zarysowania). Ostatni punkt jest szczególnie istotny w kontekście wykorzystania światłowodu w zaawansowanych systemach monitorowania konstrukcji, ponieważ stwarza realne możliwości istotnej poprawy bezpieczeństwa obiektów inżynierskich. Analizę prowadzono w dwóch dziedzinach: czasu oraz odległości od początku światłowodu. W tradycyjnych pomiarach punktowych analiza upraszcza się wyłącznie do funkcji czasu. W przypadku odcinków podłużnych, na których występują naprężenia ścisające, uzyskane wykresy są znacznie bardziej gładkie (mniejsze różnice w lokalnych ekstremach odkształceń), niż w przypadku odcinków obwodowych, gdzie występują naprężenia

rozciągające i dochodzi do zarysowania próbki. Uzyskane z pomiarów dane odpowiadają zatem w pełni przewidywaniom i są bardzo obiecujące w kontekście

praktycznego zastosowania światłowodów w monitorowaniu konstrukcji.



Rys. 7. Widok próbki oraz przykładowy wykres odkształceń obwodowych w dziedzinie czasu i długości.

### Posumowanie

Współczesne programy komputerowe pozwalają na bardzo precyzyjną analizę pracy praktycznie każdego obiektu, niezależnie od stopnia jego skomplikowania. Trzeba sobie jednak zdawać sprawę, że nie są one w stanie w sposób kompletny odzwierciedlić rzeczywistości. Każdy model, niezależnie od jego złożoności, jest tylko lepszą lub gorszą próbą idealizacji pracy konstrukcji, a na wyniki uzyskane na jego podstawie ma wpływ bardzo wiele czynników. Projektowanie konstrukcji polega zawsze na konieczności przyjęcia bardzo dużej liczby założeń i uproszczeń, a dokładne określenie popełnianych w ten sposób błędów jest często

nierozwiązywalne. Najlepszą odpowiedzią na pytania związane z pracą rzeczywistej konstrukcji w kontekście występujących oddziaływań i zagrożeń, pozostaje zbadanie jej w rzeczywistych warunkach eksploatacji.

Wciąż trwają poszukiwania nowych rozwiązań, które umożliwią w przyszłości pozyskiwanie pełniejszych informacji na temat pracy konstrukcji. Dzięki temu możliwe będzie bardziej efektywne realizowanie podstawowych celów i wymogów stawianych współcześnie systemom SHM. Ze względu na potwierdzone w wielu badaniach [12, 13, 14] zalety i możliwości światłowodowej techniki pomiarowej, ma ona duże szanse na powszechne zastosowanie w zagadnieniach inżynierii lądowej.

### Literatura

1. Furtner, P., Wenzel, H., Structural Health Monitoring at the Civil Infrastructure: Recent progress & Future Demands. 4th International Conference on SHM of Intelligent Structure, Zurich 2009.
2. Xu, Y.L., Xia Y., Structural Health Monitoring of Long-Span Suspension Bridges, Spon Press. London and New York, 2012.
3. Bednarski, Ł., Sieńko, R., Howiacki, T., Wybrane zagadnienia monitorowania konstrukcji. XXX Jubileuszowe Ogólnopolskie Warsztaty Pracy Projektanta Konstrukcji. Szczyrk, 2015.
4. Bednarski, Ł., Sieńko, R., Pomiary odkształceń konstrukcji czujnikami strunowymi, *Inżynieria i Budownictwo*, 2013, 11, s. 615-619.
5. Baker, J.F., Choice of a Strain Gauge, *Geotechnical Instrumentation News*, 2007, December, pp. 4-7.
6. Sieńko, R., Konstrukcje kablobetonowe. XXV Ogólnopolskie Warsztaty Pracy Projektanta Konstrukcji. Szczyrk, 10-13 marca, 2010.
7. Kadela, M., Bednarski, Ł. 2014. Wytyczne obserwacji ciągłej obiektów zlokalizowanych na terenach górniczych, *Przegląd Górniczy*, 2014, 8, s. 78-84.
8. Wójcicki, Z., Grosel, J., Sawicki, W., Eksperymentalne badania dynamiczne budowli. Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław, 2014.
9. Kawecki, J., Stypuła, K., Zapewnienie komfortu wibracyjnego ludziom w budynkach narażonych na oddziaływania komunikacyjne, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków, 2013.
10. Skłodowski, M., Współczesny monitoring obiektów budowlanych, *Przegląd Budowlany*, 2009, 3, s. 37-46.
11. Samiec, D., Distributed fibre-optic temperature and strain measurement with extremely high spatial resolution, *Photonic International*, 2012, pp. 10-13.



12. Delepine-Lesoille, S., Merliot, E., Boulay, C., Quetel, L., Delaveau, M., Courteville, A., Quasi-distributed optical fibre extensometers for continuous embedding into concrete: design and realization, *Smart Materials and Structures*, 2006, 15, pp. 931–938.
13. Zhou, Z., Wang, B., Ou, J., Local Damage Detection of RC Structures With Distributive FRP-OFBG Sensors. Second International Workshop on Structural Health Monitoring of Innovative Civil Engineering Structures. Winnipeg, Canada, 2004.
14. López-Higuera, J., Cobo, L., Incera, A., Cobo, A., 2011. Fiber Optic Sensors in Structural Health Monitoring, *Journal of Lightwave Technology*, 2011, Vol. 29, no. 4, pp. 587–608.