XXVI Konferencja Naukowo-Techniczna awarie budowlane 2013

KRZYSZTOF WILDE, *krzysztof.wilde@pg.gda.pl*
Katedra Mechaniki Budowli i Mostów, Politechnika Gdańska

SYSTEMY MONITORINGU KONSTRUKCJI OBIEKTÓW BUDOWLANYCH

STRUCTURAL HEALTH MONITORNG SYSTEMS FOR CIVIL ENGINEERING STRUCTURES

Streszczenie W artykule przedstawiono podstawowe informacje dotyczące celów instalacji i funkcji systemów monitoringu konstrukcji (SMK). Wyróżnione zostały dwa typy systemów SMK: systemy zapewniające bezpieczeństwo i systemy wspierające utrzymanie obiektu budowlanego. Zaprezentowane zostały przykłady dla obu typów systemów SMK z omówieniem ich zalet i wątpliwych rozwiązań. Przedstawiony materiał pokazuje brak zasad, wytycznych projektowych i regulacji prawnych, które pozwoliłyby uniknąć błędów przy projektowaniu systemów SMK nowych obiektów budowanych w Polsce.

Abstract The paper presents basic information on Structural Health Monitoring systems with focus on their aims and functions. Two types of SHM systems are proposed: systems dedicated for object safety and systems for object maintenance. The paper presents examples of completed SHM systems of both types. Conclusions point out lack of rules and regulations which are necessary to reduce number of design mistakes of SHM systems of new objects currently constructed in Poland.

1. Wstęp

Dynamiczny rozwój elektronicznych systemów obserwacji praktycznie dowolnych procesów, na przykład: fizycznych, chemicznych, finansowych czy społecznych, spowodował rozwój technologii monitoringu. Śledzone są parametry opisujące warunki atmosferyczne, stany wód w rzekach, monitoruje się kluczowe parametry związane z międzynarodowymi przepływami finansowymi, jak również śledzi się abstrakcyjne zmienne, takie jak na przykład: stan zadowolenia obywatela w swoim kraju. Monitoring wybranego procesu jest to zbiór procedur śledzenia, identyfikacji, analizy i oddziaływania, który umożliwia organizację, sterowanie i kontrolę danego zagadnienia [1].

System monitoringu składa się z: urządzeń pomiarowych, komputera lub jednostki zarządzającej oraz oprogramowania zawierającego zbiór algorytmów umożliwiających interpretację danych pomiarowych i sformułowanie zaleceń dla osoby zarządzającej wybranym procesem lub użytkownika obiektu.

W obiektach budowalnych najlepiej rozwinięte są systemy monitoringu stosowane w transporcie. Zarządzanie w transporcie lotniczym nie jest możliwe bez zastosowania systemów monitoringu, zaś w transporcie samochodowym powszechne jest stosowanie monitoringu w celu identyfikacji niepożądanych incydentów lub zarządzanie czasem podróży. Systemy monitoringu najczęściej wykorzystują system kamer zintegrowany z oprogramowaniem identyfikacji obrazu oraz mogą być doposażone w inne wyspecjalizowane systemy pomiarowe. Systemy monitoringu stosowane są w wielu konstrukcjach mechanicznych, jak na przykład: w samolotach czy dużych statkach, gdzie pełnią funkcję systemów wspomagania

bezpieczeństwa użytkowania [2, 5]. Systemy monitoringu konstrukcji inżynierskich posiadają bardzo obszerną literaturę i jednym z przeglądowych raportów jest praca zespołu z Los Alamos National Laboratory przedstawiająca osiągnięcia w tematyce monitoringu konstrukcji w latach 1996÷2001 [2].

Infrastruktura budowlana w wszystkich krajach składa się z dużej liczby starych budynków, wież, mostów, tuneli, zapór lub innych obiektów, które wymagają regularnych inspekcji technicznych w celu określenia bezpieczeństwa ich użytkowania. Podstawowym elementem cyklicznego monitoringu obiektów są oględziny wizualne czyli inspekcje wykonywane przez doświadczonych inżynierów. Oględziny wizualne mogą być wspierane nieniszczącymi badaniami diagnostycznymi. W przypadku obiektów o szczególnym znaczeniu, jak na przykład zapory wodne, wskazane jest ciągłe, zautomatyzowane diagnozowanie stanu wytężenia newralgicznych elementów konstrukcyjnych. Wczesne i precyzyjne wykrycie uszkodzeń, powstających w trakcie użytkowania, pozwala na prewencyjne działania naprawcze oraz utrzymanie nieprzerwanej eksportacji obiektu. Instalacja systemów ciągłego monitoringu stanu technicznego pozwala na wydłużenie okresu eksportacji obiektu. Instalacja systemu monitoringu technicznego (MT) jest uzasadniona ekonomicznie jeżeli koszty systemu i jego utrzymania są mniejsze niż zyski z poprawy jakości użytkowania i wydłużenia trwałości elementów infrastruktury.

Systemy monitoringu konstrukcji bardzo dynamicznie rozwijają się w Azji, w szczególności w Chinach, Japonii i Singapurze, a także w Europie (Belgia, Wielka Brytania, Niemcy itp.), jak również w Stanach Zjednoczonych i Kanadzie. Pierwsze praktyczne zastosowania systemów monitoringu konstrukcji (SMK) w infrastrukturalnych obiektach budowlanych związane były z badaniami zachowania się mostów. Aktualnie systemy SMK stosuje się praktycznie we wszystkich większych obiektach budowalnych.

Instalacja zestawu czujników wraz z systemem akwizycji danych i usługą udostępniania wyników pomiarów, nie jest technologicznie zadaniem trudnym. Problemem jest natomiast poprawny dobór technologii pomiarowych oraz interpretacja danych na potrzeby użytkownika obiektu. Najczęściej stosowane technologie diagnostyczne to przetworniki indukcyjne, urządzenia bazujące na wiązce lasera, technologie radiograficzne, sklerometryczne, magnetyczne, ultradźwiękowe i akustyczne, które bazują na wzbudzanych prądach wirowych lub analizie pola temperatur. Wymienione metody stosowane są na konstrukcji w precyzyjnie określonej lokalizacji, która jest reprezentatywna dla wybranego elementu konstrukcyjnego. Technologie te określane są mianem metod lokalnych. Do globalnych metod diagnostycznych, stosowanych w systemach SMK, zaliczamy metody wibracyjne [1], kierunkowe metody ultradźwiękowe lub skanowanie stanowiące kombinację metod fotogrametrycznych, skaningu laserowego 3D i narzędzi GPS.

Błędy, które pojawiają się w instalowanych w Polsce systemach SMK wynikają przede wszystkim z braku sformułowania celu, jakiemu ma służyć system SMK. Wybór technologii pomiarowych oraz parametrów pracy systemu SMK, takich jak: częstości dokonywania pomiarów, wybór archiwizowanych danych czy metody wnioskowania o stanie konstrukcji są pochodną celu instalacji systemu monitoringu konstrukcji.

2. Uwarunkowania prawne systemów SMK w Polsce

Rozporządzeniem Ministra Infrastruktury z dnia 12.03.2009 zmienił się przepis w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie. W § 204 dodano ust. 7 w brzmieniu: „7. Budynki użyteczności publicznej z pomieszczeniami przeznaczonymi do przebywania znacznej liczby osób, takie jak: hale widowiskowe, sportowe, wystawowe, targowe, handlowe, dworcowe powinny być wyposażone, w zależności od

potrzeb, w urządzenia do stałej kontroli parametrów istotnych dla bezpieczeństwa konstrukcji, takich jak: przemieszczenia, odkształcenia i naprężenia w konstrukcji."

Zmiana rozporządzenia przyjęta w 2009 roku narzuca powinność instalacji systemu stałej, ciągłej kontroli parametrów istotnych dla bezpieczeństwa konstrukcji. Oznacza to powinność instalacji systemu SMK dla wszystkich budynków użyteczności publicznej przeznaczonej do przebywania znacznej liczby osób. Rozporządzenie nie formułuje precyzyjnej liczby określającej ile osób stanowi „znaczną liczbę osób", ale wskazanie obiektów budowalnych typu: hale dworcowe sugeruje, że zarówno liczba kilkuset, jak i kilkunastu osób równocześnie przebywających w obiekcie stanowi podstawę do instalacji systemu SMK. Istotne sformułowanie w zmianie rozporządzenia dotyczy wyposażenia obiektu „w zależności od potrzeb" w urządzenia rejestrujące „przemieszczenia, odkształcenia i naprężenia w konstrukcji." Wybór technologii pomiarowych, jak również liczby czujników i ich lokalizacji powinien być określony przez cel instalacji systemu SMK opisujących potrzeby użytkownika. Wybór „potrzebnych" technologii pomiarowych, jak również usytuowania elementów systemu SMK powinien być dokonany przez projektanta obiektu budowlanego w konsultacji z osobą znającą możliwości i ograniczenia technologii pomiarowych.

Uwagi krytyczne dotyczące przydatności systemów SMK w budynkach użyteczności publicznej przedstawił Kowalewski i Sulik [6] oraz Kowalewski [7]. Krytyczna uwaga dotyczy przede wszystkim poprawności określania kryteriów w jakich system SMK powinien oceniać stan techniczny konstrukcji i informować o tym Użytkownika obiektu. Podstawą projektowania obiektów budowalnych jest spełnienie warunków stanu granicznego nośności i użytkowalności, które są „wynikiem wiedzy i doświadczenia dotyczącego konstrukcji budowalnych, a także konsensusu między stronami korzystającymi z tych norm" [7]. Wyznaczanie warunków dla parametrów mierzonych przez SMK uwzględniających działanie wszystkich sił z sprawdzaniem styczności i wyboczenia globalnego oraz lokalnego jest praktycznie niemożliwe. Zdaniem autorów, systemy SMK mogą jedynie pomierzyć ugięcia reprezentujące zginanie wybranych elementów konstrukcyjnych. Argumentem na brak skuteczności działania systemu SMK jest nowy most w Puławach, który został wyposażony w bardzo rozbudowany system SMK, a naprawa płyty żelbetowej mostu realizowana była na podstawie tradycyjnego przeglądu bazującego na wizualnych oględzinach. Autorzy, na przykładzie nowego i starego mostu w Puławach argumentują, że instalacja systemu SMK na nowych obiektach budowalnych jest mniej zasadna niż monitoring konstrukcji starego mostu w Puławach, który jest także eksploatowany, a znajduje się w znacząco gorszym stanie technicznym.

Dodatkowym negatywny aspektem systemów SMK jest wykorzystanie elektroniczno-mechanicznych urządzeń pomiarowych. Każde urządzenie pomiarowe bazujące na elementach mechanicznych, jak na przykład napięta drgająca struna w czujnikach strunowych i elektronicznych podlega powolnej degradacji, powodującej pojawienie się dryftów układu mechanicznego i elektronicznego. Każdy czujnik wymaga okresowej kalibracji. Zwyczajowo przegląd czujników powinien być wykonywany raz na rok. Trwałość układów pomiarowych jest znacznie mniejsza niż trwałość obiektu budowalnego.

Zdaniem Autora artykułu poprawnie zaprojektowany obiekt budowalny, który został poprawnie wykonany nie wymaga instalacji systemu SMK. W systemy monitoringu konstrukcji wyposażone powinny być obiekty budowalne, gdzie zastosowano unikalne rozwiązania konstrukcyjne i w których precyzyjna analiza numeryczna czy badania eksperymentalne nie są możliwe lub występują tam zwiększone niepewności w określeniu rzeczywistych obciążeń i innych odziaływań środowiskowych. Zalecane jest także użycie systemów monitoringu zintegrowanych z systemami BMS, jeżeli ich funkcjonowanie pozwala na obniżenie kosztów utrzymania obiektu.

3. Typy systemów SMK ze względu na cele ich funkcjonowania

Proponuje się podział systemów SMK ze względu na cele ich instalacji na dwa typy:

– systemy SMK na potrzeby zapewnienia bezpieczeństwa;
– systemy SMK wspierające utrzymanie obiektu budowlanego.

Pierwszy typ systemów SMK dotyczy obiektów infrastruktury krytycznej, czyli obiektów, których awaria może spowodować bardzo znaczące straty ludzkie i finansowe. Ten typ systemów SMK obejmuje również monitoring obiektów, które czasowo znajdują się w stanie technicznym budzącym wątpliwości, ale nie wskazującym jednoznacznie na konieczność wyłączenia obiektu z użytkowania. Podstawowymi celami pracy takiego systemu SMK jest:

– informowanie o stanie technicznym obiektu budowalnego w czasie rzeczywistym,
– wykrywanie uszkodzeń w najszybszym możliwym czasie,
– informowanie o możliwości wystąpienie awarii, sygnalizacja stanów przed awaryjnych,
– wysyłanie ostrzeżeń w przypadku wystąpienia obciążeń ekstremalnych,
– informowanie wyznaczonych służb o wystąpieniu awarii,
– wspieranie bezpieczeństwa zaraz po wystąpieniu awarii,
– zbieranie danych i wykrywanie nietypowych zdarzeń w zachowaniu się konstrukcji i informowanie o nich Użytkownika,
– dostarczanie danych do weryfikacji procedur projektowych i procedur utrzymania obiektu.

Systemy SMK na potrzeby bezpieczeństwa są bardzo rozbudowane. Moduły pomiarowe dublują pomiary przez wykorzystanie różnych, niezależnych technologii pomiarowych, zaś moduły wspomagające wnioskowanie i systemy powiadamiania umożliwiają wszczęcie procedur ewakuacji osób znajdujących się w obiekcie lub osób narażonych na bezpośrednie odziaływanie, w przypadku awarii. Rozbudowanymi systemami są także systemy SMK, które instaluje się do badania nowych innowacyjnych rozwiązań, w których konieczne jest dokładne rozpoznanie pracy poszczególnych elementów konstrukcji.

Drugi typ systemów SMK instalowanych na potrzeby utrzymania obiektu budowalnego zakłada, że obiekt jest zaprojektowany i realizowany poprawnie. W takim przypadku podstawowe cele instalacji systemu SMK to:

– gromadzenie i dostarczanie danych do planowania przeglądów konstrukcji,
– gromadzenie danych o rzeczywistych obciążeniach konstrukcji obiektu,
– informowanie o stanie procesów istotnych z punktu widzenia utrzymania obiektu:
  – informowanie o poziomie obciążenia zalegającym śniegiem lub jego rozkładzie w celu usprawnienia odśnieżania,
  – informowanie o zaleganiu wody lub prędkości jej odprowadzania w trakcie ulewnych deszczy,
  – informowanie o znaczącym obciążeniu poziomym wywołanym oddziaływaniem wiatru,
  – informowanie o nadmiernych amplitudach drgań mogących wywołać dyskomfort osób przebywających w obiekcie,
  – informowanie o rozkładzie temperatur elementów układu konstrukcyjnego,
  – inne funkcje związane z informowaniem o procesach istotnych dla utrzymania obiektu i związane z jego specyfiką,
– informowanie o stanie technicznym obiektu, ale nie koniecznie w czasie rzeczywistym; zalecane jest raportowanie podstawowych parametrów użytkowych w odstępach dziennych, tygodniowych lub miesięcznych,
– wysyłanie ostrzeżeń w przypadku wystąpienia zdarzeń nietypowych.

Systemy SMK na potrzeby utrzymania obiektu nie muszą być rozbudowane. Do określenia ogólnego stanu technicznego obiektu wystarczy zastosowanie paru lub parunastu czujników umożliwiających określenie najważniejszych, reprezentatywnych parametrów opisujących konstrukcję. Na życzenie użytkownika mogą być dodane specjalne systemy pomiarowe, na przykład: określające szybkość oprowadzania wody opadowej w wybranej strefie systemu odwadniającego. Celem tych systemów nie jest, bezpośrednio, wszczynanie procedur ewakuacji i nie są one zintegrowane z systemami zarządzania kryzysowego. Systemy SMK na potrzeby utrzymania powinny być znacząco tańsze od systemów SMK na potrzeby zapewnienia bezpieczeństwa użytkowania.

4. Przykłady systemów SMK na potrzeby bezpieczeństwa
System SMK zapory ziemnej zbiornika na odpady Żelazny Most

Rozbudowany system SMK został zainstalowany przez KGHM Polska Miedź S.A. w składowisku Żelazny Most [8]. Podstawowym celem systemu SMK jest zapewnienie bezpieczeństwa użytkowania składowiska. Obiekt budowlany jest systemem zapór ziemnych wznoszonych na potrzeby składowania mokrych odpadów przemysłowych (rys. 1). Zbiornik odpadów poflotacyjnych ma powierzchnię około 14 km^2. Ciągły przyrost masy odpadów powoduje konieczność podwyższania zapór ziemnych. System SMK składa się z ponad 8000 punktów pomiarowych obejmujących dane geologiczne, hydrogeologiczne, geotechniczne, geofizyczne, chemiczne i geometryczne. Duże ilości danych zbierane są w bazie danych zintegrowanej z rozwiązaniami GIS. System posiada narzędzia selektywnego wyboru danych i ich prezentacji. Decyzje o stanie technicznym obiektu podejmowane są przez powołany zespół specjalistów, którzy mają do dyspozycji bardzo rozległy materiał pomiarowy.

Rys. 1. Zbiornik odpadów poflotacyjnych Żelazny Most

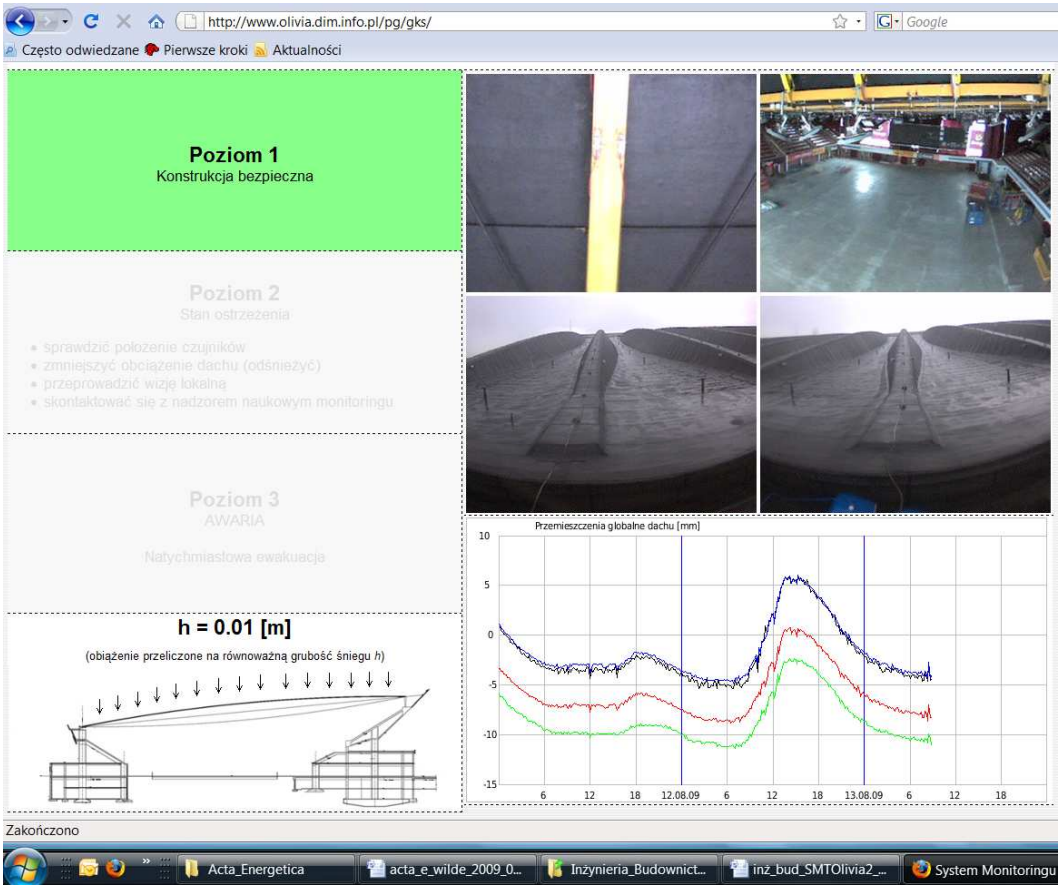
System ASTKZ zapory we Włocławku

Zapora we Włocławku posiada zautomatyzowany system akwizycji danych [9] zwany Automatycznym Systemem Technicznej Kontroli Zapór (ASTKZ). Zestaw czujników składa się z piezometrów, inklinometrów, szczelinomierzy, czujników do pomiaru poziomu wody i temperatury. Łączna liczba zastosowanych czujników wynosi 190. System został założony

w 1997 roku, a jego głównym zadaniem jest dostarczanie danych dla służb technicznych pracujących na zaporze. Decyzje o stanie technicznym obiektu podejmuje zespół ekspertów.

System SMK Hali Sportowo-Widowiskowej „Olivia” w Gdańsku

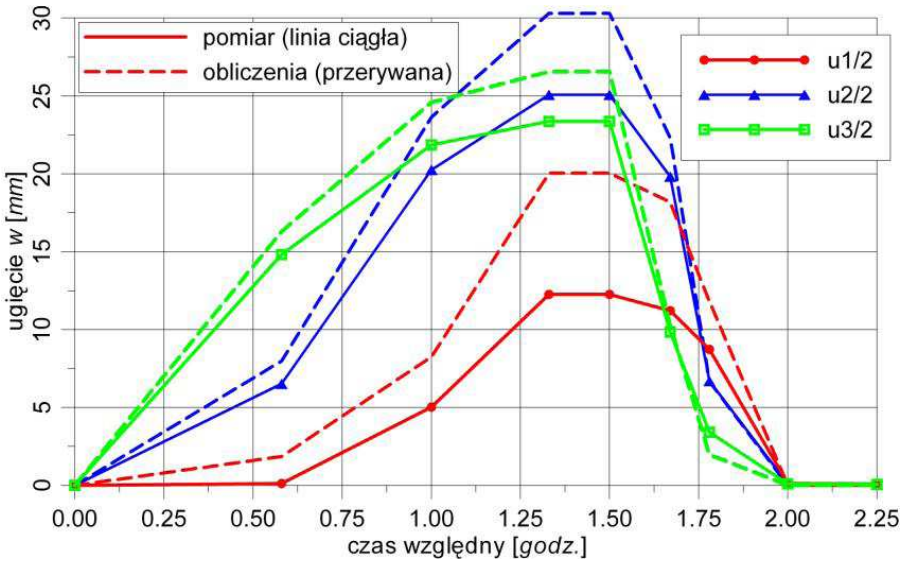
Celem instalacji systemu SMK hali Olivia [3,4] było zwiększenie bezpieczeństwa użytkowania obiektu do czasu wykonani remontu konstrukcji dachu. Przyczyną instalacji systemu były wątpliwości dotyczące wyboczenia się słupków jednego z dźwigarów, które zgodnie z projektem nie powinny być narażone na siły ściskające lub zginanie. System automatycznie wykonywał pomiary co 10 minut w 74 punktach pomiarowych oraz w trybie ciągłym wykonywał symulacje numeryczne zachowania się konstrukcji dachu hali. Zautomatyzowana i ciągła ocena stanu konstrukcji określana była na bazie wyników pomiarowych, ich relacji do wartości dopuszczalnych oraz indeksu zgodności wartości pomiarowych z wynikami numerycznymi. Moduł sygnalizacyjny (rys. 2) ma za zadanie przedstawienie najważniejszych wyników pomiarowych i obliczeniowych Użytkownikowi obiektu: przemieszczenia 4 dźwigarów dachowych (dla ostatnich trzech dni), podgląd z kamer na newralgicznym elemencie konstrukcyjnym i wewnątrz obiektu oraz kamer na połaci dachowej. Ekran sygnalizacyjny pokazywał także wynik symulacji numerycznych określających równoważną grubość śniegu, która powoduje aktualny stan ugięcia całej konstrukcji dachu. System był zintegrowany ze Strażą Miejską i jednostkami zarządzania kryzysowego. W trakcie 3 letniego okresu pracy systemu SMK ostrzeżenie o niepoprawnej pracy konstrukcji dachu zostało wysłane jeden raz i dotyczyło nieliniowego zachowania się dachu w trakcie jego znacznego obciążenia zalegającym śniegiem.



Rys. 2. Panel sygnalizacyjny systemu SMK hali „Olivia” [1].

Innowacyjnym elementem systemu SMK hali Olivia było zastosowanie modelu numerycznego jako podstawowego elementu pozwalającego określić czy konstrukcja dachu zachowuje się zgodnie z założeniami projektowymi. Parametry modelu numerycznego zostały zaktualizowane na bazie obciążeń próbnych. Konstrukcja dachu została obciążona workami z piaskiem (rys. 3) i wykonane zostały pomiary ugięć. Wyniki porównawcze danych pomiarowych i symulacji numerycznych pokazane są na rys. 4.

Rys. 3. Obciążenia próbne konstrukcji dachu hali „Olivia”



Rys. 4. Pomiarowe i obliczeniowe przemieszczenia dźwigara dachowego w trakcie obciążeń próbnych

W trakcie remontu dachu hali okazało się, że cięgna sprężające dwóch dźwigarów są uszkodzone. Ekspertyza cięgien określiła utratę przekroju wiązki cięgien na około 40%. Moduł analiz systemu SMK hali „Olivia” został zaktualizowany na danych z obciążeń próbnych, w trakcie których cięgna były już uszkodzone i system SMK nie mógł wykryć tego zjawiska. Moduł analiz systemu SMK badał anomalie w zachowaniu się konstrukcji względem modelu referencyjnego, zbudowanego na bazie obciążeń próbnych. Aby system SMK mógł poprawnie określać stan techniczny konstrukcji jego model referencyjnym musi być zdefiniowany na nieuszkodzonej konstrukcji.

Rys. 5. Fotografie uszkodzonych cięgien sprężających dachu hali „Olivia”

System SMK rozparcia stalowej komory startowej TBM i wykopów w ciągu trasy Słowackiego w Gdańsku

System SMK został zainstalowany na stalowych, rurowych elementach rozporowych komory startowej maszyny TBM (rys. 6) tunelu pod Martwą Wisłą i w wykopach w ciągu trasy Słowackiego (rys. 6). Celem instalacji systemu jest bezpieczeństwo prowadzenia prac w wykopach. System SMK składa się około 180 ekstensometrów strunowych o bazie pomiarowej 150 mm. Dane z systemu SMK analizowane są raz dziennie i oceniany jest wpływ realizacji wykopu na siły w elementach rozporowych. W systemie SMK brakuje monitoringu wizyjnego pozwalającego na ilościowe oszacowanie postępu prac i szczegółową weryfikację danych pomiarowych. System SMK powinien także posiadać możliwość weryfikacji sił lub deformacji wybranego elementu rozporowego inną technologią pomiarową.

Rys. 6. Monitorowane elementy rozporowe komory startowej TBM (Tunnel Boring Machine) i zabezpieczenia wykopów tunelu pod Martwą Wisłą w ciągu trasy Słowackiego w Gdańsku

5. Przykłady systemów SMK na potrzeby utrzymania

System SMK hali Ergo Arena na granicy miasta Gdańska i Sopotu

System SMK hali Ergo Arena (rys. 7) jest typowym systemem zainstalowanym na potrzeby utrzymania obiektu [4]. Dach hali ERGO ARENA jest stalową kratownicą przestrzenną podpartą na czterech betonowych pylonach (rozstaw w osiach 70,60×66,60 m). Kratownicowa konstrukcja dachu oraz węzeł kratownicy pokazane są na rys. 8. System SMK bazuje na pomiarze przemieszczeń pionowych wykonywanych w 5 punktach konstrukcji (rys. 9). Pomiar przemieszczeń wykonywany jest przy pomocy systemu hydraulicznego wykorzystującego system naczyń połączonych. Punkt referencyjny pomiaru przemieszczeń znajduje się na

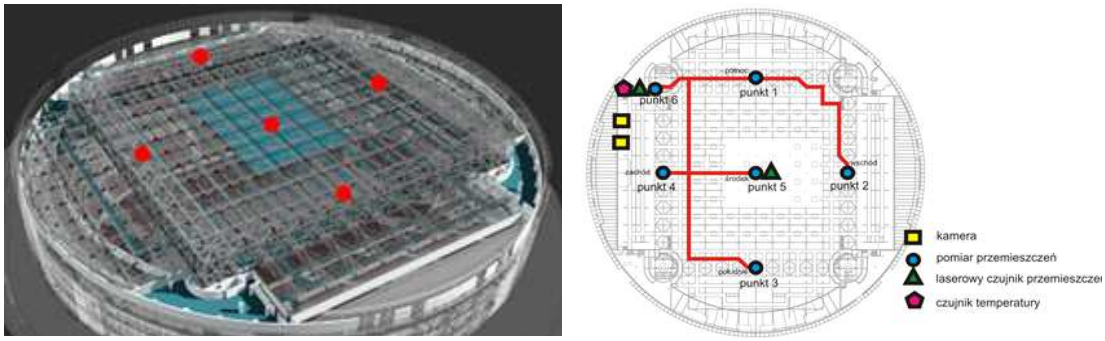
jednym z pylonów. Pomiar w środku dachu jest dodatkowo wykonywany niezależnym badaniem przemieszczenia wykonywanym za pomocą systemu laserowego. Reprezentatywnym pomiarem umożliwiającym szacowanie naprężeń w elementach konstrukcji dachu na podstawie symulacji numerycznych jest tylko ten jeden wykonywany w środku dachu.

Rys. 10 pokazuje przemieszczenia pionowe środkowego punktu dachu od dnia 3.12.2010 do dnia 14.04.2011. Trzyletnia obserwacja pracy dachu i pomiary rozkładów zalegającego śniegu pokazały, że na dachu górnym praktycznie go nie ma. Usytuowanie hali w pobliżu morza sprawia, że opady śniegu pawie zawsze związane są z oddziaływaniem wiatru, który powoduje powstawanie worków śnieżnych w pobliżu ścian dachu obniżonego. Jednak całkowity ciężar zalegającego śniegu jest stosukowo niewielki i przemieszczenia pionowe środka dachu hali nie przekroczyły 20 mm.

Zalecenia o konieczności odśnieżania, wysyłane przez system SMK hali Ergo Arena są budowane przez system ekspertowy bazujący praktycznie na jednym pomiarze przemieszczenia i zaktualizowanym modelu konstrukcji dachu.

Rys. 7. Hala Ergo Arena na granicy miasta Gdańska i Sopotu

Rys. 8. Kratownicowa konstrukcja dachu i węzeł kratownicy

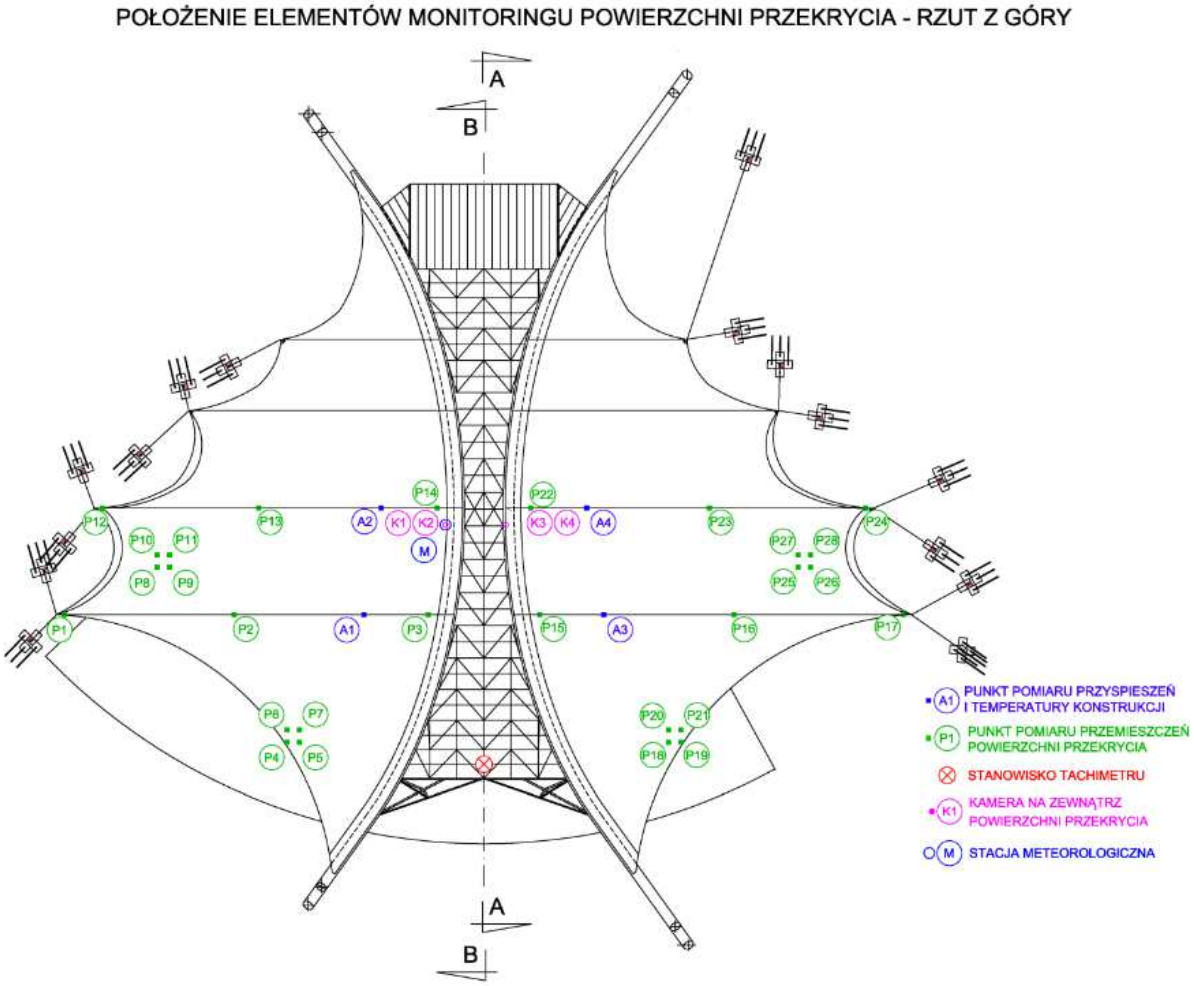


Rys. 9. Położenie punktów pomiarowych system SMK hali Ergo Arena

Rys. 10. Przemieszczenia środka dachu hali Ergo Arena od 3.12.2010 do 14.04.2011

System SMK zadaszenia nowej Opery Leśnej w Sopocie

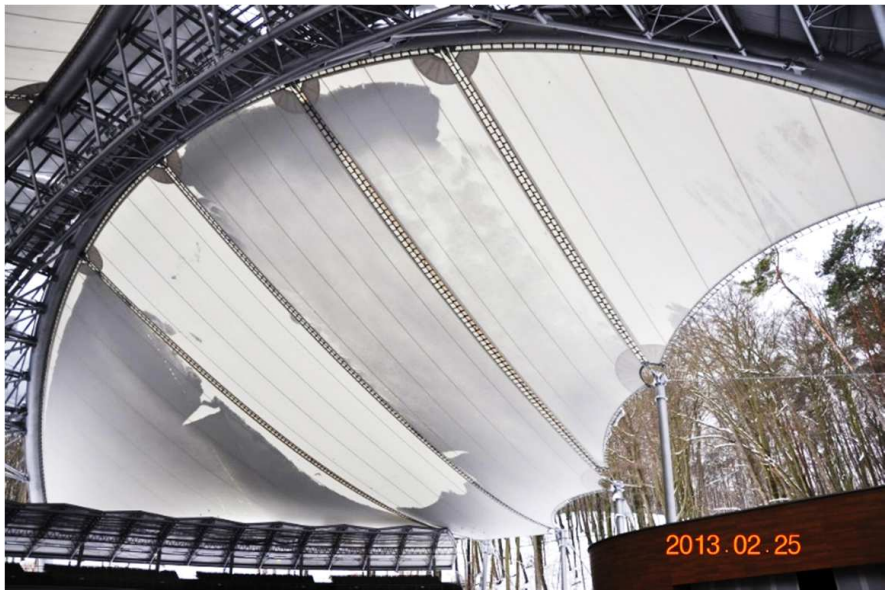
W roku 2012 wykonano nową konstrukcję zadaszenia Opery Leśnej w Sopocie. Przekrycie z tkaniny technicznej rozpięte jest na stalowych dźwigarach łukowych o rozpiętości przekraczającej 80 m, linach koszowych i obwodowych. Podstawowym elementem systemu SMK jest pomiar przemieszczeń 32 punktów kontrolowanych, położonych na tkaninie technicznej oraz innych na elementach zadaszenia, wykonywany tachimetrem automatycznym. Położenie elementów systemu SMK pokazane na rys. 11 i szczegółowo opisane zostało w publikacji [10].



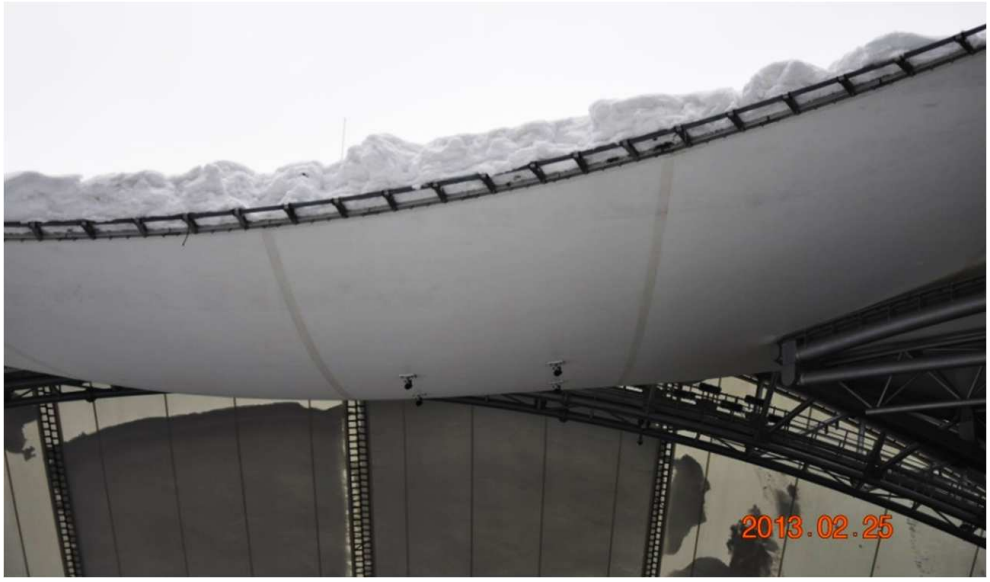
Rys. 11. Położenie elementów system SMK na rzucie konstrukcji zadaszenia Opery Leśnej

Projekt membrany z tkaniny technicznej zakładał równomierne obciążenie śniegiem całej membrany. Wykonawca membrany, firma Tayio, sugerowała, że śnieg zsunie się z mocno

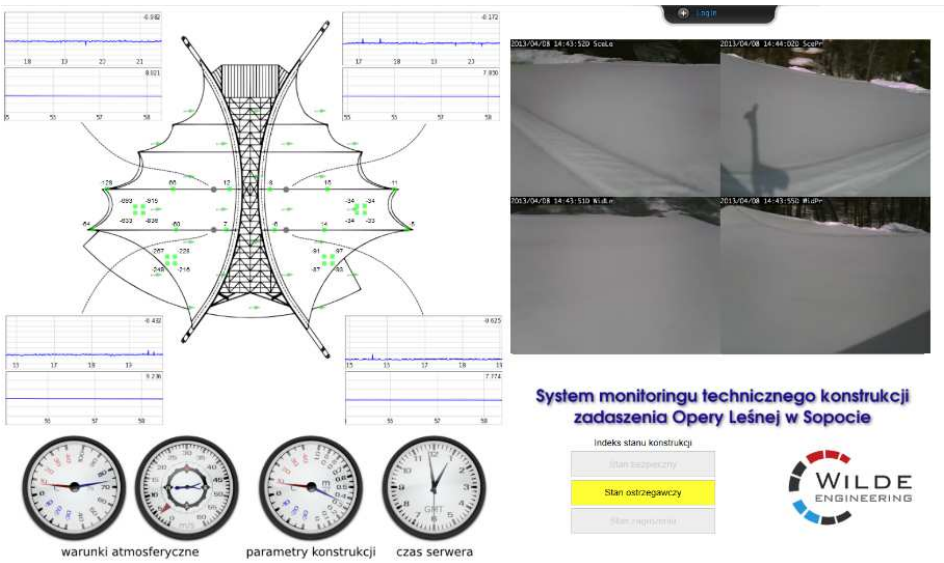
pochylonej górnej części membrany i będzie równomiernie zalegał na około połowie zadaszenia z tkaniny technicznej. Analiza rozkładu śniegu w sezonie zimowym 2012/2013 wykazała, że dla ujemnych temperatur śnieg zalega równomiernie na całej powierzchni membrany. Jednak, gdy temperatury nieznacznie przekroczyły zero, śnieg na największym panelu zsunął się na sam dół (rys. 12). Punktowe obciążenie końca panelu doprowadziło do powstania niecki wypełnionej spiętrzonym śniegiem. Dodatkowe opady śniegu powodują dalsze zsuwanie się śniegu i jego spiętrzanie na końcu panelu (rys. 13). System SMK określił taki stan obciążenia jako niebezpieczny włączając komunika ostrzegawczy (rys. 14). Wykres przemieszczeń punktu kontrolowanego 8 (rys. 15) od 10 lutego 2013 do 7 kwietnia 2013 roku pokazany pokazuje zjawisko zsuwania się śniegu i nagłych przyrostów przemieszczeń membrany (na przykład dnia 24 lutego 2013). Maksymalne przemieszczenie pionowe punktu 8 wyniosło 1280 mm. W pierwszym roku użytkowania systemu SMK Opery Leśnej służył on gównie usprawnianiu procedur odśnieżania obiektu i weryfikacji założeń projektowych.



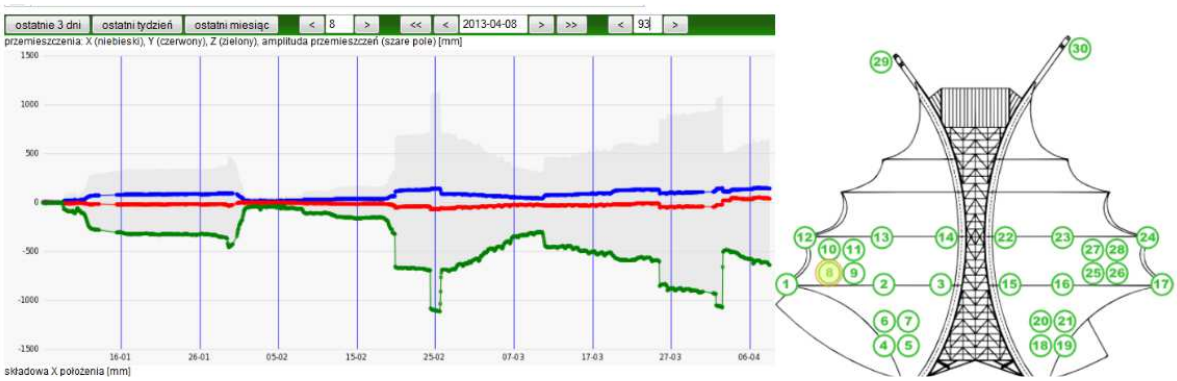
Rys. 12. Rozkład śniegu na najdłuższym prostokątnym panelu z tkaniny technicznej



Rys. 13. Rozkład śniegu na najdłuższym prostokątnym panelu z tkaniny technicznej



Rys. 14. Panel sygnalizacyjny system SMK Opery Leśnej z komunikatem ostrzegawczym



Rys. 15. Wykres przemieszczeń pionowych (kolor zielony) i poziomych punktu kontrolowanego 8 znajdującego się na najdłuższym panelu przekrycia

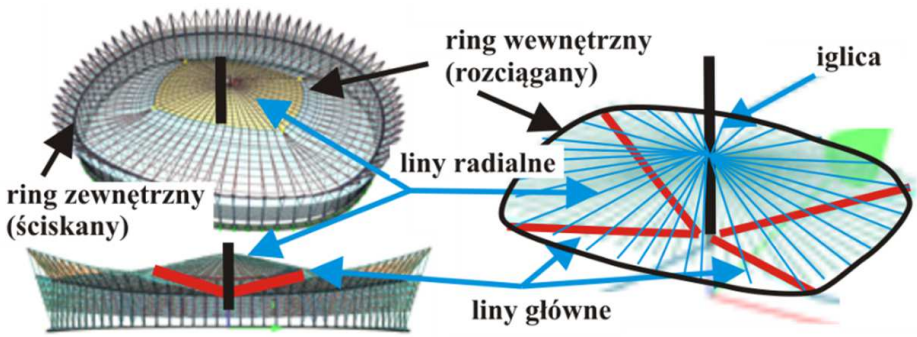
System SMK Stadionu Narodowego w Warszawie

Konstrukcja nośna zadaszenia Stadionu Narodowego została zaprojektowana jako układ ramowo-cięgnowy pracujący na zasadzie koncepcji rozwiązania stosowanego w kole rowerowym. Ułożone radialnie liny są rozpięte pomiędzy zewnętrznym pierścieniem ściskanym, wykonanym ze stalowej rury („ring zewnętrzny”), a wewnętrznym pierścieniem rozciąganym (podwójnym – górnym i dolnym), wykonanym z lin stalowych („ring wewnętrzny”). W środku konstrukcji nośnej dachu znajduje się iglica centralna. Pierścień zewnętrzny jest podtrzymywany przez szereg stalowych słupów współpracujących z odciągami i zastrzałami, przenoszącymi obciążenia z górnych lin podtrzymujących dach (rys. 16 [11]). Poszycie dachu, wykonane z tkanin technicznych, jest podzielone na dwa obszary – zewnętrzny z dachem stałym i wewnętrzny nad płytą boiska. Dach wewnętrzny jest rozsuwany z garażu znajdującego się w iglicy.

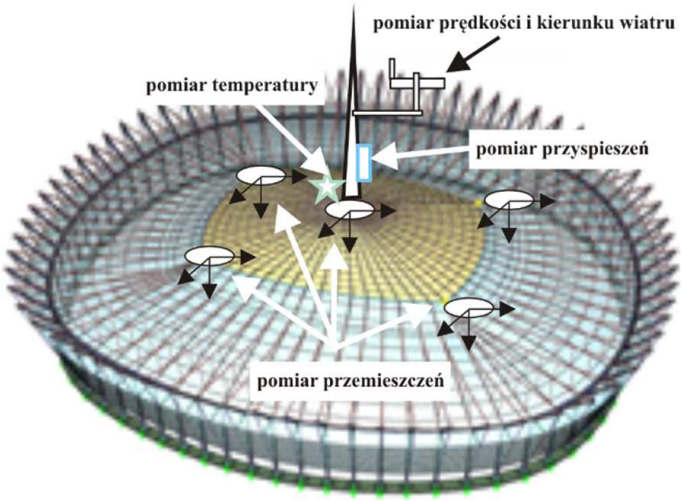
W centralnej części przekrycia dachu stadionu, zamiast szeregu lin dolnych zastosowano cztery wiązki po trzy liny łączące dolny pierścień rozciągany (linowy) z dolną częścią iglicy. Dochodzący do centralnej części iglicy, układ 60 radialnie rozmieszczonych lin górnych przechodzi przez górny wewnętrzny pierścień linowy. Jest on utrzymywany w stałej odległości od dolnego wewnętrznego pierścienia linowego przy pomocy 60 rozpór rurowych.

Dach ruchomy przymocowany jest do lin górnych w kilku punktach poprzez wózki ślizgowe. Liny radialne rozmieszczone są równomiernie (kątowo, po obwodzie dachu), co jest wymuszone koniecznością uzyskania regularnego podziału membrany. Górny pierścień linowy usytuowany jest prawie poziomo, podczas gdy w punkcie centralnym liny radialne mocowane są na różnej wysokości. Celem tego jest uzyskanie delikatnie pofałdowanej powierzchni dachu, a także zminimalizowanie wymiarów pierścienia w punkcie centralnym, w którym mocowanych jest 60 końcówek lin radialnych.

Minimalna konfiguracja systemu SMK Stadionu Narodowego została określona przez Projektanta Obiektu i pokazana jest na rys. 17. Podstawowym elementem system SMK stadionu jest pomiar pionowych przemieszczeń w 5 punktach kontrolowanych: 1 punkt na iglicy i 4 punkty na pierścieniu wewnętrznym. W finalnym projekcie systemu SMK dołożono pomiar przyspieszeń, pomiar temperatur konstrukcji stalowej oraz stację meteorologiczną. Ponieważ pomiar przemieszczeń punktów kontrolowanych odbywa się za pomocą tachimetru automatycznego zwiększono liczbę punktów pomiaru przemieszczeń, gdyż nie wiąże się to ze znacznymi dodatkowym nakładami finansowymi.



Rys. 16. Układ konstrukcyjny stadionu narodowego

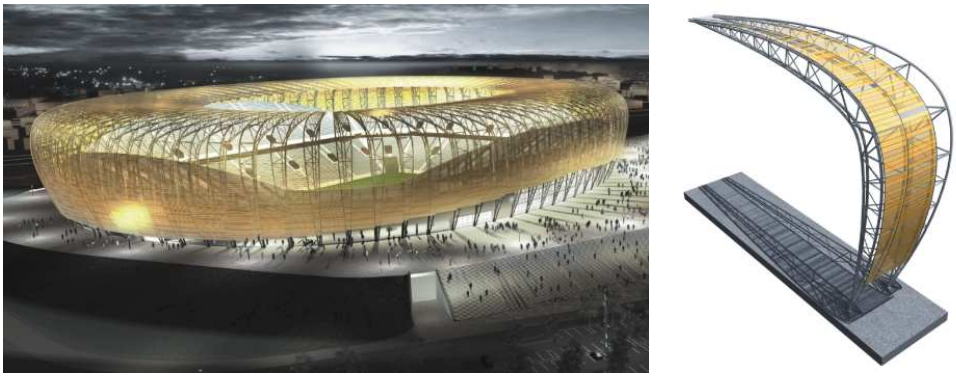


Rys. 17. Minimalne konfiguracja systemu SMK Stadionu Narodowego określona przez Projektanta

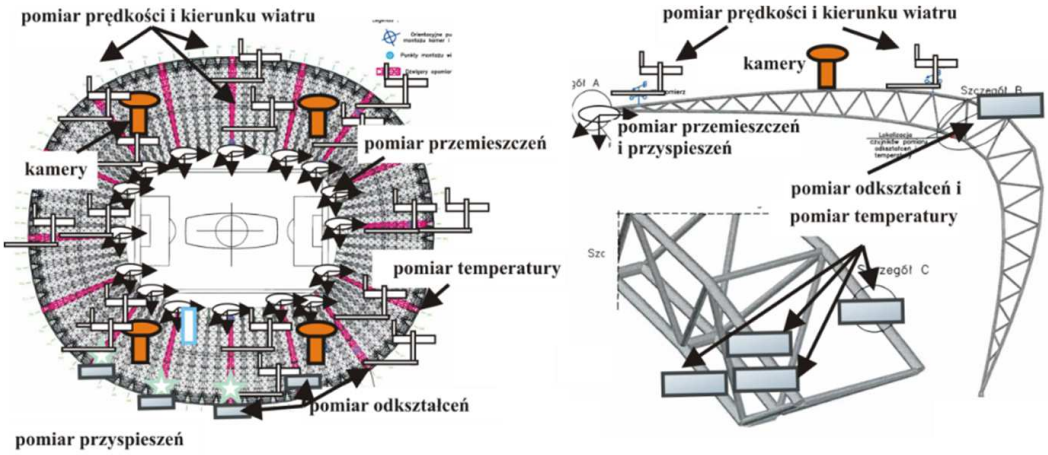
System SMK stadionu PGE Arena w Gdańsku

Konstrukcja zadaszenia trybun stadionu PGE Arena składa się z 82 przestrzennych kratownicowych wiązarów stalowych w formie łuków sierpowych (rys. 18) wspartych na fundamentach lub na podziemnej części konstrukcji żelbetowej. Konstrukcja poza fundamentami jest niezależna od pozostałych części stadionu i stanowi odrębny statycznie i strukturalnie element.

Więzary główne połączone są ze sobą obwodowymi elementami tworzącymi zamknięte pierścienie. Dodatkowo więzary są usztywnione stężeniami prętowymi typu X. Wysokość od poziomu stopy do powierzchni dachu wynosi ok. 38 m. Długość wspornika nad trybuną liczona od łożyska do krawędzi dachu nad boiskiem wynosi ok. 48 m.



Rys. 18. Minimalne konfiguracja systemu SMK Stadionu Narodowego określona przez Projektanta



Rys. 19. Położenie elementów system SMK PGE Areny w Gdańsku

System SMK PGE Areny składa się z modułu pomiarowego, w skład którego wchodzą (rys. 19) [12]:

– czujniki przemieszczeń pionowych – 16 sztuk,
– czujniki pomiaru przyspieszeń – 16 sztuk,
– czujniki pomiaru odkształceń i temperatury – 256 sztuk
– czujniki pomiaru prędkości i kierunku wiatru – 16 sztuk,
– tyczki śniegowe lub inne urządzenia do określenia grubości powłoki śniegu – 4 sztuki,
– kamera – 4 sztuki,
– referencyjna stacja pogodowa umieszczona w pobliżu obiektu – 1 sztuka.

Wykorzystanie pomiarów przemieszczeń końców 16 dźwigarów jest uzasadnione i stanowi ważną informację o stanie deformacji zadaszenia stadionu. Wątpliwości budzi instalacja 17 stacji meteorologicznych czy pomiar odkształceń w 256 punktach konstrukcji. Instalacja tak dużej liczby czujników może mieć walory poznawcze, ale niekonieczne są to pomiary niezbędne dla wsparcia procedur utrzymania obiektu.

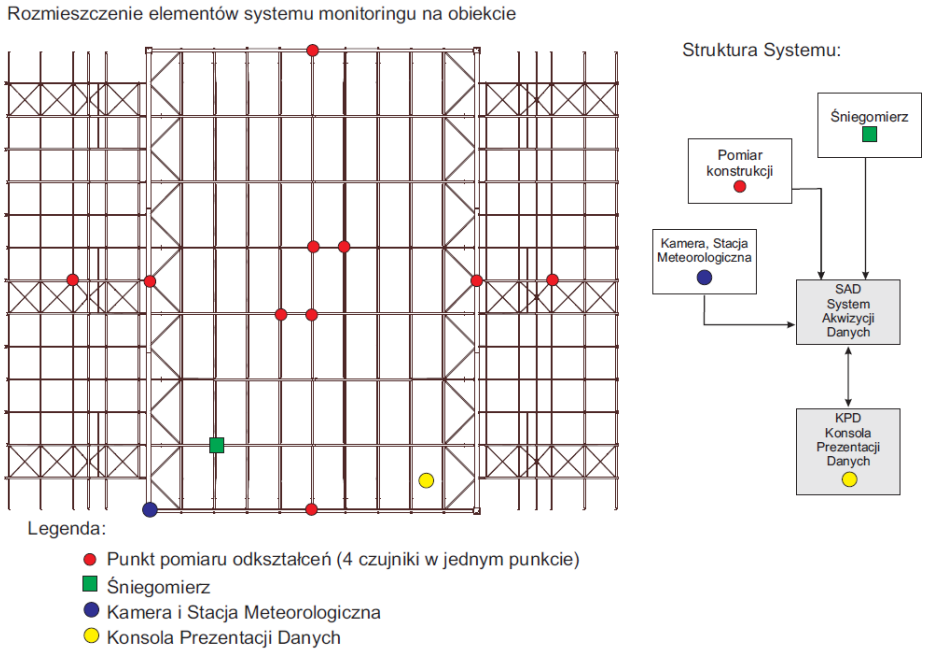
System SMK hali Centrum Turystyczno-Sportowej „Aqua-Zdrój" w Wałbrzychu

Hala Turystyczno-Sportowa jest standardowym obiektem przeznaczonym do realizacji rozgrywek, między innymi, meczów siatkarskich. Podstawowym elementem nośnym całego układu konstrukcyjnego hali są kratownice główne oparte na czterech słupach żelbetowych rozmieszczonych w narożnikach boiska [13]. Powstaje w ten sposób krata obwodowa o rozpiętościach 30 i 42 m oraz wysokości osiowej 4 m. Wypełniona jest wewnątrz konstrukcją stalową, która składa się z dwutrapezowych dźwigarów L = 30 m rozstawionych co 6 m i rozpiętych między nimi płatwiami kratowymi co 3 m (rys. 20). Płatwie spinają oba pasy dźwigarów w płaskie ortogonalne siatki tworząc układ rusztu przestrzennego (o oczkach 3×6 m). Dźwigary 30 m o h = 3 m, zawieszone na pasie górnym kraty głównej, połączone są zastrzałami również z jej pasem dolnym. Skrajne pola stężono cięgnami z prętów okrągłych.

Konstrukcję stalową dachu nad trybunami stanowią jednoprzęsłowe kratownice L = 13,15 m o wysokości h = 1,5 m. Jednym końcem oparte na pasie dolnym kraty głównej a drugim zamocowane do elementów żelbetowych (podciągu w osi SJ i ściany w osi SA). Rozstawione są co 3 m, zgodnie z modułem skratowania kraty głównej. Płatwie L= 3 m spinające pasy górne wiązara zaprojektowano jako jednoprzęsłowe belki mocowane przegubowo na obu końcach, oddalone od siebie co około 3 m.

W hali zainstalowano system SMK posiadający 40 ekstensometrów strunowych (rys. 21), śniegomierz, stację meteo oraz obrotową kamerę wideo z konsolą umożliwiającą podgląd połaci dachowej z prędkością 100 klatek na sekundę. Hala Turystyczno-Sportowa w Wałbrzychu jest obiektem małym i zaprojektowanym z zastosowaniem tradycyjnych rozwiązań. Konieczność stosowania systemu SMK jest wątpliwa. Jeżeli Użytkownik hali posiada potrzebę monitorowania konstrukcji to wystarczającym pomiarem jest pomiar ugięcia w środku rozpiętości hali. Pomiar odkształceń realizowany przez ekstensometry strunowe jest zależny od wielu czynników wpływających na pomiary i może być trudny w interpretacji.

Rys. 20. Fotografia konstrukcji dachu hali w Wałbrzychu



Rys. 21. Lokalizacja elementów systemu SMK hali w Wałbrzychu

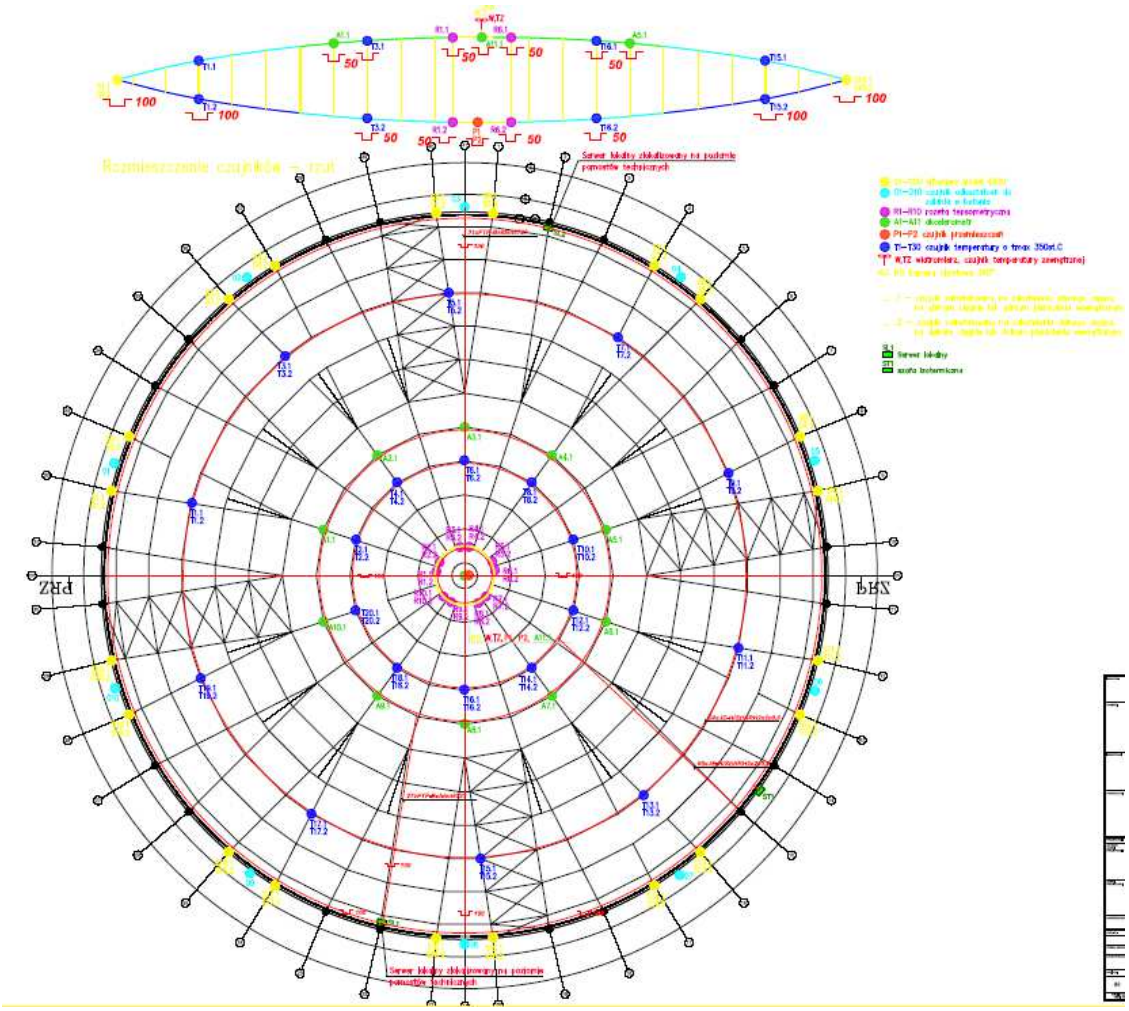
System SMK hali Czyżyny w Krakowie

Hala Widowiskowo-Sportowa „Czyżyny" w Krakowie jest obiektem złożonym z hali głównej i hali treningowej. Główna hala (rys. 22) znajduje się na planie okręgu o średnicy 146 m, a widownia ma kształt zbliżony do elipsy Słupy pod główny ring nośny budynku ułożone są na planie okręgu o średnicy osiowej 128,40 Konstrukcję trybun zaprojektowano w postaci prefabrykowanych płyt podaudytoryjnych [14].

Rys. 22. Wizualizacja hali głównej „Czyżyny" i modelu dyskretyzacyjnego zadaszenia

System monitoringu hali głównej jest niezmiernie rozbudowany (rys. 23) i nie jest możliwa syntetyczna analiza zasadności zastosowania poszczególnych grup czujników. Jako przykładowe omówione zostaną czujniki strunowe, zabetonowane w zewnętrzny, ściskany pierścień betonowy. Montaż i napięcie cięgien, stanowiących podstawowe elementy konstrukcyjne dachu, wprowadza do pierścienia betonowego znaczące obwodowe naprężenia ściskające. System SMK ma za zadanie wsparcie procedur utrzymania już gotowego obiektu. Wykonując obliczenia wpływu obciążenia śniegiem, z uwzględnieniem rzeczywistych rozkładów śniegu na obiekcie, uzyskano przyrost naprężeń obwodowych na poziomie 3,5 MPa. Dyskusyjnym jest instalowanie czujników, które w trakcie użytkowania mogą nie podawać informacji

kluczowych dla utrzymania obiektu. Wątpliwe jest także stosowanie czujników zatapianych w elemencie betonowym. Takie rozwiązanie powoduje, że nie ma możliwości kontroli czujnika, ani nie jest możliwa jego wymiana w przypadku jego uszkodzenia.



Rys. 23. Lokalizacja elementów systemu SMK hali Czyżyny w Krakowie

6. Uwagi końcowe

Tematyka systemów monitoringu konstrukcji obiektów budowalnych jest relatywnie nowa i nie ma wypracowanych zasad, standardów projektowania oraz wykonawstwa takich systemów. Większość aktualnie instalowanych systemów SMK nie ma podanego celu instalacji. Proponuje się podział na dwa typy systemów SMK: systemy dedykowane do zapewnienia bezpieczeństwa konstrukcji, które składają się ze zdublowanych systemów pomiarowych oraz systemy przeznaczone do wsparcia utrzymania obiektu, które mogą składać się z małej liczby czujników. Systemy wspierające utrzymanie obiektu pośrednio przyczyniają się do podniesienia bezpieczeństwa użytkowania przez uzupełnianie standardowych przeglądów danymi pomiarowymi umożliwiającymi dokładniejszą ocenę stanu technicznego.

Systemy SMK instalowane w nowych obiektach są systemami przeznaczonymi do wsparcia utrzymania obiektu, gdyż z definicji zakłada się, że obiekt jest zaprojektowany i wykonany poprawnie. Najczęstszym błędem w aktualnie projektowanych i instalowanych systemach SMK jest tendencja do rozbudowywania modułów pomiarowych o kosztowne, na etapie

budowy i serwisowania, czujniki pomiarowe, których przydatność w procesie utrzymania obiektu jest wątpliwa.

Literatura

1. Wilde, K.: Możliwości zastosowania systemów monitoringu technicznego w infrastrukturze elektroenergetycznej. Acta Energetica, 2009/02, s. 107-114.
2. Sohn H., Farrar C., Hemez F., Shunk D., Stinemates D., Nedler B., Czarnecki J.: A Review of Structural Monitoring Literature: 1996-2001, Los Alamaos National Laboratory, 2004.
3. Wilde K., Rucka M., Chróścielewski J., Jasina M., Malinowski M., Miśkiewicz M., Wilde M.: System ciągłej obserwacji stanu technicznego hali „Olivia" w Gdańsku, Inżynieria i Budownictwo, 10/2009
4. Wilde K.: Zautomatyzowane systemy monitoringu technicznego dachów stalowych, Wydaw. Politech. Świętokrzyskiej, 56 Konferencja Naukowa Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN oraz Komitetu Nauki PZITB, Kielce-Krynica, 2010, s. 729-736.
5. Giżejowski M., Wilde K., Uziak J., Wierzbicki S.: On a necessity of monitoring systems for sustainable development of mechanical and civil engineering infrastructure. Botswana Journal of Technology, vol. 19 (2), 2011, pp. 9-20.
6. Kowalewski J., Sulik P.: Wiarygodność i skuteczność monitoringu bezpieczeństwa konstrukcji budowalnych, XI Konferencja Naukowo-Techniczna Problemy Rzeczoznawstwa Budowalnego, Warszawa-Miedzyszyn, 2010, s. 263-271.
7. Kowalewski J.: Krytycznie o monitoringu bezpieczeństwa konstrukcji budowalnych, Problemy Przygotowania i Realizacji Inwestyczji Budowalnych, Puławy, 2010.
8. Świdziński W., Świerczewski W. and Janicki K., Rozbudowa obiektu Hydrotechnicznego oparta na metodzie obserwacyjnej na przykładzie składowiska Żelazny Most. Bezpieczeństwo zapór – bezpieczeństwo ludności i środowiska, Monografie Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej, s. 98-112. 2009
9. Selerski S., Chmielewska I., Automatyczne systemy technicznej kontroli zapór (ASTKZ) Dębe, Włocławek i Wióry- podobieństwa i różnice. Bezpieczeństwo zapór – bezpieczeństwo ludności i środowiska, Monografie Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej, s. 98-112. 2009.
10. Wilde K., Chróścielewski J., Miśkiewicz M., Rucka M., Diagnostyka i monitoring nowego przekrycia opery leśnej w sopocie, Awarie Budowalne 2013.
11. Stadion Narodowy. Założenia systemu monitorowania bezpieczeństwa stalowej konstrukcji stadionu wraz z wytycznymi realizacji, Politechnika Warszawska, 30.06.2010 r.
12. Dokumentacja techniczna Stadionu w Gdańsku Letnicy udostępniona na potrzeby procedur przetargowych, 2008
13. Dokumentacja techniczna hali Centrum Turystyczno-Sportowego „Aqua-Zdrój" w Wałbrzychu udostępniona na potrzeby procedur przetargowych, 2010
14. Dokumentacja techniczna hali Widowiskowo-Sportowej „Czyżyny" w Krakowie udostępniona na potrzeby procedur przetargowych, 2009.

Podziękowania

Autor artykułu pragnie serdecznie podziękować prof. Jackowi Chróścielewskiemu, dr Mikołajowi Miśkiewiczowi, dr hab. Magdalenie Ruckiej, prof. Pawłowi Kłosowskiemu, Michałowi Groth, mgr Michałowi Wilde, dr Markowi Jasinie, Tomaszowi Rutkowskiemu, prof. Waldemarowi Kamińskiemu, dr. Jakubowi Szulwicowi, dr. Arturowi Janowskiemu, dr Łukasz Pyrzowskiemu, za nieoceniony wkład w realizację przedstawionych prac.