

System monitorowania mostu w Puławach

prof. dr hab. inż. Jan Biliszczuk,
mgr inż. Wojciech Barcik,
Politechnika Wrocławska
dr inż. Rafał Sienko,
Politechnika Krakowska

Postęp w dziedzinie projektowania konstrukcji budowlanych, coraz większe wymagania stawiane współczesnym obiektom mostowym w zakresie ich obciążeń i trwałości czy wreszcie naturalne dążenie człowieka do poszukiwania nowatorskich rozwiązań powodują, że projektowane współcześnie mosty posiadają coraz większe rozpiętości, są bardziej skomplikowane geometrycznie i złożone konstrukcyjnie.

Projektowanie obiektów nietypowych oraz założenia upraszczające przyjmowane w modelach teoretycznych powodują, że analizy obliczeniowe z oczywistych względów tylko w pewnym stopniu odwzorowują sposób pracy konstrukcji obiektu w warunkach eksploatacji (1). Pomimo ciągłego rozwoju technik obliczeniowych, stosowania skomplikowanych modeli przestrzennych (z nieliniowymi elementami powierzchniowymi i bryłowymi), wciąż jeszcze rozwiązania teoretyczne są tylko przybliżeniem rzeczywistej pracy konstrukcji. Obciążenia przyjmowane na podstawie wytycznych normowych są także tylko pewnym modelem rzeczywistych oddziaływań.

Jedną z budzących duże nadzieje metod weryfikacji sposobu pracy obiektów mostowych jest zainstalowanie na wybranych elementach konstrukcji czujników, realizujących ciągły pomiar różnych (wybranych) wielkości fizycznych: począwszy od odkształceń tych elementów, a na określaniu wartości oddziaływań kończąc – możliwości są tutaj ogromne.

Systemy monitorujące pracę konstrukcji obiektów mostowych wdrażane są na świecie od kilkunastu lat. Praktycznie wszystkie ważne i duże mosty wyposażone są obecnie w różnego typu systemy, których zadaniem jest prowadzenie ciągłego pomiaru wybranych wielkości fizycznych. Najwięcej tego typu realizacji odnotowano na Dalekim Wschodzie oraz w Stanach Zjednoczonych. W Polsce systemy monitorowania pracy konstrukcji dopiero są rozwijane. Wynika to w dużej mierze z faktu, że do niedawna nie budowaliśmy obiektów o większych rozpiętościach czy niestandardowej konstrukcji. Mimo to udało się wyposażyć w różnego typu systemy monitorowania kilka obiektów: most Solidarności w Płocku (2), most Wandy w Krakowie, most Sucharskiego w Gdańsku (3) oraz most przez rz. Wisłę w Puławach. Niestety, nie wszystkie te systemy działają poprawnie do chwili obecnej.

Konstrukcja mostu w Puławach

W ubiegłym roku został oddany do użytkowania nowy most przez rzekę Wisłę w Puławach (4). Całkowita długość przeprawy wynosi 1038,2 m, a wynosząca 212,0 m rozpiętość głównego łukowego przęsła nurtowego jest największą wśród łukowych mostów w Polsce (fot. 1). Obiekt został zaprojektowany jako konstrukcja ciągła, czternastoprzęsłowa, o rozpiętościach przęseł $44,0 + 3 \times 56,0 + 6 \times 64,0 + 80,0 + 212,0 + 80,0 + 44,0 = 1012,0$ m. Przęsło główne podwieszono do stalowych łuków nośnych za pomocą 28 zespołów wieszaków prętowych. Dźwigary łukowe podparte zostały na filarach 12,0 m poniżej poziomu jezdni, natomiast wzniesienie łuku w środku jego rozpiętości ponad jezdnią wynosi 24,0 m. Konstrukcję pomostu zaprojektowano jako zespoloną stalowo-betonową. Dźwigary podłużne wykonano w postaci czterech blachownic o stałej wysokości wynoszącej 3,0 m zgrupowanych w dwa tandemy po dwie



Fot. 1. Widok przęsła łukowego mostu od strony ul. Dęblińskiej

blachownice w rozstawie 2,5 m przy rozstawie osiowym tandemów 12,5 m. Blachownice połączone na długości układem poprzecznic o stałym rozstawie 4,0 m. Na konstrukcji stalowej ułożono żelbetonową płytę pomostową zespoloną zarówno z belkami głównymi, jak i poprzecznicami o średniej grubości 0,27 m.

Wieszaki w przęśle łukowym zaprojektowano z prętów o średnicy 81 mm. Rozstaw wieszaków wynosi 12,0 m, a ich długości – od 3,5 m do 24,0 m. Pręty kotwione są do konstrukcji za pomocą uchwytów widelcowych. Każdy z wieszaków składa się z czterech prętów, zamocowanych przegubowo do wsporników poprzecznic oraz środków dźwigarów skrzynkowych łuku.

Dźwigary łukowe mają przekrój skrzynkowy równoległoboczny o wysokości od ok. 2 m w kluczu do ok. 3 m w węzłowiach i stałej szerokości 2,5 m (w płaszczyźnie pasa górnego). Grubości zastosowanych blach wynoszą od 16 mm do 72 mm. Skrzynki łuków zostały wzmocnione poprzecznie i podłużnie przeponami oraz żebrami podłużnymi. Wewnątrz łuków zostały wykonane stalowe schody umożliwiające prowadzenie inspekcji mostu. Dźwigary łukowe połączone ze sobą wiatrownicami o przekroju zamkniętym.

Monitoring mostu

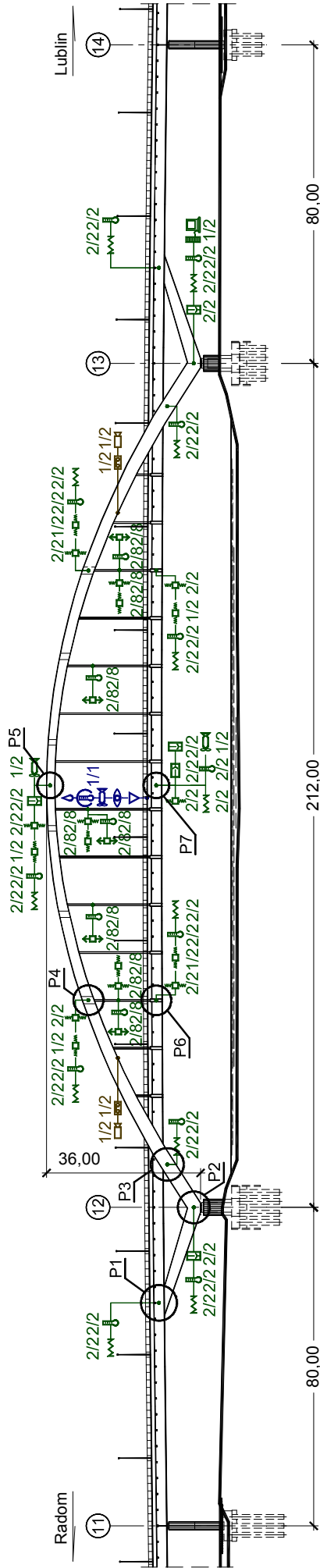
Duża rozpiętość oraz złożona konstrukcja przęsła nurtowego mostu – szczególnie podatnego na wpływy termiczne – skłoniła nadzór naukowy budowy oraz inwestora do zaprojektowania i wykonania systemu monitorowania mostu. Zdecydowano się na wdrożenie systemu realizującego pomiary różnych wielkości fizycznych w sposób kompleksowy. Z tego powodu system monitorowania składa się z trzech podsystemów:

- monitoringu konstrukcji,
- monitoringu meteorologicznego,
- monitoringu wizyjnego.

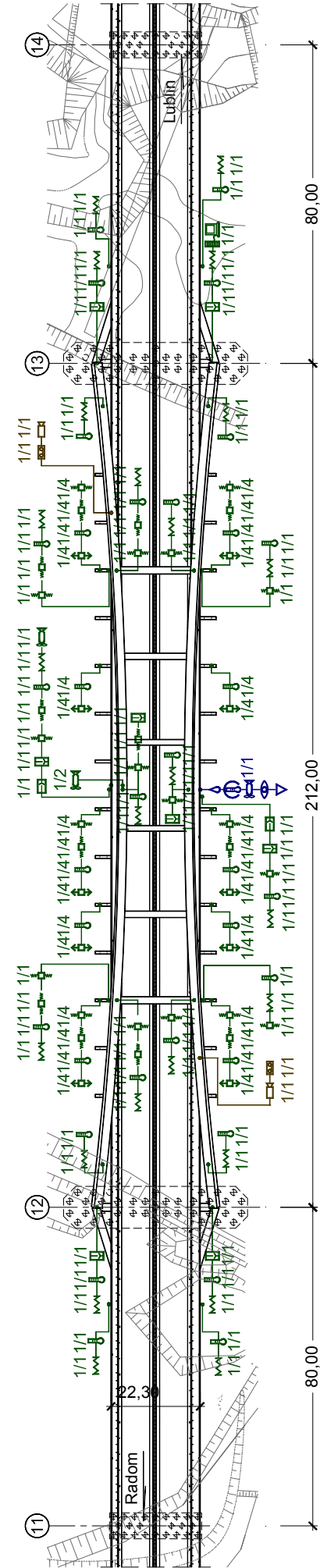
Informacje z podsystemów zbierane są przez serwer lokalny zlokalizowany na moście i przesyłane do Centrum Gromadzenia Danych w oddziale GDDKiA w Lublinie. Komunikacja z użytkownikiem mostu zapewniona została przez zastosowanie znaków zmiennej treści, na których wyświetlane są – w zależności od warunków meteorologicznych – odpowiednie komunikaty oraz znaki zakazu i ostrzegawcze.

LOKALIZACJA ELEMENTÓW SYSTEMU:

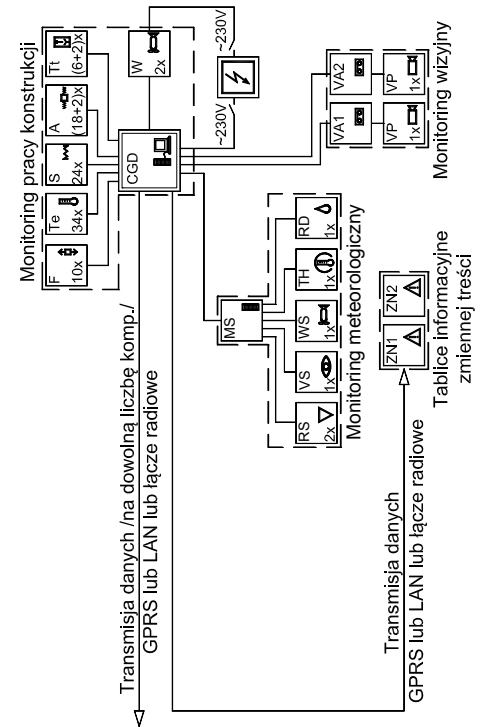
Widok z boku przęsła głównego



Widok z góry przęsła głównego



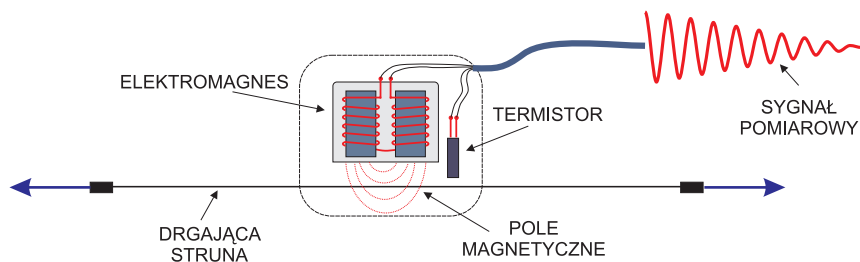
SCHEMAT SYSTEMU:



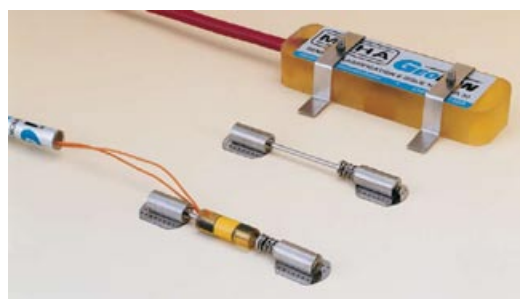
LEGENDA:

- F - punkt pomiaru siły w wieszakach (10 szt.)
- Tt - punkt pomiaru przemieszczeń kątowych (6 szt. 1-kierunek, 2 szt. 2-kierunki)
- An - punkt pomiaru prędkości i kierunku wiatru (2 szt.)
- Te - punkt pomiaru temperatury konstrukcji (34 szt.) /możliwe zintegrowanie z czujnikami do pomiaru innych wielkości fizycznych/
- S - punkt pomiaru odkształceń (24 punkty)
- A - punkt pomiaru przyspieszenia (6 szt. 1-kanalowych, 12 szt. 2-kanalowe)
- CGD - moduł gromadzenia i przesyłu danych (1 szt.)
- RD - czujnik do pomiaru opadu atmosferycznego (1 szt.)
- TH - termohigrometr (1 szt.)
- An - czujnik do pomiaru prędkości i kierunku wiatru (1 szt.)
- VS - czujnik do pomiaru widoczności (1 szt.)
- RS - czujnik drogowy (2 szt.)
- MS - stacja pogodowa (1 szt.)
- VP - punkt dozoru wizyjnego (2 kamer)
- VA - moduł akwizycji obrazu (2 szt.)
- EN - przyłącze energetyczne
- ZN - znaki zmiennej treści (2 szt.)

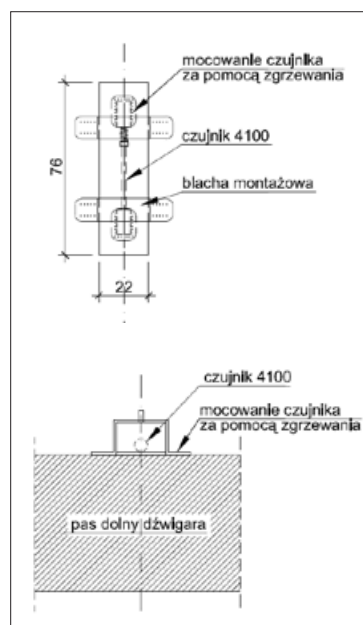
Rys. 1. Lokalizacja punktów pozyskiwania danych (5)



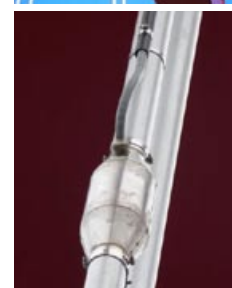
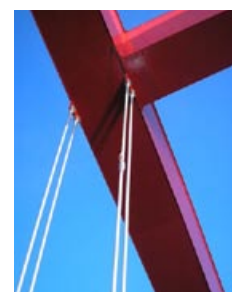
Rys. 2. Zasada działania czujnika strunowego



Fot. 2. Czujnik do pomiaru odkształceń konstrukcji



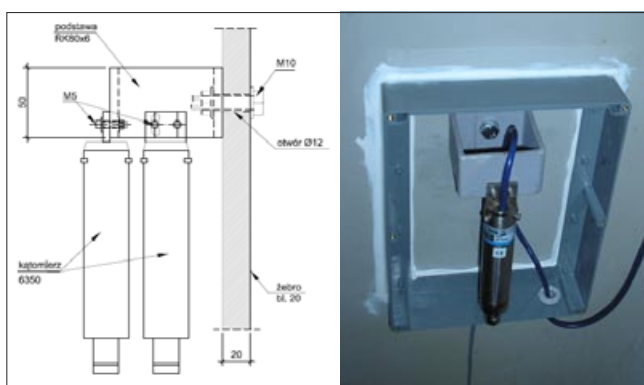
Rys. 3. Projekt montażu czujnika do pomiaru odkształceń konstrukcji



Fot. 3. Widok jednego z wieszaków, na którym zamontowano czujniki odkształceń i drgań (po osłonięciu obudową ze stali nierdzewnej)



Fot. 4. Widok czujnika drgań przed i po zamontowaniu hermetycznej obudowy



Rys. 4. Fragment projektu montażu kątomierza oraz widok zamontowanego czujnika



Fot. 5. Widok wnętrza serwera lokalnego zlokalizowanego na moście

- Zaprojektowany system monitoringu mostu, ze wskazaniem lokalizacji i liczby punktów pozyskiwania danych, pokazano na rys. 1 na str. 13 (5).

Monitoring konstrukcji

Zadaniem systemu stałego monitoringu konstrukcji jest kontrola pracy mostu poprzez ciągły elektroniczny pomiar zmian (przyrostów) wybranych wielkości fizycznych związanych z pracą statyczno-dynamiczną konstrukcji obiektu w wytypowanych na podstawie analiz obliczeniowych punktach pomiarowych. W przypadku mostu w Puławach dokonywany jest pomiar odkształceń, przechyłów i przyspieszeń oraz temperatury, prędkości i kierunku wiatru. Zadaniem systemu jest wspomaganie ekspertów w określaniu rzeczywistego stanu statyczno- i dynamiczno-wytrzymałościowego monitorowanych elementów konstrukcji w trakcie normalnego użytkowania obiektu, przejazdów pojazdów ponadnormatywnych, silnych porywów wiatru, a także różnych sytuacji wyjątkowych, np. uszkodzenia wieszaków w wyniku kolizji drogowej. Wykonany system składa się z wymienionych w tabeli 1 czujników.

Wybór punktów, w których powinny zostać zainstalowane czujniki, oraz przyjęcie wielkości fizycznych, które powinny być rejestrowane, poprzedzone było szczegółowymi analizami statycznymi i dynamicznymi, uwzględniającymi różnego rodzaju alternatywne schematy geometryczne oraz obciążenia. Szczególną uwagę zwrócono na oddziaływanie o charakterze wyjątkowym (6) oraz wpływ niestacjonarnego pola temperatury powietrza zewnętrznego. System monitoringu musi zapewniać pomiar wszystkich wielkości fizycznych przez cały okres eksploatacji mostu.

Zatem wszystkie zainstalowane czujniki powinny charakteryzować się przynajmniej kilkudziesięcioletnim okresem trwałości. Ten warunek, przy jednocześnie stosunkowo niskim koszcie jednostkowym, spełniają czujniki strunowe. Badania prowadzone w Polsce oraz na świecie nad stabilnością pomiarów wykonywanych przy wykorzystaniu tego typu czujników trwają już ponad 30 lat. Hermetyczna obudowa oraz częstotliwościowy sygnał umożliwiający przesyłanie danych przy wykorzystaniu przewodów elektrycznych na odległość ponad 5000 m predestynują czujniki strunowe do zastosowania w systemach długotrwałego monitoringu konstrukcji. Na rys. 2 pokazano zasadę działania czujnika strunowego.

Wykorzystując prawo fizyczne, zgodnie z którym (w uproszczeniu) zmiana napięcia struny powoduje zmianę częstotliwości jej drgań, za pomocą czujników strunowych można prowadzić pomiary różnego rodzaju wielkości fizycznych (7).

Na fot. 2 pokazano czujnik do pomiaru zmian odkształceń konstrukcji, a na rys. 3 – projekt montażu tego czujnika. Sumarycznie na moście zainstalowano 68 czujników odkształceń o bazie pomiarowej 50 mm i zakresie pomiarowym $3000 \mu\epsilon$ ($1 \mu\epsilon = 1 \times 10^{-6}$). Każdy punkt pomiarowy obsługiwany jest przez dwa czujniki odkształceń i dwa czujniki temperatury. Przyjęcie zasady dublowania pomiarów podyktowane zostało dążeniem do jak największej wiarygodności danych pozyskiwanych z systemu monitoringu. Czujniki odkształceń wykorzystywane są do wyznaczenia naprężeń w elementach stalowych konstrukcji oraz sił w wieszakach. Na prętach podwieszających czujniki zostały zainstalowane w taki sposób, aby możliwa była re-

Lp.	Czujnik	Funkcja	Wygląd czujnika	Liczba czujników
1.	Czujniki strunowe odkształceń, zintegrowane z czujnikami temperatury	Pomiar odkształceń (siły) i temperatury w wieszakach		10 punktów pomiarowych 2 x 10 cz. temperatury 2 x 10 cz. odkształceń
2.	Czujniki strunowe odkształceń, zintegrowane z czujnikami temperatury	Pomiar odkształceń konstrukcji i temperatury konstrukcji		24 punkty pomiarowe 2 x 24 cz. temperatury 2 x 24 cz. odkształceń
3.	Inklinometry zintegrowane z czujnikami temperatury	Pomiar przemieszczeń kątowych konstrukcji i temperatury konstrukcji		8 punktów pomiarowych 6 czujników kąta jednokierunkowych 2 czujniki kąta dwukierunkowe 10 cz. temperatury
4.	Akcelerometry 1D (jednokanałowe)	Pomiar przyspieszenia elementów konstrukcji w jednym kierunku		6 punktów pomiarowych 6 czujników
5.	Akcelerometry 2D (jednokanałowe)	Pomiar przyspieszenia elementów konstrukcji w dwóch kierunkach		6 punktów pomiarowych 12 czujników
6.	Akcelerometry 2D (dwukanałowe)	Pomiar przyspieszenia wieszaków w dwóch kierunkach		6 punktów pomiarowych 12 czujników
7.	Czujnik do pomiaru prędkości i kierunku wiatru nad i pod konstrukcją	Pomiar prędkości i kierunku wiatru		2 punkty pomiarowe 2 czujniki

Tabela 1. Charakterystyka składników systemu monitoringu konstrukcji

jestracja wpływu ewentualnych momentów zginających wynikających z widelcowego zamocowania wieszaków do wsporników pomostu.

Na fot. 3 pokazano jeden z prętów podwieszających, na którym zainstalowano czujniki. Pod obudową ze stali nierdzewnej znajdują się także dwa akcelerometry do pomiaru drgań. Łącznie opomiarowano dziesięć wieszaków. W celu określenia zmian przechyłów konstrukcji mostu zainstalowano w wybranych ośmiu punktach inklinometry strunowe o bardzo wysokiej dokładności pomiaru. Przy ich pomocy możliwa jest rejestracja zmiany kąta o wartości ± 10 sekund kątowych (0,5 mm/1000 mm).

Na rys. 4 pokazano fragment projektu montażu zestawu kątomierzy do pomiaru zmian kąta w dwóch prostopadłych płaszczyznach, zaś na fot. 4 widok zamontowanego już jednego z czujników.

Konstrukcja mostu została wyposażona również w 18 czujników drgań zamontowanych na różnych elementach

obiektu. Ich zadaniem jest określenie odpowiedzi konstrukcji na przykładane do niej obciążenia o charakterze dynamicznym oraz identyfikacja postaci drgań własnych i towarzyszących im częstości w celu umożliwienia prowadzenia tzw. doświadczalnej analizy modalnej.

Na fot. 4 pokazano widok zamontowanego czujnika na konstrukcji przed i po założeniu hermetycznej obudowy. W celu określania wartości obciążenia wiatrem zainstalowano nad i pod obiektem dwa anemometry do pomiaru prędkości i kierunku przepływu powietrza. Dane z wszystkich czujników odczytywane są jednocześnie w interwałach od 10 sekund do 60 minut i przesyłane do zlokalizowanego na moście wewnątrz jednego z łuków serwera lokalnego – fot. 5, gdzie oprogramowanie przetwarza sygnał i dokonuje jego wstępnej obróbki. Wszystkie komputery zlokalizowane na moście musiały spełniać bardzo wysokie wymagania stawiane jednostkom pracujących w ekstremalnych warunkach

► termiczno-wilgotnościowych. Temperatura powietrza w okresie letnim osiąga w łuku ponad 60°C, a zimą może spaść poniżej -30°C. Konieczne było zatem wyposażenie komputerów w czujniki temperatury, wilgotności, nagrzewnice oraz wentylatory o dużej wydajności pobierające powietrze z zewnątrz mostu. Sterowanie załączaniem koniecznego w danym momencie urządzenia odbywa się przy użyciu specjalnie napisanego w tym celu oprogramowania.

Serwer lokalny przesyła dane do Centrum Gromadzenia Danych, zlokalizowanego w tym przypadku w oddziale Generalnej Dyrekcji Dróg Krajowych i Autostrad w Lublinie. Tam dane pomiarowe są obrabiane i przetwarzane w taki sposób, by w czasie rzeczywistym wizualizować wyniki pomiarów w sposób pozwalający na ich interpretację bez konieczności dodatkowych obliczeń. Dowlolna liczba użytkowników może posiadać uprawnienia do logowania się poprzez internet w celu przeglądania danych, ich analiz oraz kopiowania danych. Administrator systemu posiada możliwość definiowania i likwidacji użytkowników, jak również definiowania ich uprawnień dostępu do Centrum Gromadzenia Danych. Na rys. 5 pokazano przykładowe okno dedykowanego dla mostu w Puławach programu komputerowego służącego do prezentacji wyników pracy systemu monitoringu konstrukcji. Możliwe jest także prezentowanie wyników na wykresach w dowolnych zestawieniach czasowych oraz w porównaniu z innymi wielkościami fizycznymi. Szczegółowe analizy teoretyczne mogą być prowadzone na danych pobranych bezpośrednio z plików tekstowych zapisanych w bazach danych.

Dla wszystkich wielkości fizycznych określono wartości progowe (minimalne i maksymalne), których przekroczenie oznacza zagrożenie bezpieczeństwa konstrukcji. W momencie gdy dla dowolnej wielkości pomiarowej zostanie zarejestrowana wartość przewyższająca zdefiniowany próg pomiarowy, uruchamiany jest tryb alarmowy, podczas którego komputer automatycznie wysyła informacje w postaci e-maili i komunikatów SMS do osób odpowiedzialnych za utrzymanie obiektu. Podczas normalnej pracy system monitoringu w zadanych odstępach czasowych dokonuje kontroli poprawności działania wszystkich elementów składowych systemu, gdyż tylko poprawne dane pomiarowe mogą służyć do oceny stanu bezpieczeństwa konstrukcji.

Monitoring meteorologiczny

Zadaniem systemu monitoringu meteorologicznego jest zaopatrywanie Centrum Gromadzenia Danych w ostrzeżenia i alarmy meteorologiczne oraz dane pomiarowe, opisujące stan nawierzchni i jej otoczenia, ze szczególnym uwzględnieniem monitorowania obecności i stężenia chemikaliów odladzających oraz parametrów fizycznych sprzyjających gołoledzi, na podstawie których można podejmować decyzje związane z poprawą warunków drogowych lub ograniczeniem niebezpieczeństwa w ruchu. Dane pozyskiwane są w miejscu najbardziej niekorzystnym pod względem pogodowym, tj. bezpośrednio

nad korytem rzeki w środku rozpiętości przęsła łukowego. Elementami pomiarowymi są czujniki zainstalowane w nawierzchni jezdni oraz na maszcie pomiarowym. Zainstalowany system zawiera następujące elementy:

- czujnik do pomiaru temperatury i wilgotności powietrza (1 szt.),
- czujnik do pomiaru prędkości i kierunku wiatru (1 szt.),
- czujniki do pomiaru widoczności i opadu atmosferycznego ze zdolnością rozróżnienia rodzaju opadu (deszcz, śnieg, śnieg z deszczem, mgła) (1 zestaw),
- czujnik drogowy do pomiaru między innymi temperatury nawierzchni, jej stanu z możliwością rozróżnienia nawierzchni suchej, wilgotnej lub mokrej, pokrytej szronem, błotem pośniegowym lub lodem, ze zdolnością detekcji chemicznych substancji odladzających (2 szt.),
- stacji meteorologicznej z modulem do przewodowego przesyłania danych (1 szt.).

System zapewnia stały pomiar mierzonych parametrów w interwałach od 1 min do 30 min.

Monitoring wizyjny

Zadaniem systemu monitoringu wizyjnego jest przesyłanie do Centrum Gromadzenia Danych obrazu z kamer zainstalowanych nad przęsłem nurtowym mostu. Monitoring wizyjny pozwala na zwiększenie zakresu dozoru ruchu drogowego, obserwację warunków pogodowych oraz identyfikację kolizji i zatorów drogowych, a także czynników wandalistycznych itp.

Zaproponowany system składa się z:

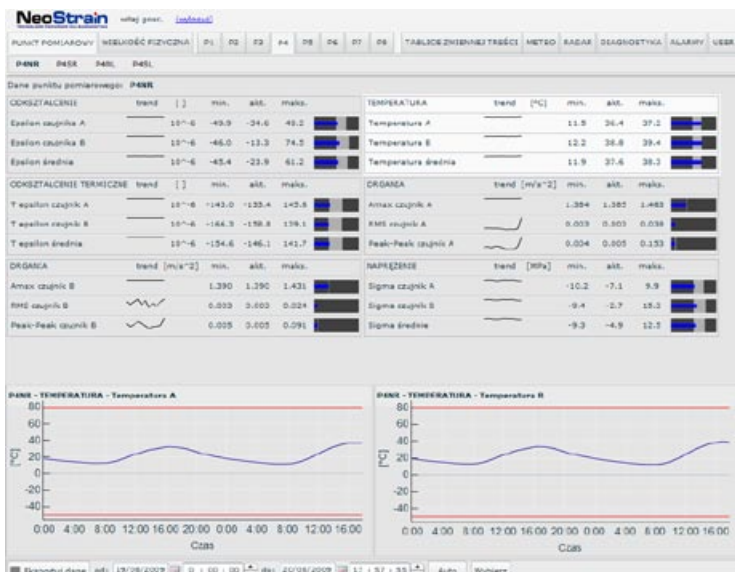
- wizyjnych kamer dualnych o wysokiej rozdzielczości i zmiennej ogniskowej, pozwalających na prowadzenie obserwacji jezdni w dzień i w nocy w przęsle głównym mostu (2 szt.),
- modułów akwizycji obrazu, których celem jest przetwarzanie i kompresja obrazu wizyjnego oraz komunikacja z Centrum Gromadzenia Danych.

Znaki zmiennej treści

Znaki zmiennej treści zostały umieszczone na konstrukcjach bramowych rozpiętych nad obydwojma jezdniami przed wjazdem na most. Tablice umożliwiają wyświetlanie sekwencji znaków z grupy znaków ostrzegawczych i zakazu. Służą do komunikacji systemu monitoringu z użytkownikiem drogi. Poszczególne sekwencje znaków wyświetlane są automatycznie na podstawie wyników pomiarów realizowanych przez system meteorologiczny, przy czym możliwe jest również ręczne sterowanie wyświetlanymi znakami na podstawie obrazów przesyłanych do Centrum Gromadzenia Danych przez system monitoringu wizyjnego. Na rys. 6 pokazano przykładowe okno dialogowe programu komputerowego służące do sterowania wyświetlaniem znaków.

Zastosowanie systemów monitoringu

System monitoringu projektowany jest indywidualnie dla każdego obiektu. Uwzględniane są uwarunkowania



Rys. 5. Przykładowe okno dialogowe systemu monitoringu konstrukcji



Rys. 6. Przykładowe okno dialogowe służące do zarządzania znakami zmiennej treści. Widoczne są dane pochodzące ze stacji meteorologicznej oraz podgląd obrazu z kamer

Zamawiający	GDDKiA oddział w Lublinie
Koncepcja systemu monitoringu	Zakład Mostów Politechniki Wrocławskiej
Projekt wykonawczy	NeoStrain Sp. z o.o. przy współpracy Zakładu Mostów Politechniki Wrocławskiej NeoStrain Sp. z o.o.
Wykonawca	NeoStrain Sp. z o.o.

Tabela 2. Uczestnicy procesu

konstrukcyjne, ekonomiczne oraz szczegółowe wymagania inwestora. System pomiarowy powinien odznaczać się bardzo dużą trwałością (powyżej 30 lat), pomijalnym wpływem czasu na rejestrowane przez czujniki wartości (brak relaksacji i pełzania czujników oraz kleju), możliwością wykonania instalacji obejmującej cały obiekt mostowy o dużych wymiarach, jak najmniejszą stratą sygnału pomiarowego na skutek różnych zakłóceń oraz możliwością rozbudowy systemu po jego oddaniu do użytkowania.

Koszt systemu pomiarowego jest stosunkowo nieduży, a biorąc pod uwagę bardzo szybki rozwój technologii informatycznych i inżynierii pomiarowej, zapewne będziemy obserwowali jego spadek. Obecnie cena systemu kształtuje się na poziomie od ok. 0,3% do ok. 1,5% wartości inwestycji (mostu). Eksploatacja systemu monitorowania również nie stanowi istotnego obciążenia finansowego dla zarządcy, gdyż obejmuje przede wszystkim opłatę abonamentową za korzystanie z bezprzewodowej lub przewodowej transmisji danych. W związku z tym, że zastosowana aparatura pomiarowa charakteryzuje się małą awaryjnością; podczas normalnego użytkowania systemu konieczne są wyłącznie okresowe przeglądy sprawności układu pomiarowego.

Zalety monitorowania konstrukcji

Najważniejszą zaletą systemów monitorowania konstrukcji jest realny wzrost bezpieczeństwa nadzorowanych obiektów mostowych dzięki ciągłej analizie wpływu oddziaływań komunikacyjnych oraz warunków środowiskowych na poszczególne elementy konstrukcji. Mierzone wielkości pomiarowe pozwalają na zweryfikowanie założeń i modeli przyjętych na etapie projektowania obiektu mostowego oraz określenie wyężenia poszczególnych jego elementów. Ciągła rejestracja wyników pomiarów umożliwia kontrolowanie sposobu pracy konstrukcji w czasie pod wpływem zmieniających się obciążeń (wywołanych m.in. pojazdami, tłumem ludzi czy wiatrem). Systemy tego typu wspomagają także

ekspertów w określaniu postępu procesu degradacji stanu technicznego konstrukcji rozumianego jako zaniżanie jej nośności, a także umożliwiają prognozowanie trwałości obiektu.

Zainstalowanie systemu pomiarowego na elementach konstrukcji podczas jej wznoszenia jest najkorzystniejsze z punktu widzenia późniejszego wykorzystania rejestrowanych danych. Jeżeli pomiar poszczególnych wielkości fizycznych będzie uwzględniał również ciężar własny elementów oraz zmieniające się w trakcie wznoszenia obiektu inne obciążenia związane między innymi z procesem budowy, będzie możliwe określenie wyężenia poszczególnych elementów konstrukcji na podstawie zmierzonych wielkości (w szczególności odkształceń).

Podsumowanie

Opisany w artykule system monitoringu zainstalowany na moście przez Wisłę w Puławach jest największym systemem pomiarowym w Polsce i jednym z największych w Europie. Doświadczenia zbierane z analizy wyników pomiarów, realizowanych przede wszystkim przez podsystem odpowiedzialny za monitoring konstrukcji, będą mogły być uwzględniane przy projektowaniu kolejnych obiektów o podobnej konstrukcji. Określenie wpływu temperatury, wiatru czy obciążeń wyjątkowych na pracę rzeczywistego obiektu jest nie do przecenienia. Pomiar będą umożliwiał również obserwację degradacji stanu technicznego konstrukcji w funkcji upływającego czasu, co będzie wspomagać zarządcę obiektu w planowaniu jego remontów.

Obserwując rozwój systemów monitorowania konstrukcji w świecie, należy sądzić, że wszystkie obiekty mostowe rzetelnie projektowane i wznoszone w Polsce będą wyposażane w czujniki do stałej kontroli pracy ich elementów. Obiektami, które powinny być w szczególności nadzorowane przez systemy pomiarowe, są mosty podwieszane i wiszące oraz kładki dla pieszych. Te ostatnie, ze względu na swoją małą masę, są szczególnie podatne na oddziaływanie dynamiczne pochodzące od tłumy ludzi. Zastosowanie systemu monitorowania może być w tym przypadku połączone ze sterowaniem aktywnymi tłumikami drgań. □

Piśmiennictwo

1. Żółtowski K.: *Współczesne możliwości analizy statycznej i dynamicznej mostów stalowych. Mosty stalowe. Projektowanie, technologie budowy, utrzymanie.* Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław 2008.
2. Biliszczuk J., Hildebrand M., Barcik W., Hawryszuk P.: *System obserwacji ciągłej mostu podwieszzonego przez Wisłę w Płocku.* „Inżynieria i Budownictwo”, nr 7-8/2006.
3. Żółtowski K., Malinowski M., Hildebrand M.: *Monitoring mostów podwieszonych.* „Mosty”, nr 3/2009.
4. Grej K., Bąk J., Sałach W., Oleksiak C.: *Projekt nowego mostu drogowego przez Wisłę w Puławach.* „Inżynieria i Budownictwo”, nr 1-2/2008.
5. Biliszczuk J., Barcik W., Toczkiwicz R.: *Projekt techniczny systemu monitoringu elektrodynamicznego konstrukcji mostu przez Wisłę w Puławach.* Instytut Inżynierii Lądowej Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, październik 2008.
6. Bliszczuk J., Machelski Cz., Gluch G.: *Symulacje skutków pożaru samochodów ciężarowych na moście łukowym w Puławach.* Instytut Inżynierii Lądowej Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, marzec 2008.
7. Sieńko R.: *Systemy monitorowania obiektów mostowych.* „Materiały Budowlane”, nr 4/2008.