

ROZPROSZONY SYSTEM MONITOROWANIA MOSTÓW

Tadeusz UHL¹, Stefan BERCZYŃSKI², Artur HANC³, Łukasz SĘKIEWICZ¹,
Akademia Górniczo-Hutnicza¹, Politechnika Szczecińska², Energocontrol sp. z o.o.³
e-mail: lsekiewicz@energocontrol.pl

Streszczenie

W pracy przedstawiono opis systemu monitorowania mostu. Zaproponowany system jest oparty na sieci bezprzewodowych czujników przyspieszenia. Czujniki przekazują w trybie on-line dane do lokalnych stacji zbierania i przetwarzania danych. Do oceny stanu mostu zaimplementowano metody oparte na modelu modalnym. Prototyp systemu zainstalowano na moście stalowym w Krakowie.

Słowa kluczowe: systemy monitorowania, badanie stanu konstrukcji, detekcja i lokalizacja uszkodzeń.

DISTRIBUTED SYSTEM OF BRIDGES MONITORING

Abstract

The paper presents new design of bridge monitoring system. The system is based on wireless accelerometers solution and local communication station joint with signal processing unit. The diagnostics of bridge health is proposed to assess based on on-line modal model estimation. The system is installed on steel bridge in Krakow.

Keywords: monitoring system, examining of construction state, detection and localization of damages.

1. WSTĘP

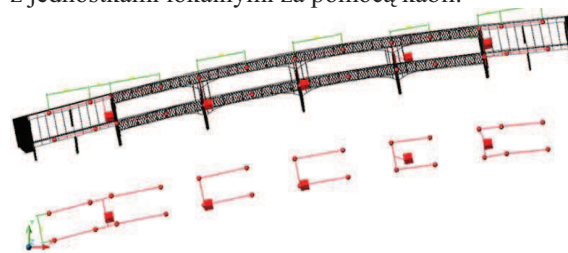
Na obszarze Polski zlokalizowane są 183 duże obiekty mostowe o długości większej od 200 m. W tej liczbie znajduje się 91 dużych obiektów mostowych biegnących przez wielkie rzeki takie jak: Wisła, Odra, Bug, Warta, Narew, Dunajec, San, Pilica, Soła. W Europie 80% mostów to konstrukcje małe, lub średniej wielkości. Większość mostów to konstrukcje ponad 30-letnie (zwłaszcza mosty kolejowe). Z upływem czasu stan mostów oraz ich właściwości eksploatacyjne pogarszają się. Tymczasem ilość samochodów oraz natężenie ruchu wzrasta. Doprowadziło to do sytuacji, zarówno w Polsce jak i w Europie, w której wydatki na utrzymanie istniejących konstrukcji są większe niż nakłady finansowe na budowę nowych przepraw.

Ze względu na stale zwiększające się natężenie ruchu pojazdów samochodowych oraz coraz większe prędkości, jakie rozwijają pojazdy szynowe zachodzi konieczność, na bieżąco, oceny stanu konstrukcji mostów, z których większość została wybudowana przy innych założeniach, co do intensywności ich eksploatacji. Konieczność monitorowania tego typu konstrukcji wynika z wymogów zapewnienia bezpieczeństwa eksploatacji jak również z nacisków na obniżenie kosztów eksploatacji tych obiektów. Obniżenie kosztów jest możliwe w przypadku wczesnego wykrycia powstającego uszkodzenia i naprawie już we wstępnej jego fazie.

2. PRZEGLĄD ISTNIEJĄCYCH SYSTEMÓW MONITOROWANIA STANU MOSTÓW

Systemy monitorowania mostów są już powszechnie stosowane w krajach wysokorozwiniętych [1,2,3]. Postęp technologiczny w zakresie informatyki

i elektroniki pozwala na budowę systemów monitorowania o architekturze modułowej, przez to elastycznej i taniej. Pierwsze systemy monitorowania charakteryzowały się niską możliwością adaptacji do różnych konstrukcji mostów oraz wysokim kosztem. Wysokie koszty były spowodowane przez stosowanie drogich, klasycznych czujników pomiarowych oraz ich oprzyrządowania: kondycjonerów sygnału i okablowania. Przykładem opisywanej architektury systemu monitorowania mostu, jest system monitorowania przeprawy Oresund łączącej Danię ze Szwecją. Koszt systemu wyniósł 2 000 000 Euro. System korzysta z 55 czujników drgań, odkształceń, wilgotności i temperatury połączonych z jednostkami lokalnymi za pomocą kabli.



Rys1. Schemat okablowania mostu Wandy w Krakowie

Wraz z rozwojem technologicznym, w szczególności w zakresie informatyki i telekomunikacji, powstają bardziej nowoczesne rozwiązania systemów monitorowania mostów. System zaprojektowany na uniwersytecie Stanford w Palo Alto zbudowany jest z niezależnych modułów pomiarowych przesyłających dane do jednostki centralnej za pomocą komunikacji bezprzewodowej. Cechą takich modułów jest niski koszt produkcji bazujący na ogólnodostępnych elementach elektronicznych. System WiMMS

(Wireless Modular Monitoring System) został zaprezentowany na konferencji *Advances in Structural Engineering and Mechanics (ASEM'02)*, w Pusan, Korea, w roku 2002. W konstrukcji modułu jest brak zaimplementowanego czujnika pomiarowego, co powoduje konieczność stosowania drogiego i trudnego w eksploatacji czujnika zewnętrznego. Moduły mogą natomiast współpracować z każdym dostępnym na rynku czujnikiem. W module zaimplementowano 16 bitowy przetwornik analogowo-cyfrowy, dwa mikroprocesory odpowiedzialne za przetworzenie i skompresowanie danych pomiarowych, oraz modem pracujący w paśmie 2,4 GHz, przesyłający dane do centrum monitorowania.

Wraz z rozpowszechnieniem czujników przyspieszeń w technologii MEMS (Mikro Elektro Mechanical Systems), powstały systemy działające na podobnej zasadzie co WiMMS. Cechą charakteryzującą nowe konstrukcje jest niższy pobór mocy i pełna autonomiczność - wbudowany czujnik pomiarowy oraz źródło napięcia, co wpłynęło również na obniżenie kosztów systemu.

Obecnie na uniwersytecie Kalifornia w Irvine (UCI) prowadzone są testy systemu modułowego w którym komunikacja pomiędzy modułami pomiarowymi, a jednostką lokalną są realizowane poprzez sieć optyczną. Jednostka lokalna przesyła zgromadzone dane do jednostki centralnej za pomocą Internetu bezprzewodowego. W centrum pomiarowym do walidacji i wizualizacji danych wykorzystywana jest sieć neuronowa. Zaletą sieci neuronowej w tym zastosowaniu jest możliwość uczenia co umożliwia korektę wyników w razie uszkodzenia lub rozkalibrowania któregoś z czujników. Źródłem zasilania dla modułów pomiarowych jest często energia wiatru i słońca. System jest obecnie testowany na moście w ciągu autostrady w Orange County, California.

3. ZAŁOŻENIA DLA BUDOWY PROTOTYPOWEGO SYSTEMU

Przeznaczeniem systemu monitorowania mostu jest śledzenie parametrów monitorowanej konstrukcji mostu w czasie eksploatacji. System został zaprojektowany jako konstrukcja modułowa tak, aby umożliwić łatwą adaptację układu dla różnych konstrukcji. Efekt ten uzyskano dzięki zaprojektowaniu autonomicznych, niskomocowych modułów pomiarowych. Moduły pomiarowe są rozmieszczone na całej konstrukcji mostu. Wyniki pomiarów są przetwarzane według zaimplementowanych algorytmów. Następnie kompresowane oraz przesyłane drogą bezprzewodową do jednostki centralnej systemu. Jednostka centralna synchronizuje dane pochodzące z modułów pomiarowych. Zadaniem jednostki centralnej jest również gromadzenie danych oraz ich przesyłanie do centrum diagnostycznego. Na podstawie wyników pomiarów wyznaczone są parametry dynamiczne i statyczne konstrukcji, w szczególności identyfikowany jest jej model modalny.

Rozmieszczenie elementów pomiarowych systemu w obrębie całej konstrukcji pozwala na określenie jej stanu. Autonomiczne moduły realizują pomiary odkształceń, drgań (przyspieszenia lub przemieszczenia), temperatury. Ponadto rolą modułu pomiarowego jest przetwarzanie danych do postaci cyfrowej, przeprowadzanie obliczeń związanych z algorytmami identyfikacji modeli, kompresja danych oraz transmisja danych do jednostki centralnej. W rozwiązaniu zaproponowano bezprzewodowy przesył danych w oparciu o sieć czujników [4].

Zastosowana metoda komunikacji bezprzewodowej pozwala na znaczna poprawę funkcjonalności oraz zmniejszenie kosztu implementacji systemu (brak okablowania). W celu zapewnienia niskomocowości wykorzystano elementy elektroniczne o niskim poborze mocy, oraz konstrukcje które umożliwiają przejście systemu w stan uspienia. Cały system jest przystosowany do pracy w szerokim zakresie temperatur: od -40 do 80° C.

4. ARCHITEKTURA PROTOTYPOWEGO SYSTEMU MONITOROWANIA MOSTU

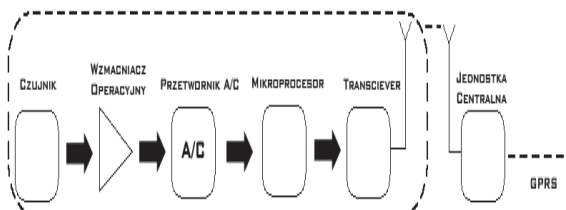
Podstawowy elementem systemu jest moduł pomiarowy. Cechą modułu jest możliwość przyłączenia wielu czujników zarówno cyfrowych jak i analogowych. Rozmieszczenie czujników jest uzależnione od konkretnego obiektu pomiarowego, projekt implementacji i konfiguracji systemu jest zawsze indywidualnym rozwiązaniem. Mierzone dane są wzmacniane i (w przypadku pomiarów analogowych) przetwarzane do postaci cyfrowej.

Dane pomiarowe w postaci cyfrowej przekazywane są do mikroprocesora, gdzie są przetwarzane zgodnie z zaimplementowaną formułą obliczeniową, bazującą na metodach analizy modalnej. Zaletą tego rozwiązania jest rzetelne przetworzenie pomiarów już na początku toru pomiarowego, co pozwala na uniknięcie strat w ich jakości i zmniejszenie rozmiaru zbiorów danych przesyłanych wewnątrz systemu. W celu zapewnienia wysokiej jakości i szybkości obróbki danych, w każdym module pomiarowym zainstalowano 16 bitowy procesor przystosowany do pracy w niskomocowych systemach pomiarowych. Układ charakteryzuje się dużym rozmiarem pamięci, co pozwoliło uniknąć dodatkowego modułu pamięci montowanej w module pomiarowym. Rezultatem jest redukcja poboru mocy jak również redukcja masy i objętości modułu. Mikrokontroler przeprowadza również bezstratną kompresję przetworzonych danych. Tak przygotowane wyniki przekazywane są do transceivera odpowiedzialnego za komunikację modułu pomiarowego z jednostką centralną. Za komunikację odpowiada nowoczesny zintegrowany nadajnik/odbiornik (transceiver) danych cyfrowych. Moduł pracuje z programowaną mocą nadajnika do 10dBm, co pozwala na przesyłanie danych na odległość do 250 metrów. Typowe parametry dla pracy transceivera to:

- Pobór prądu w trybie pracy jako odbiornik 7,4/9,6mA.
- Regulowany programowo pobór prądu w trybie nadawania od 5,3mA do 26,7mA.
- Napięcie zasilania w zakresie od 2,1V do 3,6V.

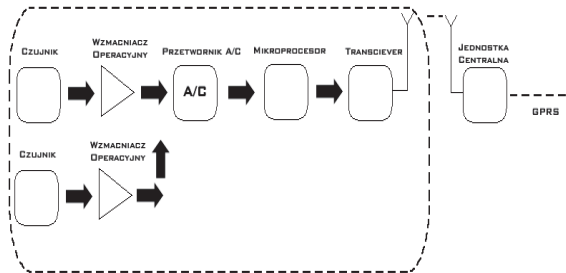
Do pomiaru drgań wykorzystano akcelerometr jednoosiowy, charakteryzujący się wysoką czułością (750 mV/g), szerokim zakresem pomiarowym oraz niskomocowością. Wybrane dane elementów z których zbudowano moduły pomiarowe zestawiono w tabeli 1.

MODUŁ POMIAROWY Z JEDNYM CZUJNIKIEM POMIAROWYM (ANALOGOWYM)



Rys 2. Schemat modułu pomiarowego z jednym czujnikiem analogowym

MODUŁ POMIAROWY Z DWOMA CZUJNIKAMI POMIAROWYMI (ANALOGOWYMI)



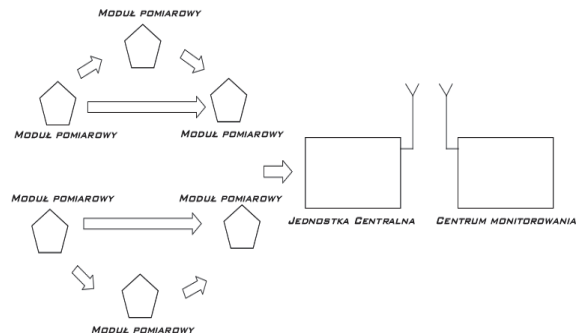
Rys 3. Schemat modułu pomiarowego z dwoma czujnikami analogowymi

Czujnik przyspieszeń wykonany jest w technologii MEMS (Integrated Micro Electromechanical Systems) co pozwoliło na zamknięcie całości modułu pomiarowego w zwartej obudowie.

Dane pomiarowe z modułów przekazywane są do jednostki centralnej. Rolę jednostki centralnej pełni w systemie komputer przemysłowy. Takie rozwiązanie zabezpiecza wystarczającą moc obliczeniową przy zachowanej niskomocowości oraz umożliwia zastosowanie praktycznie każdej metody komunikacji bezprzewodowej.

Jednostka centralna przekazuje zgromadzone dane do centrum monitorowania poprzez standard komunikacji GPRS.

Ciągły monitoring pozwala na szybką reakcję w razie niebezpieczeństwa dla użytkowników mostu, pozwala szybko i skutecznie wykryć miejsce awarii. Komponenty zastosowane do budowy systemu są przystosowane do pracy przy niskim napięciu zasilania (średnio 3-5 V). Moduły pomiarowe są przewidziane do pracy z zasilaniem z sieci elektrycznej, jak również do zasilania z baterii.



Rys. 4. Schemat systemu monitorowania mostu

W przypadku zasilania z sieci elektrycznej, niskomocowość nie ma tak wielkiego znaczenia, jak dla przypadku, gdy moduł zasilany jest z baterii. Jednak dostępność sieci w pobliżu mostu jest ograniczona. Bateria zasilająca moduł powinna być przystosowana do pracy w szerokim zakresie temperatur, oraz odpornością na częste doładowywanie/rozładowywanie. Rozmieszczenie modułów na całej konstrukcji mostu uniemożliwia łatwą wymianę baterii. W przypadku zapewnienia efektywnego źródła zasilania system monitorowania mostu jest systemem bezobsługowym.

Moduły są przystosowane do pracy z zasilaniem hybrydowym, czyli kombinacją baterii i źródła energii odnawialnej (ogniwa słonecznego lub turbiny wiatrowej).

Cykl pracy systemu jest cyklem przerywanym, tzn. monitoring jest prowadzony w określonych porach i w określonym czasie (największego natężenia ruchu). Dzięki takiemu rozwiązaniu uzyskuje się kolejne oszczędności w zużyciu energii elektrycznej. Możliwe jest uaktywnienie systemu na skutek przekroczenia pewnego, określonego poziomu drgań.

Tabela.1. Typowe parametry elektryczne elementów modułu pomiarowego

Nazwa	Średni pobór prądu	Średnie napięcie zasilania
Mikroprocesor	330µA	3 V
Transceiver	N/A	3 V
Przetwornik A/D	75 µA	3 V
Wzmacniacz operacyjny	25 µA	3 V
Akcelerometr	2,1 mA	5V

5. ANALIZA MODALNA KONSTRUKCJI MOSTU STALOWEGO

W praktyce coraz częściej stosuje się systemu monitorowania mostu w oparciu o pomiar drgań [5] Analiza modalna jest praktyczną techniką badania własności dynamicznych obiektów mechanicznych. Wynikiem analizy modalnej jest model modalny w postaci zbioru częstotliwości własnych, postaci drgań oraz współczynników tłumienia. Znajomość tych parametrów pozwala na przewidywanie zachowania się obiektu na skutek dowolnych wymuszeń stosując metodę superpozycji modalnej. Analizę modalną stosuje się w celu modyfikacji obiektu, diagnostyki stanu konstrukcji [7], weryfikacji i dostrajania modeli numerycznych, do syntezy układów sterowania oraz diagnostyki

maszyn opartej o śledzenie zmian parametrów modeli wraz ze zmianą stanu badanego obiektu. Analiza modalna ma zastosowanie do diagnostyki takich konstrukcji jak mosty, samoloty, turbiny, fundamenty. Szczególnie szybki rozwój zastosowania tych metod do diagnostyki nastąpił, gdy powstały nowe metody badań modalnych oparte na eksperymencie biernym. Eksperyment bierny polega na pomiarze odpowiedzi układu (przyspieszeń) na wymuszenia eksploatacyjne [6]. Analiza modalna jest realizowana dla obiektów liniowych o stałych parametrach, dla których spełniona jest zasada wzajemności Maxwella. Większość konstrukcji mostowych w otoczeniu warunków pracy może być traktowana jako liniowa i można do jej badania zastosować metodę badań modalnych. W większości praktycznych zastosowań wymagany jest wielokanałowy eksperyment i złożone obliczenia związane z przetwarzaniem zmierzonych sygnałów i estymacją parametrów modelu. Przydatność metod analizy modalnej jest przedmiotem wielu prac np. [6, 7]. Jak wynika z prezentowanych tam rezultatów metody oparte na śledzeniu postaci drgań są o wiele skuteczniejsze niż metody oparte jedynie na obserwacji zmian częstości własnych i współczynników tłumienia. W celu określenia podstawowych własności dynamicznych konstrukcji tj. częstotliwości i postaci drgań oraz odpowiadających im współczynników tłumienia, przeprowadzono badania konstrukcji mostu Wandy w Krakowie. Badania stanowiły podstawę specyfikacji systemu monitoringu w zakresie estymacji wielkości opisujących właściwości dynamiczne dla mostów stalowych. Eksploatacyjna analiza modalna [6] została przeprowadzona w okresie zimowym i letnim, ze względu na możliwy wpływ temperatury na wyniki pomiarów.

Wyniki pomiarów przedstawiają się następująco:

Tabela 2. Wyniki pomiarów dla mostu Wandy w Krakowie (sesja zimowa)

Lp.	Częstotliwość drgań własnych [Hz]	Współczynnik tłumienia [%]
1	1,72	3,12
2	1,87	2,55
3	2,24	2,05
4	2,7	3,31
5	3,13	1,84
6	3,56	1,9
7	5,43	2,4
8	9,28	0,71

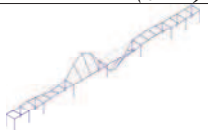
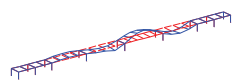
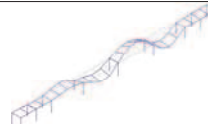
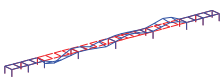
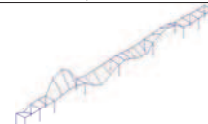
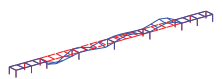
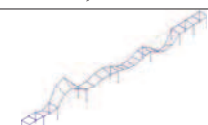
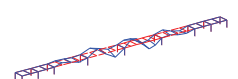
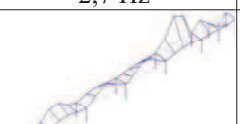
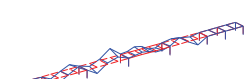
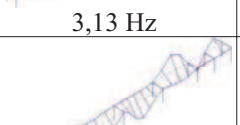

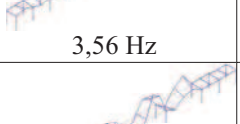
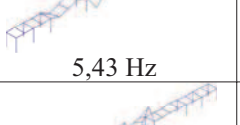
Tabela 3. Wyniki pomiarów dla mostu Wandy w Krakowie (sesja letnia)

Lp.	Częstotliwość drgań własnych [Hz]	Współczynnik tłumienia [%]
1	1.8343	4.7740
2	2.6515	4.0442
3	3.1151	2.9192
4	5.3185	3.1775
5	5.9101	3.4017
6	9.6600	2.3125

Jak można zauważyć z przedstawionych wyników eksperymentu, badana konstrukcja mostowa pod względem dynamicznym zachowuje się różnie w lecie (temperatura mostu wynosiła 25°C) i w zimie (temperatura mostu wynosiła -10°C). W szczególności obserwuje się usztywnienie mostu w zimie oraz zmniejszenie wartości współczynników tłumienia.

Otrzymane postacie drgań zestawiono w tabeli 4.

Tabela 4. Postacie drgań mostu Wandy

Lp.	Most Wandy w Krakowie (zima)	Most Wandy w Krakowie (lato)
1	 1,72 Hz	 1,843 Hz
2	 1,87 Hz	 2,6515 Hz
3	 2,24 Hz	 1151 Hz
4	 2,7 Hz	 5,3185 Hz
5	 3,13 Hz	 5.9101 Hz
6	 3,56 Hz	 9.6600 Hz
7	 5,43 Hz	
8	 9,28 Hz	

Wyniki pomiarów ukazują występowanie dominujących drgań o niskich częstotliwościach. Drgania mają charakter drgań giętnych, skrętnych oraz giętno-skrętnych. Stosunkowo duży jest współczynnik tłumienia, co utrudnia badania drgań

tego typu konstrukcji. Porównanie postaci drgań dla sesji letniej i zimowej wykorzystując współczynnik MAC przedstawiono w tabeli 5.

Tabela 5. Wartości współczynnika MAC dla postaci uzyskanych w czasie pomiarów zima i latem

ZIMA [Hz]	1.72	1.87	2.24	.70	3.14	3.26	5.43	9.29
LATO [Hz]	Współczynnik MAC							
1.83	0.28	0.94	0.01	0.01	0.01	0.20	0.02	0.01
2.65	0.01	0.02	0.18	0.89	0.01	0.04	0.00	0.00
3.11	0.01	0.02	0.01	0.01	0.50	0.24	0.00	0.01
5.32	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.94	0.01
5.91	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00
9.66	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01
11.3	0.00	0.21	0.03	0.03	0.19	0.28	0.01	0.01
13.2	0.01	0.02	0.01	0.12	0.40	0.13	0.01	0.01

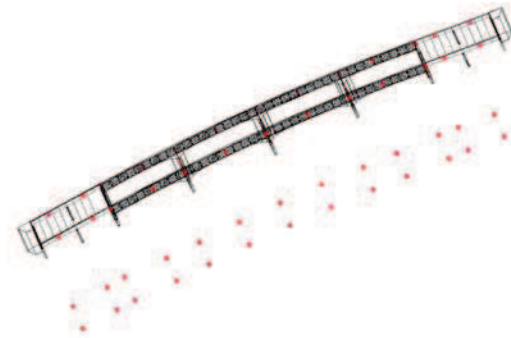
Jak widać z przedstawionego zestawienia podobieństwo wykazują tylko trzy ze zidentyfikowanych postaci drgań mostu. Postacie te przyjęto do oceny stanu konstrukcji mostu, uznając, że na ich przebieg najmniejszy wpływ ma temperatura mostu.

Uzyskane wyniki posłużyły do doboru czujników pomiarowych, punktów ich mocowania oraz systemu przetwarzania sygnałów.

6. ZAIMPLEMENTOWANA PROCEDURA ANALIZY DANYCH POMIAROWYCH

Identyfikacja parametrów modelu modalnego dla monitorowanego mostu, oparta jest pomiarach przyspieszenia drgań w wybranych punktach konstrukcji przy wymuszeniach eksploatacyjnych. Jednym z najważniejszych problemów do rozwiązania w zbudowanym systemie monitoringu jest synchronizacja sygnałów mierzonych w rozproszonym układzie czujników bezprzewodowych. Uzyskano to poprzez wysyłanie do poszczególnych stacji pomiarowych sygnału synchronizującego. Dla estymacji parametrów modalnych konstrukcji pomiary muszą być prowadzone w odpowiednio wybranych punktach konstrukcji. Istotny wpływ na jakość wyników ma liczba tych punktów. Wymagania co do zakresu częstotliwości w badaniach diagnostycznych mostu zakładają, że śledzone mają być zmiany w postaciach drgań aż do piątej postaci drgań. że punkty pomiarowe powinny znajdować się w połowie rozpiętości przęsła, minimalna ilość punktów pomiarowych potrzebnych do rzetelnego odwzorowania parametrów konstrukcji to pięć punktów po każdej stronie mostu. Dodatkowo

moduły można umieścić nad podporami, co pozwoli na jeszcze dokładniejszą analizę.



Rys 5. Optymalne rozmieszczenie modułów pomiarowych na moście Wandy w Krakowie

Procedura przetwarzania danych pomiarowych w systemie składa się z trzech etapów. Pierwszy etap to wstępne przetwarzania danych pomiarowych poprzez ich odpowiednią filtrację i usunięcie trendów wolnozmiennych. Na podstawie przygotowanych danych pomiarowych wyznaczane są wartości progowe do celów redukcji modelu modalnego przyjętą metodą zbilansowanej realizacji (BR) [8].

Metoda BR jest metodą wykorzystującą model stochastyczny układu zdefiniowany w przestrzeni stanu [6]:

$$\begin{cases} \{x_{k+1}\} = [A]\{x_k\} + \{w_k\} \\ \{y_k\} = [C]\{x_k\} + \{v_k\} \end{cases} \quad (1)$$

gdzie: $[A]$: macierz stanu, $[C]$: macierz wyjścia, $\{x\}$: wektor stanu, $\{y\}$: wektor odpowiedzi układu, $\{w\}$: wektor szumu spowodowanego zakłóceniami procesu oraz niedokładnościami modelowania [8], $\{v\}$: wektor szumu pomiarowego wynikającego z ograniczonej czułości czujników pomiarowych [8].

Algorytm metody składa się z kilku podstawowych kroków:

1. Przekształcenia danych pomiarowych w funkcje korelacji wyznaczone względem grupy wybranych przebiegów wyjściowych $\{y_m\}_{ref}$, które traktowane są jako przebiegi odniesienia.
2. Utworzenia macierzy Hankela dla badanego układu:

$$[H_k]_{pq} = \begin{bmatrix} [R_k] & [R_{k+1}] & \dots & [R_{k+q-1}] \\ [R_{k+1}] & [R_{k+2}] & \dots & [R_{k+q}] \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ [R_{k+p-1}] & [R_{k+p}] & \dots & [R_{k+p+q-2}] \end{bmatrix} \quad (2)$$

gdzie: $[R_k] = E[\{y_{k+m}\} \{y_m\}_{ref}^T]$: wyznaczone macierze korelacji.

3. Rozkładu macierzy Hankela na wartości szczególne, przy założeniu, że $k=1$, na podstawie zależności:

$$[N_1][H_1]_{pq}[N_2] = \begin{bmatrix} [U_1] & [U_2] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [S_1] & [0] \\ [0] & [S_2] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [V_1]^T \\ [V_2]^T \end{bmatrix} = [U_1][S_1][V_1]^T, \quad k=1 \quad (3)$$

$$\text{gdzie: } [H_1]_{pq} = \begin{bmatrix} [R_1] & [R_2] & \dots & [R_q] \\ [R_2] & [R_3] & \dots & [R_{q+1}] \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ [R_p] & [R_{p+1}] & \dots & [R_{p+q-1}] \end{bmatrix};$$

$$[S_1] = \begin{bmatrix} s_1 & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & s_n \end{bmatrix}; [S_2] = \begin{bmatrix} s_1^2 & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & s_n^2 \end{bmatrix};$$

macierze wartości szczególnych ($s_1 \geq \dots \geq s_n \geq 0$, $s_1^2 \geq \dots \geq s_n^2 \approx 0$), $[U_1]$, $[V_1]$: macierze wektorów szczególnych, $[N_1]$, $[N_2]$ – macierze wagowe.

4. Wyrażenia macierzy $[H_1]_{pq}$ w zależności od macierzy obserwowalności $[O]_p$ oraz macierzy sterowalności $[W]_q$:

$$[H_1]_{pq} = [O]_p [W]_q \quad (4)$$

$$\text{gdzie: } [O]_p = \begin{bmatrix} [C] \\ [C][A] \\ \vdots \\ [C][A]^{p-1} \end{bmatrix},$$

$$[W]_q = \begin{bmatrix} [G] & [A][G] & \dots & [A]^{q-1}[G] \end{bmatrix},$$

$[G] = E\{x_{k+1}\{y_k\}^T\}$: macierz kowariancji.

5. Wyznaczenia macierzy obserwowalności $[O]_p$ jako:

$$[O]_p = [N_1]^{-1} [U_1] [S_1]^{-\frac{1}{2}} \quad (5)$$

6. Wyznaczenia macierzy $[C]$ jako pierwszego bloku danych macierzy $[O]_p$.

7. Wyznaczenia macierzy $[A]$ poprzez rozwiązanie równania macierzowego:

$$[O]_{p-1}^S = [O]_{p-1} [A] \quad (6)$$

8. Wyznaczenia macierzy fundamentalnej $[e^{\lambda t}]$ oraz macierzy modalnej $[\Phi]$ (której kolumny są wektorami modalnymi) poprzez dokonanie rozkładu macierzy $[A]$ na wartości własne:

$$[A] = [\Phi] [e^{\lambda t}] [\Phi]^{-1} \quad (7)$$

9. Wyznaczenia postaci drgań własnych $\{\Psi\}$ z zależności:

$$\{\Psi\}_r = [C] \{\Phi\}_r \quad (8)$$

Zapis modelu w przestrzeni stanu w postaci zbilansowanej polega na oszacowaniu udziału poszczególnych postaci drgań w odpowiedzi układu [6] na podstawie rozkładu macierzy obserwowalności i sterowalności na główne części składowe. Elementy leżące na diagonalach macierzy $[P]$ i $[Q]$ są sortowane malejąco. Elementy wektora stanu mające istotny wpływ na dynamiczne zachowanie się układu odpowiadają dużym wartościom diagonalnym macierzy $[P]$ i $[Q]$.

Redukcja modelu zbilansowanego polega na usuwaniu najmniej istotnych (ostatnich) elementów

wektora stanu. Procedurę tą zaimplementowano w opracowanym systemie.

6. WNIOSKI

Zaprojektowany system spełnia postawione przed nim wymagania. Uzyskano kompromis między niskomocowością, a wymaganą dokładnością pomiarów. Dzięki wykorzystaniu komunikacji bezprzewodowej transmisji danych, obniżono koszt implementacji systemu. Architektura pozwala na zastosowanie systemu w praktycznie każdej konstrukcji mostowej. Niewątpliwą zaletą systemu jest możliwa analiza konstrukcji w czasie rzeczywistym, co zapewnia bezpieczeństwo użytkownika oraz obniża koszty eksploatacji i konserwacji monitorowanej konstrukcji. System monitorowania mostów może również posłużyć jako baza do produkcji różnorodnych systemów monitorowania wykorzystujących analizę modalną do określenia stanu monitorowanego obiektu.

LITERATURA

- [1] Sustainable Bridges – Assessment for Future Traffic Demands and Longer Lives: Integrated Project in the Sixth Framework Programme on Research, Technological Development and Demonstration, FP6-PLT-001653, <http://www.sustainablebridges.net>
- [2] Sustainable Bridges – Assessment for Future Traffic Demands and Longer Lives: Integrated Project in the Sixth Framework Programme on Research, Technological Development and Demonstration, Carryer, C. R. FP6-PLT-001653, <http://www.sustainablebridges.net>
- [3] Lynch, J. P., K. H. Law, A. S. Kiremidjian, E. Farrar, H. Sohn, D. Allen, B. Nadler and J. Wait. 2002. "Laboratory and Field Validation of a Wireless Sensing Unit Design for Structural Monitoring," *Proceedings of US-Korea Workshop on Smart Structural Systems*, Pusan, Korea, August 24-25, 2002.
- [4] Hill, J., Szewczyk, R., Woo, A., Hollar, S., Culler, D., and Pister, K. "System Architecture Directions for Networked Sensors", *Proceedings of the ACM Conference on Architectural Support for Programming Languages and Operating Systems*, 2000.
- [5] S. W. Doebling, C. R. Farrar, M. B. Prime, and D. W. Shevitz, "Damage identification and health monitoring of structural and mechanical systems from changes in their vibration characteristics: a literature review," *Los Alamos National Laboratory Report, LA-13070-MS*, May 1996.
- [6] Uhl T., Lisowski W., Kurowski P.: *In-operation Modal Analysis and Its Applications*, Katedra Robotyki i Dynamiki Maszyn, AGH, Kraków 2001.
- [7] T. Uhl, The use and challenge of modal analysis in diagnostics, *Diagnostyka*, 2004 r. vol 30 t.2 str. 151-160.
- [8] J. Iwaniec, *Metody poprawiania jakości estymacji parametrów modalnych konstrukcji*, Praca Doktorska, AGH, 2005.