

W ramach realizowanego przez miesięcznik „Builder” programu „Wspieramy młodych inżynierów budownictwa” dajemy możliwość pierwszych publikacji naukowych młodym doktorantom.



**Anna Kaczmarczyk, Lidia Komorowska
Ewa Kozicka**
Wydział Inżynierii Lądowej,
Politechnika Warszawska



**Opiekun naukowy:
dr inż. Maciej Cwyl**
Instytut Inżynierii Budowlanej
Politechnika Warszawska

Celem stosowania systemów monitoringu konstrukcji jest zwiększenie bezpieczeństwa użytkowania obiektu. Awarie najczęściej nie są spowodowane przez jeden, ale przez wiele czynników, które można wyeliminować już na etapie projektu czy wykonywania konstrukcji.

Z raportów GUNB

Z raportów o katastrofach budowlanych zebranych w latach 1997–2016 wynika, że zdecydowana większość katastrof budowlanych miała miejsce w taktce użytkowania obiektów. Do przyczyn awarii tych obiektów zalicza się zdarzenia losowe, czyli np.: powódzie, intensywne opady atmosferyczne czy silne wiatry, oraz zjawiska związane z działalnością człowieka, takie jak wybuchy gazu czy pożary. [1] Ponadto, pomimo znacznego postępu technologii i dostępu do coraz lepszych programów obliczeniowych, w ostat-

Systemy monitoringu znacząco ułatwiają dbanie o bezpieczeństwo konstrukcji oraz ludzi z niej korzystających, ostrzegają przed awarią, a odpowiednio wczesna reakcja może nawet zapobiec zniszczeniu bądź uszkodzeniu konstrukcji.

MONITORING

w obiektach wielkopowierzchniowych

Obecnie istnieje wiele systemów monitoringu wpływających na zapewnienie i kontrolę bezpiecznego użytkowania obiektów wielkopowierzchniowych. Rozważaniom poddano system oparty na technice laserowego pomiaru ugięcia.

niej dekadzie można zauważyć wzrost ilości katastrof w porównaniu do lat poprzednich. Wśród czynników mających wpływ na stan statystyk można wyróżnić takie przyczyny, jak: pogarszający się stan techniczny obiektów budowlanych, częstsze występowanie anomalii pogodowych wykraczających poza ujęcia normowe, wyższy stopień skomplikowania kształtu konstrukcji oraz chęć budowania obiektów coraz wyższych. Ekonomiczne podejście do budownictwa nie pozwala na zakładanie ponadnormowych obciążeń, dlatego trzeba się liczyć z możliwością wystąpienia awarii. Jednak nadal dąży się do tego, aby do nich nie dochodziło.

Systemy monitoringu

Obecnie na rynku istnieje wiele systemów służących do monitorowania konstrukcji, których koszty montażu można by uznać za stosunkowo niskie, szczególnie w porównaniu z przewidywanymi stratami finansowymi wynikającymi z zaistniałej awarii. Należy jednak pamiętać, że ostateczną decyzję o zamontowaniu takiego systemu powinna poprzedzać analiza ryzyka, która wykazywałaby słuszność zastosowania systemu. Duże budynki, takie jak hale wystawowe, centra handlowe czy duże zakłady produkcyjne, powszechnie uznaje się za obiekty, w których monitoring jest uzasadniony i należy go stosować.

Odpowiednie wymogi w zakresie kontroli stanu technicznego obiektów można znaleźć w przepisach prawnych. Kluczowym zapisem prawnym jest ustawa z dnia 10 maja 2007 r. o zmianie ustawy Prawo budowlane

oraz niektórych innych ustaw, m.in. w art. 62 ust. 1, gdzie nakłada się na właściciela lub zarządcę budynku konieczność poddawania obiektu okresowej kontroli [2]. Obowiązek stałego monitoringu istotnych parametrów, takich jak przemieszczenia i odkształcenia, narzuca rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 marca 2009 r. Dotyczy ono budynków użyteczności publicznej z pomieszczeniami przeznaczonymi do przebywania znacznej liczby osób [3].

Obecne na rynku systemy monitoringu długookresowego umożliwiają pomiar takich wielkości, jak: ugięcia, pochylenia, drgania, temperatura czy wilgotność. W zależności od rodzaju systemu wykorzystywane są różne techniki pomiarowe, np.: laserowe, światłowodowe, ultradźwiękowe bądź strunowe, które zapewniają różny stopień dokładności otrzymanych wyników. Decyzja o wyborze parametrów konstrukcji, jakie mają zostać mierzone przez system, zależy od charakteru budowli i jego ustroju. Stosowanie takich systemów umożliwia eliminację pomiarów ręcznych oraz „czynnika ludzkiego” przy ocenie konieczności na przykład odśnieżania dachu. Dzięki temu optymalizujemy ten proces, co wiąże się z obniżeniem kosztów utrzymania obiektu, a przede wszystkim zwiększamy bezpieczeństwo i zapewniamy mniejszą awaryjność konstrukcji. W tabeli 1. zestawiono cechy kilku typów systemów, z których wybrano jeden i opisano go dokładniej w dalszej części artykułu.

W rozważaniach wzięto pod uwagę laserowy system monitoringu ugięć.

Laserowy system monitoringu

System WiSeNe® składa się z sieci bezprzewodowych czujników montowanych na elementach konstrukcji stalowej urządzenia retransmisyjnego (rys. 1c), transceivera (rys. 1e), centrali zbierającej i analizującej dane pobrane z czujników (rys. 1d) oraz aplikacji do odczytu danych przez użytkownika. Stosowane są dwa typy czujników: mierniki laserowe (rys. 1a i 1b) oraz inklinometry. Czujnik laserowy służy do pomiaru ugięć za pomocą promienia lasera wysyłanego w kierunku punktu stałego i zmierzenia czasu powrotu do nadajnika. Dzięki znanej prędkości rozchodzenia się fali obliczana jest odległość punktu pomiarowego od czujnika. Pomiar dokonywany jest w pionie, najczęściej do powierzchni posadzki. Ustawienie punktu odniesienia na posadzce wymaga uwzględnienia sytuacji, gdy punkt zostanie zasłonięty, np. przez przechodzącą osobę, lub zostanie on zastawiony. System wychwytuje tak duże i gwałtowne zmiany w odczycie, a następnie kwalifikuje je jako przeszkodę. Jeżeli przez kilka kolejnych pomiarów nie zostanie ona usunięta, system wysyła do użytkownika informację o konieczności usunięcia przeszkody. Elektronika czujnika jest zamknięta w szczelnej obudowie, którą podwiesza się do konstrukcji za pomocą specjalnego śrubowego uchwytu. Połączenie jest stabilizowane przez małe siłowniki, aby zapobiec swobodnemu bujaniu się czujnika.

W systemie wykorzystywane są przeważnie czujniki laserowe, ponieważ pomiar ugięć jest stosunkowo prosty w interpretacji i daje najszerszy pogląd na zachowanie się konstrukcji. W miejscach trudno dostępnych, gdzie nie ma możliwości pomiaru do punktu stałego, stosuje się inklinometry do pomiaru kąta wychylenia obiektu od pionu.

Pomiar wykonywany jest w równych odstępach czasu, których częstotliwość można ustalić indywidualnie w zależności od potrzeb użytkownika. W życiu konstrukcji występują sytuacje, dla których na krótki okres należałoby zwiększyć częstotliwość pomiaru. Przykładowo w okresie zimowym, gdy w wyniku dużych opadów śniegu w elementach zostały pomierzone większe wartości ugięć,

można zwiększyć częstotliwość pomiaru z 2 godzin do 10 sekund.

Dane z czujników są następnie przesyłane bezprzewodowo do transceivera połączonego z centralą umieszczoną w obiekcie. Jeżeli czujnik znajduje się w znacznej odległości od centrali, montowane są urządzenia retransmisyjne przechwytyjące sygnał z czujników. Centrala systemu jest połączona z siecią i poprzez nią wysyła informacje do aplikacji na telefonie lub komputerze. Po zalogowaniu się do aplikacji internetowej użytkownik ma podgląd na wizualizację obiektu z naniesionymi punktami pomiarowymi, dzięki czemu nie ma konieczności zaglądania do dokumentacji, aby zlokalizować miejsce pomiaru. Po wybraniu konkretnego czujnika dostaje się informację o przemieszczeniu lub kącie

obrotu wraz z 4-stopniową skalą porównawczą wyznaczoną na etapie analizy konstrukcji dla każdego punktu indywidualnie. Aplikacja umożliwia także wysyłanie powiadomień o zagrożeniu w przypadku, gdy zarejestrowane zostaną ugięcia przekraczające określony próg. Chcąc mieć pewność, że system działa poprawnie i zawsze można liczyć na jego niezawodność, należy pamiętać o regularnych przeglądach serwisowych – co najmniej raz w roku.

Case study

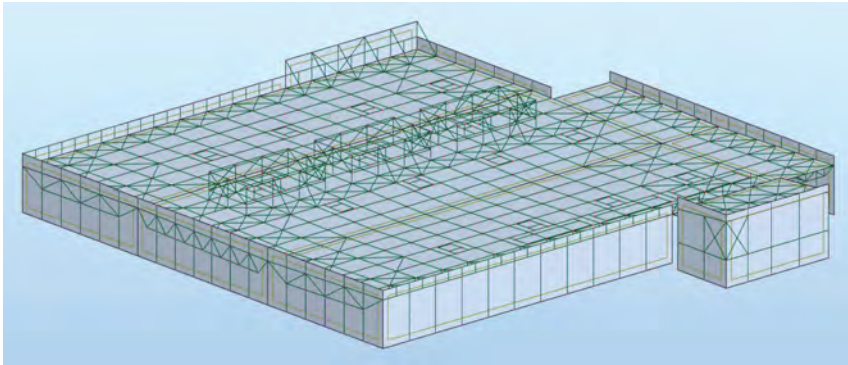
Jako przykład wykorzystania omawianego systemu monitoringu poddano rozwiązaniu konstrukcję hali o zadaszeniu stalowym i rozpiętości w osiach 73,0 x 74,6 m. Do konstrukcji przylega przybudówka, która



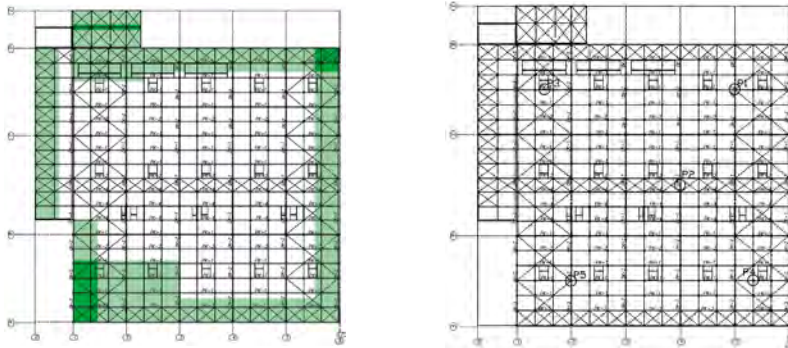
Rys. 1. Urządzenia systemu WiSeNe®: a) miernik laserowy – widok z góry; b) miernik laserowy – widok z dołu; c) urządzenie retransmisyjne; d) centrala; e) transceiver

Tabela 1. Zestawienie cech wybranych systemów monitoringu

	System laserowy	System światłowodowy	System strunowy
Dokładność pomiaru	±0,1 mm	±0,002 mm	±0,25-0,75 mm
Zastosowanie	Obiekty wielkopowierzchniowe, przemysłowe, magazynowe, logistyczne, handlowe	Rurociągi, mosty, tunele, zbiorniki, instalacje kanalizacyjne i energetyczne, budowle zabytkowe	Mosty, drogi, wielkogabarytowe konstrukcje betonowe
Mierzone wielkości	Ugięcia i przemieszczenia kątowe	Deformacje, temperatura, przemieszczenia, osiadanie, drgania, stopień sprężenia	Odształcenia, naprężenia, temperatura, prędkość i kierunek wiatru, drgania, siły, wychylenia kątowe
Zakres stosowania	Powyżej -20°C, możliwość stosowania w warunkach wilgotnych, o dużym zapyleniu i w obecności czynników korozyjnych, dla obiektów na niestabilnym podłożu	Nie zależy od warunków środowiska	-20°C ÷ 80°C
Sposób montażu na elementach konstrukcyjnych	Przykręcanie	Zgrzewanie punktowe, przykręcanie, przyklejanie, zalewanie w betonie, wklejanie w otworach	Przyklejanie, przegrzewanie, przyspawanie, wklejanie za pomocą kotew, zabetonowanie



Rys. 2. Model przestrzenny hali stalowej



Rys. 3. a) lokalizacja zasp śnieżnych; b) lokalizacja czujników opisanych od P1 do P5

Obowiązek stałego monitoringu istotnych parametrów, takich jak przemieszczenia i odkształcenia, narzuca rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 marca 2009 r. Dotyczy ono budynków użyteczności publicznej z pomieszczeniami przeznaczonymi do przebywania znacznej liczby osób.

jest oddylatowana od hali głównej o 0,15 m. W skład zadania stalowego wchodzi dźwigary kratowe opierające się na słupach żelbetowych, płatwie kratowe opierające się na dźwigarach, stężenia połączeniowe, stężenia dachowe pionowe (wzdłuż obiektu, prostopadle do połaci), podkonstrukcje pod reklamy i żaluzje oraz dodatkowe elementy świetlików dachowych.

W modelu (rys. 2.) uwzględnione zostały obciążenia stałe i zmienne. Na obciążenie stałe składał się ciężar konstrukcji, który został uwzględniony automatycznie w programie Autodesk Robot Structural Analysis 2003, oraz obciążenie stałe od poszycia dachowego i urządzeń technologicznych. W obciążeniach zmiennych zawierają się: obciążenia użytkowe, które dopuszczają jedynie przypadek wejścia na dach ekip remontowych; obciążenia poziome od wiatru dla dachu płaskiego oraz obciążenia od śniegu dachu wielopołaciowego dla hali, a w przypadku przybudówki – dachu dwupołaciowego. Ze względu na występowanie attyk w modelu uwzględniono również zaspę śnieżną, której lokalizację zaznaczono na rys. 3a.

Aby otrzymać wiarygodne wyniki przemieszczeń węzłów, należy zachować wysoki poziom szczegółowości modelu. Wzięto pod uwagę takie aspekty, jak: odpowiednie zaklasyfikowanie węzłów, prawidłowe określenie pracy stężeń oraz właściwy sposób podparcia konstrukcji. Słupy żelbetowe zostały zamodelowane jako podpory przegubowo nieprzesuwne.

W celu zlokalizowania miejsc montażu czujników (rys. 3b) na elementach konstrukcyjnych wyznaczono punkty pomiarowe na podstawie otrzymanych wyników przemieszczeń pionowych. W tych miejscach stwierdzono również największe wyężenie elementów konstrukcji. Na potrzeby systemu na początku określa się wartości przemieszczeń od obciążeń stałych, a następnie od najbardziej niekorzystnej kombinacji z uwzględnieniem obciążeń zmiennych. Tak otrzymane wartości wyznaczają amplitudę bezwzględnych przemieszczeń, w której urządzenie będzie sygnalizowało stopień wyężenia. W podanym zakresie wyróżnia się cztery progi pomiarowe: 30%, 50%, 70% i 100% amplitudy, gdzie 100% odpowiada

wyężeniu elementu na poziomie 80–90%. Dodatkowo wyznacza się dopuszczalną odchyłkę położenia czujnika, w której zakresie otrzymane wyniki będą miarodajne. Ma to na celu możliwość ewentualnego ominięcia przeszkód znajdujących się pomiędzy czujnikiem a stałym punktem odniesienia. Warto w tym miejscu wspomnieć, że głównym obciążeniem zmiennym, od którego zależały wybrane miejsca usytuowania czujników, jest obciążenie śniegiem.

Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonej analizy przykładowych rodzajów systemów monitoringu można zauważyć, że na rynku obecny jest szeroki wybór rozwiązań, które różnią się sposobem pomiaru szukanych wielkości, rodzajem mierzonych wielkości i dokładnością. W zależności od potrzeb właścicieli obiektów oraz ich użytkowników istnieje możliwość wyboru najbardziej odpowiedniego z dostępnych systemów monitoringu. Przeprowadzając analizę konstrukcji obiektu, na którym ma zostać zainstalowany konkretny system, można określić najkorzystniejsze położenie czujników. Lokalizując urządzenia pomiarowe, należy wziąć pod uwagę rodzaj i sposób wykorzystania obiektu, tak aby uwzględnione były nie tylko maksymalne wyężenia i ugięcia prętów, lecz także komfort użytkownika budynku.

Z powyższych rozważań jasno wynika, że systemy monitoringu znacząco ułatwiają dbanie o bezpieczeństwo konstrukcji oraz ludzi z niej korzystających, ostrzegają przed awarią, a odpowiednio wczesna reakcja może nawet zapobiec zniszczeniu bądź uszkodzeniu konstrukcji. ■

DOI: 10.5604/01.3001.0013.2032

Bibliografia

- [1] www.gunb.gov.pl (dostęp: marzec 2018 r.).
- [2] Dz.U. 2007 nr 99 poz. 665 – Ustawa z dnia 10 maja 2007 r. o zmianie ustawy Prawo budowlane oraz niektórych innych ustaw.
- [3] Dz.U. 2009 nr 56 poz. 461 – Rozporządzenie ministra Infrastruktury z dnia 12 marca 2009 r.

Abstrakt: Rozważaniom poddano konkretny system monitoringu oparty na technice laserowego pomiaru ugięcia. Aby przybliżyć sposób jego wykorzystania, przeprowadzono analizę przykładowej konstrukcji. Na podstawie otrzymanej dokumentacji stworzono model przestrzenny opracowywanego obiektu, który umożliwił wyznaczenie miejsc montażu urządzeń systemu monitoringu. Dzięki temu w łatwy sposób można uzyskać informację o stopniu wyężenia wybranych elementów konstrukcji oraz, w przypadku ewentualnego zagrożenia, szybko zareagować w celu zapobiegnięcia mu.

Słowa kluczowe: monitoring, konstrukcje stalowe, pomiar przemieszczeń