

MONITORING KONSTRUKCJI STALOWYCH



dr inż. Stanisław Wierzbicki
Instytut Inżynierii Budowlanej,
Wydział Inżynierii Lądowej,
Politechnika Warszawska

Jedną z najbardziej istotnych kwestii związanych z każdym obiektem budowlanym jest bezpieczeństwo konstrukcji. Zapewnienie tego bezpieczeństwa wymaga odpowiedniego przebiegu zarówno procesu projektowania i realizacji, jak i późniejszej eksploatacji powstałego obiektu.

Z badań przeprowadzonych w ramach projektu MONIT „Monitorowanie Stanu Technicznego Konstrukcji i Ocena jej Żywotności” [M1] realizowanego przez Politechnikę Warszawską w kooperacji z kilkoma innymi jednostkami naukowo-badawczymi wynika, że przyczyny awarii i katastrof budynków rozkładają się praktycznie równomiernie na wszystkie trzy ww. etapy, a więc projektowania, realizacji i eksploatacji obiektu – rys. 1. Wykres został sporządzony na podstawie oficjalnych danych dotyczących katastrof budowlanych w Polsce, w latach 1995-2010, udostępnionych przez Inspektoraty Nadzoru Budowlanego oraz z uwzględnieniem analogicznych informacji zaczerpniętych z materiałów własnych i innych źródeł [5, 7, 18].

Gdzie poprawić bezpieczeństwo?

Z przytoczonych wyżej badań wynika też, że większość katastrof miała miejsce w budynkach o konstrukcji stalowej lub mieszanej stalowo-żelbetowej, ze stalowymi dachami i żelbetowymi słupami – rys. 2. Potwierdzenie powyższych wniosków stanowią również obserwacje najbardziej znanych katastrof – większość z nich dotyczyła konstrukcji stalowych. Wnioski takie nie są oczywiście niczym zaskakującym, jeżeli weźmie się pod uwagę, że budynki o stalowych konstrukcjach no-

śnych charakteryzują się stosunkowo niewielkim udziałem ciężaru własnego w całości obciążeń granicznych. W przypadku typowych budynków o konstrukcji żelbetowej ich ciężar własny jest na tyle duży, że przyrost obciążeń spowodowany oddziaływaniami zmiennymi, szczególnie klimatycznymi, nie skutkuje zbyt dużymi zmianami sił wewnętrznych. Oznacza to, że jeżeli konstrukcja jest na tyle poprawnie zaprojektowana i wykonana, że jest w stanie bezpiecznie przenosić obciążenia stałe, to zagrożenie bezpieczeństwa w wyniku relatywnie niezbyt dużego przyrostu obciążeń pochodzących od oddziaływań zmiennych jest niewielkie.

Zgola inaczej przedstawia się sytuacja budynków o konstrukcjach stalowych, w których ze względu na niewielki ciężar konstrukcji i obudowy udział oddziaływań zmiennych w całości obciążeń jest znaczny, często większy niż 50%, a sytuacja ta jest potęgowana powszechną tendencją do stosowania coraz bardziej ekonomicznych i lekkich rozwiązań konstrukcyjnych. Jeżeli weźmie się pod uwagę losowość występowania oddziaływań zmiennych, w szczególności klimatycznych, oznacza to, że nawet obarczona wadami konstrukcja może przez wiele lat bezpiecznie pracować, nienarażona na maksymalne obciążenia zmienne, i dopiero wystąpienie ekstremalnych wartości tych oddziaływań objawi się awarią lub katastrofą. Równocześnie pojawia się kwestia zmian klimatycznych i coraz częściej występujących anomalii zjawisk pogodowych, która, nałożona na wspomniane wyżej podejście do projektowania, sprawia, że realne staje się przeciążenie konstrukcji i zagrożenie dla jej bezpieczeństwa, a co za tym idzie, także dla bezpieczeństwa przebywających w obiekcie osób i znajdującego się tam mienia.

Oprócz podstawowej roli systemów monitoringu, jaką jest poprawa bezpieczeństwa, mogą one przyczynić się do ograniczenia kosztów eksploatacji obiektu.

Z powyższych rozważań wynika, że celowe jest poszukiwanie i stosowanie metod i środków mogących przyczynić się do poprawy bezpieczeństwa konstrukcji.

Monitoring konstrukcji

Jedną z najbardziej intensywnie rozwijających się w tym zakresie metod jest monitoring konstrukcji. Z opisanych wyżej względów okazuje się on szczególnie przydatny w przypadku konstrukcji stalowych o niewielkich masach, dla których największy wpływ na wartości sił wewnętrznych mają obciążenia zmienne.

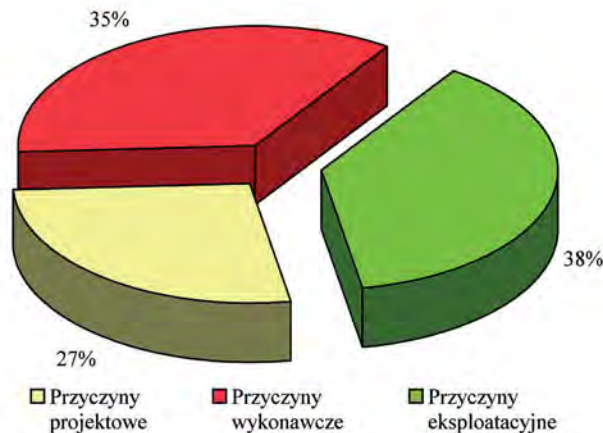
System monitoringu konstrukcji można zdefiniować jako zestaw współpracujących ze sobą urządzeń i odpowiedniego oprogramowania, które w sposób permanentny realizują pomiary związanych z pracą konstrukcji wybranych wielkości, archiwizują i analizują wyniki tych pomiarów oraz generują na tej podstawie odpowiednie sygnały i informacje. Typowy system składa się więc z części pomiarowej zainstalowanej na konstrukcji oraz odpowiedzialnego za archiwizację i analizę wyników modułu analityczno-decyzyjnego (komputer z odpowiednim oprogramowaniem), zainstalowanego w monitorowanym obiekcie lub poza nim. System monitoringu, w zależności od potrzeb i rodzaju monitorowanych wielkości, powinien wykonywać pomiary z częstotliwością ułamków sekund, minut lub godzin, a jego trwałość powinna korespondować z trwałością konstrukcji.

Systemy monitoringu mogą znacząco wspomagać przeglądy okresowe, dostarczając informacji o bieżącym zachowaniu się konstrukcji, nieosiągalnych bez takiego systemu.

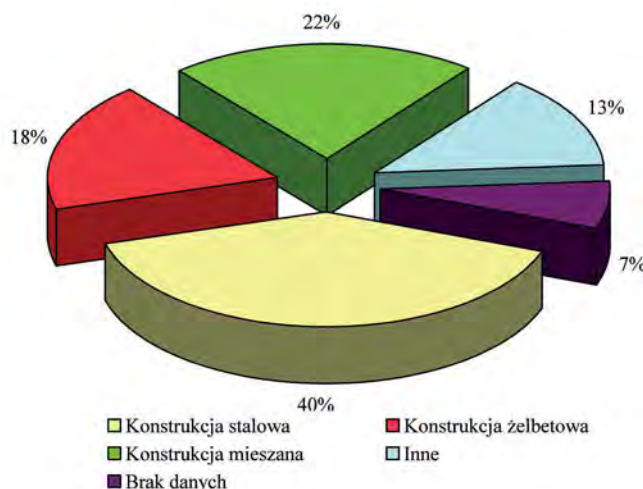
Znaczenie zagadnień monitoringu konstrukcji podkreśla fakt wprowadzenia w 2009 r. do „Warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki...” (Dz.U. z 2009 r. Nr 56 poz. 461, §204, ust. 7) [N2] wymagania stałego monitorowania parametrów istotnych dla bezpieczeństwa konstrukcji (przemieszczenia, odkształcenia, naprężenia) w obiektach użyteczności publicznej, takich jak: hale widowiskowe, sportowe, dworcowe, wystawowe, obiekty handlowe. Rozporządzenie to nie odnosi się do najczęściej występujących budynków o konstrukcji stalowej, takich jak np. hale magazynowe, magazynowo-spedycyjne i przemysłowe, jeśli jednak wziąć pod uwagę możliwe korzyści wynikające z monitorowania zachowania się konstrukcji – poprawa jej bezpieczeństwa i optymalizacja procesu utrzymania obiektu w okresie zimowym (odśnieżanie dachu) – także w przypadku tego typu budynków, szczególnie przy znacznych powierzchniach, zasadne może być stosowanie systemów monitoringu.

Jedynie wspomaganie

Omawiając zagadnienia monitoringu, należy jednak pamiętać, że funkcjonujący w obiekcie system monitoringu technicznego nie powinien być traktowany jako pełna gwarancja bezpieczeństwa konstrukcji i nie może prowadzić do zaniedbań w innych obszarach dbałości o konstrukcję – zdanie się wyłącznie na informacje uzyskiwane z takiego systemu lub nieumiejętna ich interpretacja mogłyby być dla konstrukcji bardziej niebezpieczne niż brak takiego systemu. W literaturze można znaleźć także sceptyczne oceny przydatności systemów monitoringu konstrukcji określanymi jako „monitoring bezpieczeństwa konstrukcji budowlanych” [9, 10], które są argumentowane np. brakiem realnych możliwości monitoringu niektórych wielkości i zjawisk, takich jak naprężenia w spoinach, wyboczenie, połączenia warstw ścian murowanych, stopień destrukcji zbrojenia i betonu itp. Należy zaznaczyć, że chociaż teoretycznie jest możliwe monitorowanie bardzo wielu różnych wielkości i zjawisk, to ze względu na uwarunkowania techniczne i koszty, stosowane w praktyce typowe systemy są ograniczane do pomiaru podstawowych wielkości, a co za tym idzie, powinny być określane raczej jako „systemy monitorin-



Rys. 1. Podział przyczyn awarii i katastrof



Rys. 2. Podział awarii i katastrof ze względu na typ konstrukcji

gu technicznego konstrukcji”. Jako takie nie są one jedynym wyznacznikiem stanu bezpieczeństwa konstrukcji, a jedynie wspomagają ocenę tego bezpieczeństwa. Jedną z podstawowych form dbałości o stan techniczny konstrukcji i oceny tego stanu są przewidziane w Prawie budowlanym obowiązkowe przeglądy okresowe, które, rzetelnie przeprowadzone, powinny dostarczać podstawowych informacji o stanie konstrukcji, w tym także takich jej elementów, które nie są nadzorowane przez monitoring. Systemy monitoringu mogą znacząco wspomagać takie przeglądy, dostarczając informacji o bieżącym zachowaniu się konstrukcji, nieosiągalnych bez takiego systemu.

Cele stosowania monitoringu

Jak więc można ująć zasadnicze cele stosowania systemów monitoringu technicznego konstrukcji budowlanych? Są to poprawa bezpieczeństwa konstrukcji i usprawnienie procesu utrzymania obiektu.

Podstawowym celem stosowania systemu monitoringu konstrukcji jest poprawa jej bezpieczeństwa, a co za tym idzie, także bezpieczeństwa obiektu i przebywających w nim osób. System taki powinien, w sposób ciągły lub cykliczny z odpowiednią częstotliwością, dostarczać informacji o zmianach obciążenia i/lub wyężenia elementów monitorowanej konstrukcji, a także sygnalizować przekraczanie takich poziomów tego obciążenia albo wyężenia, które są istotne z punktu widzenia bezpieczeństwa obiektu. Użytkownik otrzymuje

Systemy monitoringu technicznego konstrukcji nie są jedynym wyznacznikiem stanu ich bezpieczeństwa, a jedynie wspomagają ocenę tego bezpieczeństwa.

więc informacje o zachowaniu się konstrukcji i sytuacjach, które wymagają interwencji albo wiążą się z niebezpieczeństwem przekroczenia poziomów obciążenia uznanych za bezpieczne.

Kolejna funkcja systemu monitoringu jest związana z procesem utrzymania obiektu i obowiązkiem niedopuszczania do zalegania na dachu nadmiernej, ponadnormatywnej ilości śniegu – system monitoringu może znacznie usprawnić kontrolę ciężaru pokrywy śnieżnej. W przypadku manualnej oceny ilości zalegającego na dachu śniegu konieczne są cykliczne kontrole sytuacji wymagające na ogół wchodzenia na dach, a więc czynności, które w okresie zimowym są mało komfortowe i wiążą się z pewnym ryzykiem dla osób je wykonujących. Ostatnia niedoskonałość takiej oceny wynika z metody szacowania ilości zalegającego śniegu i jej reprezentatywności. Prawidłowa ocena wymagałaby pobierania określonych próbek śniegu z reprezentatywnych miejsc dachu i ich ważenia, podczas gdy często kontrola polega jedynie na mierzeniu grubości pokrywy w ograniczonej liczbie miejsc. Metoda taka niesie więc ze sobą ryzyko zarówno dopuszczenia do przeciążenia konstrukcji, jak też zbędnego usuwania śniegu z dachu.

System monitoringu może znacznie usprawnić kontrolę ciężaru pokrywy śnieżnej oraz ostrzegać o gromadzeniu się na dachu wód opadowych w trakcie intensywnych opadów deszczu przy ograniczonej drożności instalacji odwadniającej.

Inne, związane z procesem utrzymania obiektu pole eksploatacji systemu monitoringu to ostrzeganie o gromadzeniu się na dachu wód opadowych w trakcie intensywnych opadów deszczu przy ograniczonej drożności instalacji odwadniającej. Ponieważ trudno sobie wyobrazić kontrolę dachu w trakcie ulewnego deszczu, to tego typu sytuacjom najłatwiej przeciwdziałać przy pomocy monitoringu.

Oprócz podstawowej roli systemów monitoringu, jaką jest poprawa bezpieczeństwa, mogą one przyczynić się do ograniczenia kosztów eksploatacji obiektu. Procedury odśnieżania dachów obiektów wielkopowierzchniowych są często ustalone tak, że zabiegi te są wykonywane przy pewnych bezpiecznych grubościach pokrywy śnieżnej – na ogół zbyt często. Poza kosztami samej czynności odśnieżania istnieją także niezamierzone koszty dodatkowe, ujawniające się w dłuższym okresie, a związane z obniżeniem trwałości poszycia dachu w wyniku jego uszkodzeń narzędziami używanymi do odśnieżania. Koszty te to nie tylko kwestia napraw i wymian poszycia, ale także ewentualne uszkodzenia elementów wewnątrz obiektu w wyniku przeciekania dachu, obniżenie standardu narażonych na przecieki lokali handlowych czy usługowych i straty wizerunkowe wśród klientów tych lokali.

W kolejnych numerach o metodach pomiarowych wykorzystywanych w systemach monitoringu. ■

Abstract. Monitoring of steel constructions. The whole series (Monitoring of steel constructions - Builder July 2016 - January 2017) describes the topic of construction design technical monitoring, including the expected results of their use, its formal and legal conditions, as well as the advantages of it. A brief overview of the measuring methods used in the monitoring systems has been described, along with the technical possibilities of their application, as well as general rules of designing monitoring systems, solutions and method adjustment to the type and complexity of a building's construction. The choice of elements and places to be monitored has been presented, as well as system configuration tips. The problem has been illustrated by construction design monitoring system examples.

Keywords: monitoring, measurement systems and devices, construction design, steel constructions

Bibliografia całego cyklu

- [1] Bednarski Ł., Sieńko R., Obciążenie śniegiem obiektów budowlanych, „Inżynier Budownictwa” nr 90, grudzień 2011, str. 45-49.
- [2] Bryś H., Przewłocki S., Geodezyjne metody pomiarów przemieszczeń budowli, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 1998.
- [3] Chrościelewski J., Mosty Gdańsk: Projekt ogólny systemu monitorowania konstrukcji dachu Stadionu Narodowego w Warszawie, 2010.
- [4] Cwyl M., Wierzbicki S., Konstrukcje stalowe o dużych rozpiętościach, VADEMCEM Konstrukcje Budowlane, Wydawnictwo Polskiej Izby Inżynierów Budownictwa Sp. z o.o., Warszawa 2015, s.12-15.
- [5] Giżejowski M., Antoszkiewicz E., Wierzbicki S., Pióro Z., Wireless Sensor Network Systems for Structural Health Monitoring of Building Structures. Proceedings of the 5th International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligence Infrastructure, Cancun, Mexico (SHMII-5), 2011, p. 34 [full text on CD].
- [6] Giżejowski M., Wierzbicki S., Stachura Z., Structural Health Monitoring as a Tool Assisting the Structural Robustness Assessment. (keynote paper), 13th International Conference on Inspection, Appraisal, Repairs & Maintenance of Structures, Wuyishan, China, 2012, p. 27-36.
- [7] 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”, 2011, vol. 19, no. 2, p. 9-20.
- [8] Huston D., Structural Sensing Health Monitoring And Performance Evaluation, CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton 2011.
- [9] Kowalewski J., Krytycznie o monitoringu bezpieczeństwa konstrukcji budowlanych, Problemy przygotowania i realizacji inwestycji budowlanych, Puławy 2010.
- [10] Kowalewski J., Sulik P., Wiarygodność i skuteczność monitoringu bezpieczeństwa konstrukcji budowlanych, XI Konferencja Naukowo-Techniczna Problemy Rzecoznawstwa Budowlanego, Warszawa 2010.
- [11] Małysa K., Innowacyjne systemy monitoringu odkształceń i temperatury oparte o czujniki światłowodowe, docplayer.pl.
- [12] Nagayama T., Spencer B.F. Jr., Structural Health Monitoring Using Smart Sensors, NSEL Report Series, Report No. NSEL 001, Urbana-Champaign 2007.
- [13] Naticchia B., Vaccarini M., Carbonari A., Scorrano P., Auto-Regressive Compensation Technique for a Reliable Non Invasive Structural Health Monitoring System, Proceedings of the 28th ISARC, Seul, Korea 2011, s. 826-831.
- [14] Prezentacja: Monitorowanie technicznego stanu konstrukcji i ocena jej żywotności. Seminarium projektu MONIT, Politechnika Warszawska, Warszawa 2009.
- [15] Raport końcowy z realizacji projektu MONIT: Monitorowanie stanu technicznego konstrukcji i ocena jej żywotności, Politechnika Warszawska, Warszawa 2013.
- [16] Uhl T., Współczesne metody monitorowania i diagnozowania konstrukcji, www.fundacjaro-zwojunauki.pl/res/Tom2/6_Uhl.pdf.
- [17] Wierzbicki S., Giżejowski M., Kwaśniewski L., Systemy „MONIT” technicznego monitorowania stanu bezpieczeństwa konstrukcji budowlanych, Aktualne problemy budownictwa metalowego, Seria: Monografie Zespołu Konstrukcji Metalowych, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2014, s. 201-220.
- [18] Wierzbicki S., Giżejowski M., Stachura Z., Structural Failures and Monitoring of Structural Health with Use of WiSeNe^{MONIT} System. Research and Applications in Structural Engineering, Mechanics and Computation, CRC PRESS/BALKEMA: Proceedings and Monographs in Engineering, Water and Earth Sciences, 2013, p.2365-2370, full text e-book.
- [19] Wierzbicki S., Monitoring of Structure of Industrial Building on the Example of the WiSeNe^{MONIT} System. „Structure and Environment”, vol. 6, no. 4/2014, Kielce University of Technology, 17-23.
- [20] Wierzbicki S., Monitoring konstrukcji jako metoda poprawy bezpieczeństwa i optymalizacji kosztów eksploatacji obiektów logistycznych, „Logistyka” nr 4/2015, str. 6531-6538.
- [21] Wilde K., Systemy monitoringu konstrukcji obiektów budowlanych, XXVI Konferencja Naukowo-Techniczna „Awarie Budowlane” Szczecin – Międzyzdroje 2013, str. 123-140.
- [22] Wilde K., Zautomatyzowane systemy monitoringu technicznego dachów stalowych, 56. Konferencja Naukowa KILiW PAN oraz KN PZITB, Krynica 2010, Wyd. Konf. Tom 2, str. 729-736.
- [23] Wilde K. z zespołem, Opracowanie zestawu czujników i urządzeń rejestrujących modułu pomiarowego systemu monitorowania wybranej konstrukcji obiektu wielkopowierzchniowego, Gdańsk 2010.
- [24] Wright M., Kavanaugh J., Labine C., Performance Analysis of GMON3 Snow Water Equivalency Sensor. Proceedings of the Western Snow Conference 2011, Stateline (South Lake Tahoe), Nevada, USA, April 18, 2011.
- [25] Żółtowski K., Drawc M. Stadion Narodowy. Model statyczny do monitoringu Konstrukcji, XXVII Konferencja Naukowo-Techniczna „Awarie Budowlane” Szczecin – Międzyzdroje 2015, str. 285-292.

Normy, rozporządzenia, materiały informacyjne

- [N1] PN-EN 1990:2004. Eurokod. Podstawy Projektowania konstrukcji.
 [N2] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 marca 2009 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie (Dz.U. z 2009 r. Nr 56 poz. 461, §204, ust. 7).

[M1] www.monit.pw.edu.pl

W przygotowaniu niektórych fragmentów cyklu wykorzystano wyniki badań zrealizowanych w projekcie MONIT, w zakresie monitoringu konstrukcji obiektów kubaturowych – www.monit.pw.edu.pl [M1].