

# Monitoring konstrukcji budynku halowego na przykładzie systemu WiSeNe<sup>MONIT</sup> Monitoring of structure of industrial building on the example of the WiSeNe<sup>MONIT</sup> system

Stanisław Wierzbicki

Zespół Konstrukcji Metalowych, Instytut Inżynierii Budowlanej,  
Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Warszawska  
Al. Armii Ludowej 16, 00-637 Warszawa  
e-mail: s.wierzbicki@il.pw.edu.pl

## Streszczenie

Ekstremalne zdarzenia wynikające z oddziaływań klimatycznych mogą mieć poważny wpływ na konstrukcje budynków, prowadząc do lokalnych uszkodzeń skutkujących awarią lub nawet katastrofą. Jednym z najskuteczniejszych narzędzi zapewniania bezpieczeństwa w takich przypadkach jest zainstalowanie odpowiedniego systemu monitoringu technicznego, który może informować o aktualnym stanie konstrukcji i ostrzegać z wyprzedzeniem o zbliżających się niebezpiecznych sytuacjach. W pracy przedstawiono system monitoringu WiSeNe<sup>MONIT</sup>, który został opracowany do monitorowania stalowych konstrukcji dachów o dużych rozpiętościach i zainstalowany w hipermarkecie zlokalizowanym w północno-wschodniej Polsce. Wszystkie urządzenia systemu montowane do konstrukcji są całkowicie bezprzewodowe – nie wymagają rozprowadzania żadnych instalacji. W artykule przedstawiono też przykładowe wyniki pomiarów wykonanych przez urządzenia systemu.

## Abstract

Extreme loading events associated with climatic conditions can have a severe impact on building structures and may lead to local damage that can trigger the instant failure or progressive collapse. One of the most effective tools of safety assurance is to install an efficient structural health monitoring system that could inform about the actual state of the structure and warn in advance about forthcoming dangerous situations. This paper presents the WiSeNe<sup>MONIT</sup> monitoring system. The system was customized for the purpose of monitoring of a large span steel roof and installed in the hypermarket located on north-east of Poland. All devices installed to the structure are fully wireless. The paper presents examples of data recorded by the device system.

*Słowa kluczowe: bezpieczeństwo konstrukcji, monitoring konstrukcji, system bezprzewodowy*  
*Keywords: structures safety, structures monitoring, wireless system*

## 1. Wstęp

Jednym z podstawowych wymagań stawianych każdemu budynkowi jest bezpieczeństwo konstrukcji, które w fazie eksploatacji jest związane z charakterem i wielkością oddziaływań towarzyszących obiektowi. W przypadku większości typowych budynków halowych, najważniejszymi oddziaływaniami są obciążenia klimatyczne, głównie śniegiem, ale także wiatrem i wodami opadowymi. W sytuacji coraz częściej występujących zmian i anomalii pogodowych monitorowanie wpływu tego typu oddziaływań na konstrukcję i ich skutków pozwala poprawić bezpieczeństwo użytkowania budynku, usprawniając jednocześnie proces jego utrzymania [1].

System WiSeNe<sup>MONIT</sup> technicznego monitorowania konstrukcji dachów został opracowany w ramach projektu MONIT realizowanego przez konsorcjum jednostek naukowo-badawczych, w składzie którego znalazł się także Wydział Inżynierii Lądowej Politechniki Warszawskiej. Zasadniczym celem projektowania systemu była poprawa bezpieczeństwa konstrukcji dachów obiektów wielkopowierzchniowych, z jednoczesną optymalizacją kosztów związanych z utrzymaniem obiektu w okresie zimowym. Podstawowym zadaniem systemu jest więc informowanie użytkownika o zwiększaniu się obciążenia dachu, a w przypadku osiągnięcia określonych wartości granicznych tego obciążenia, ostrzeganie o możliwości przeciążenia konstrukcji. System został opracowany w ramach partnerstwa uczelniano-prywatnego Wydziału Inżynierii Lądowej Politechniki Warszawskiej (lider i jednostka wdrażająca) oraz firmy WiSeNe Sp. z o.o. [2].

## 1. Introduction

One of the basic requirements of each building is safety of the structure, which in the exploitation phase is related to the nature and magnitude of actions associated with the object. In the case of most conventional industrial buildings, the most important actions are the climatic load, in particular the snow load, but also wind and rainwater actions. In the context of increasingly occurring weather changes and anomalies it is rational to monitor the influence of this type of actions on the structure as well as effects of these interactions that can improve the building safety and at the same time streamlining the process of maintaining.

The WiSeNe<sup>MONIT</sup> technical monitoring system of roof structures was developed in the framework of the MONIT project realized by a consortium of the research units, with the participation of the Faculty of Civil Engineering Warsaw University of Technology. The key feature of monitoring system design was to improve the safety of roof structures of large span buildings, while optimizing the costs associated with maintaining the building during winter seasons that may require the snow removal activities to be undertaken. The main task of the system is then to inform the user about increasing the imposed loads on roof, and in the event of a certain extreme situation, warning of the possibility of overloading the structure. The system was developed in a partnership of the Faculty of Civil Engineering of the Warsaw University of Technology (leader and implementer) and the private firm WiSeNe Sp. z o.o. [2].

## 2. Organizacja systemu WiSeNe<sup>MONIT</sup>

System składa się z podsystemu *on-line*, obejmującego część sprzętową, realizującą pomiary w monitorowanym obiekcie i podsystemu *off-line*, służącego do okresowej, numerycznej analizy konstrukcji z uwzględnieniem pomiarów wykonywanych przez podsystem *on-line*.

Podsystem *on-line* wykorzystuje laserowy pomiar ugięć i temperatury w reprezentatywnej liczbie węzłów konstrukcji. W skład podsystemu, wchodzi urządzenie pomiarowe, retransmitery pośredniczące w komunikacji radiowej i jednostka centralna. Urządzenia pomiarowe są montowane do konstrukcji w sposób nienaruszający głównych elementów nośnych, bez rozpraszania jakichkolwiek instalacji. Zarówno komunikacja jak i zasilanie jest realizowane bezprzewodowo, a jedynym elementem systemu wymagającym zewnętrznego źródła zasilania jest zarządzająca całością jednostka centralna. Poszczególne urządzenia systemu komunikują się pomiędzy sobą z wykorzystaniem radiowej transmisji danych.

Jednostka centralna zarządza pracą podsystemu *on-line*, zbiera, przetwarza i ocenia dane pomiarowe oraz generuje komunikaty o poziomie wykorzystania nośności elementów konstrukcji obiektu (stopniu zagrożenia przeciążeniem konstrukcji) a także o stanie systemu. Dostęp do systemu jest możliwy za pomocą standardowej przeglądarki internetowej. Jednostka centralna zasilana jest z sieci energetycznej, a w przypadku awarii sieci przełącza się automatycznie na zasilanie z wbudowanego UPS. Integralną częścią jednostki jest transceiver – radiowy układ nadawczo-odbiorczy w niezależnej obudowie.

Podsystem *on-line* wykrywa szereg zdarzeń dotyczących monitorowanej konstrukcji, a także związanych z działaniem samego systemu, reagując na nie odpowiednimi komunikatami. Zależnie od oczekiwanej reakcji użytkownika, komunikaty te mogą być informacjami, ostrzeżeniami lub alarmami.

Najważniejszym zdarzeniem wykrywanym przez system jest przekraczanie kolejnych, tzw. wartości progowych ugięcia elementów monitorowanej konstrukcji. Na podstawie porównania zmierzonej wartości zmiany ugięcia z wartościami progowymi określany jest stopień wykorzystania nośności elementów konstrukcji i rodzaj generowanego komunikatu. Dla każdego punktu pomiarowego w obiekcie określona jest wartość dopuszczalna LDP zmiany ugięcia od obciążeń występujących po zainstalowaniu systemu oraz wartości progowe,  $L1 \div L4$ , zmiany ugięcia odpowiadające standardowo 30, 50, 70 i 100% wartości dopuszczalnej LDP.

Dla każdego punktu pomiarowego ustalana jest również wartość progowa LD skokowej zmiany przemieszczenia, traktowanej jako maksymalna, realna wartość zmiany przemieszczenia pomiędzy kolejnymi pomiarami. Ma to na celu wyeliminowanie błędnych pomiarów wynikających np. z przesłonięcia wiązki lasera przez przechodzącego człowieka czy przedmiot o dużych gabarytach.

Wystąpienie określonego zdarzenia powoduje wygenerowanie odpowiedniego komunikatu i rozesłanie go do wybranych użytkowników w postaci wiadomości SMS i e-mail. Ponadto komunikat ten jest odpowiednio sygnalizowany na stronie WWW systemu, a niektóre są także wizualizowane za pomocą odpowiednich wskaźników na płycie czołowej jednostki centralnej. Odbiór komunikatów typu alarm i ostrzeżenie wymaga potwierdzenia przez jednego z użytkowników na stronie WWW systemu lub przez wysłanie odpowiedniej wiadomości SMS.

Podsystem *off-line* jest zewnętrznym modułem analitycznym pozwalającym na uzyskanie informacji o stanie odkształ-

## 2. Organization of the WiSeNe<sup>MONIT</sup> system

The system consists of an *on-line* subsystem, covering part of the hardware, reading the measurements of the monitored object and *off-line* subsystem, used for numerical structural analysis carried out periodically on the basis of including the measurements performed by the *on-line* subsystem.

The *on-line* subsystem uses the laser measurement of deflection and temperature of representative number of nodes in the structure. The subsystem consists of measuring devices, retransmitters middleware in radio communications and the central unit. Measuring devices are attached to the structure in a manner that does not violate the main load-bearing elements and without any distribution installations. Both communication and power is accomplished wirelessly, and the only element of a system that requires an external power source is managing the system the central unit. The individual devices of the system communicate with each other using the radio data transmission.

The central unit manages the *on-line* subsystem, collects, processes and evaluate the measurement data, and generates messages in relation to the level of capacity utilization ratios of structural parts of the object (degree of failure risk as a result of structure overloading) and the actual state of the system. Access to the system is enabled using a standard Web browser. The central unit is powered from the electricity, and in the case of network failure automatically switches to power the built-in UPS. An integral part of the unit is a transceiver, which is a radio transceiver circuit placed in independent housing.

The *on-line* subsystem detects the number of events related to the monitored structure, as well as the performance of the same system, responding to the relevant messages. Depending on the expected user reaction, these messages can be information, warnings or alarms.

The main event detected by the system is crossing of subsequent threshold values of the deflection monitored elements of the structure. Based on a comparison of the measured value of changes of deflections with the threshold values referred to the degree of capacity utilization of structure elements, the type of message is generated. For each measurement point in the object, the value of the permissible LDP changes in deflections that occur after the system is installed and the threshold values,  $L1 \div L4$ , deflection changes corresponding to the standard 30, 50, 70 and 100% of the limit LDP, are specified.

For each measuring point, the threshold value LD step change of displacement, understood as the maximum of the real value of displacement changes between subsequent measurements is also determined. It aims to eliminate the erroneous measurements as for the example, the overriding by the laser a passing man or a placement of the object of large dimensions.

The occurrence of a specific event generates an appropriate message, which is sent to selected users in the form of SMS and e-mail. In addition, this message is adequately indicated on the website dedicated to the system. Some of the messages are also visualized using indicators on the front panel of the central unit. Receiving the messages like an alarm and warning needs to be confirmed by one of the users on the website or by sending the corresponding SMS.

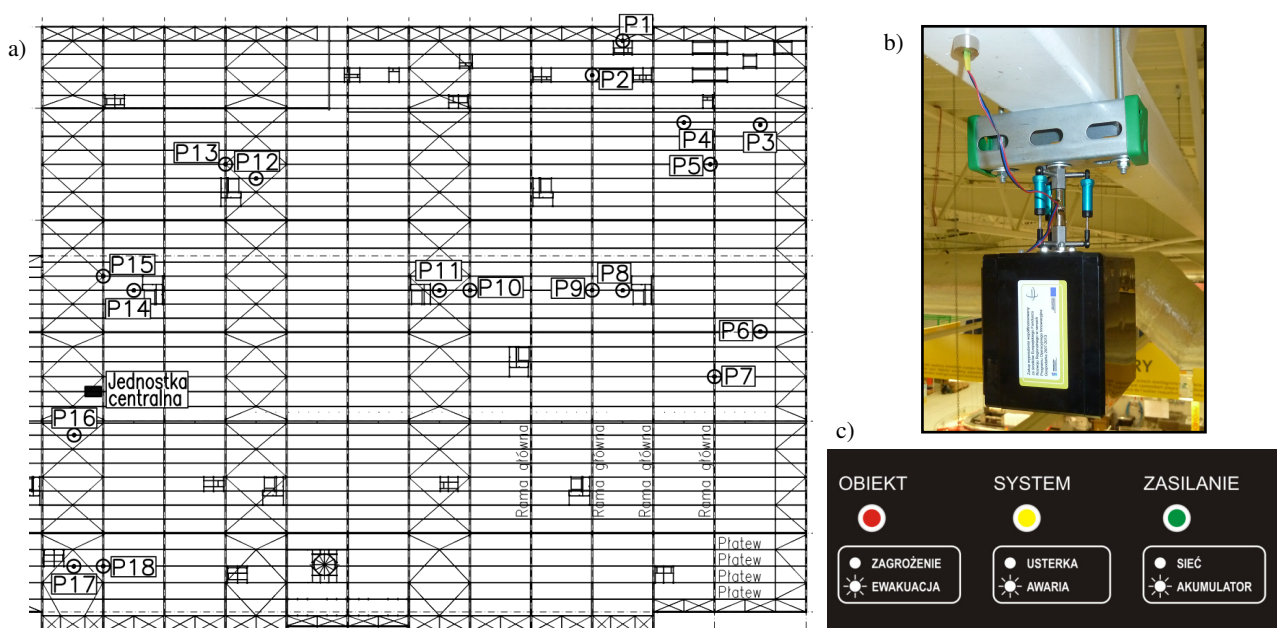
*Off-line* subsystem is an external analysis module allowing to obtain information about of status of strains/stresses in all relevant structural elements, which support the system for more accurate and comprehensive assessment of the level of

ceń/naprężeń we wszystkich istotnych elementach konstrukcji, co umożliwia bardziej precyzyjną i kompleksową ocenę poziomu wytrzymałości elementów konstrukcji, a zatem i jej bezpieczeństwa.

Do opracowania modelu numerycznego modułu *off-line* może być wykorzystywane standardowe oprogramowanie inżynierskie, jakie jest stosowane do analizy konstrukcji w procesie projektowania obiektu. Model taki jest opracowywany w początkowej fazie instalacji systemu i walidowany przy pierwszych identyfikowalnych obciążeniach. W przypadku rozbieżności wyników uzyskanych przy standardowych założeniach, w stosunku do wyników pomiarów z podsystemem *on-line*, do modelu numerycznego wprowadzane są odpowiednie korekty. Po uzyskaniu zgodności wyników analiz numerycznych z wynikami pomiarów, model jest wykorzystywany do wspomagania modułu *on-line*. Model taki może być też wykorzystywany do weryfikacji nośności konstrukcji oraz sprawdzenia poprawności rozwiązań projektowych i ich korekty.

utilization of capacity of structural elements, and therefore the overall safety.

For the development the numerical model of the *off-line* module one can use a standard engineering software that is adequate for analysis of the structure in the process of modeling the object. The numerical model is developed in the initial phase of installation of the system and validated at the first instant of identifiable level of loads. In case of divergence of results obtained using standard assumptions in relation to the measurement results from the *on-line* subsystem, appropriate corrections are introduced to the numerical model. After the compatibility of the results obtained from numerical analysis with the measurement results, the model is used to support the *on-line* module. Such a model can also be used to verify the capacity of structure, validation of the designing solution and to the correction of this solution.



Rys. 1. WiSeNe<sup>MONIT</sup> - podsystem *on-line*: a) schemat instalacji, b) przykładowe urządzenie pomiarowe zamocowane do konstrukcji, c) wskaźniki na płycie czołowej jednostki centralnej.  
 Fig. 1. WiSeNe<sup>MONIT</sup> - *on-line* subsystem: a) installation scheme, b) sample of the measuring device attached to the structure, c) the indicators on the front panel of the central unit.

### 3. Instalacja pilotowa

Instalację pilotową zrealizowano w wielkopowierzchniowym obiekcie handlowym zlokalizowanym w północno-wschodnim rejonie Polski [3]. Podsystem *on-line* składa się z jednostki centralnej z transceiverem, 18 urządzeń pomiarowych oraz urządzeń retransmisyjnych. Komunikacja z siecią Internet jest realizowana przy pomocy routera GSM, a dostęp do systemu odbywa się poprzez stronę <http://83.220.106.8:10080>. Schemat instalacji i przykładowe urządzenie pomiarowe przedstawiono na Rys. 1. Rozmieszczenie urządzeń pomiarowych w budynku było kompromisem pomiędzy potrzebą uzyskania wyników reprezentatywnych dla całej konstrukcji, a ograniczeniami wynikającymi ze sposobu użytkowania obiektu. Ponieważ urządzenia te wymagają wolnej powierzchni posadzki bezpośrednio pod miejscem pomiaru, to rozmieszczono je tak aby uzyskać informacje o ugięciach w miejscach spodziewanych

### 3. Pilot installation

Pilot installation was carried out in a large area commercial building located in the northeastern region of Poland [3]. *Off-line* subsystem consists of a central unit with a transceiver, 18 measuring devices and retransmission equipment. Communication with the Internet is accomplished via a GSM router, and access to the system is via <http://83.220.106.8:10080> page. Scheme of an installation and sample measurement device is shown in Fig. 1. Arrangement of measuring devices in the building was a compromise between the need to obtain results representative of the whole structure, and constraints arising from the way the works of object. Since these devices require the free surface of the floor directly below the point of measurement, it is arranged so as to obtain information on the deflections in the significant points with regard to expected snow loading and at the same time as to not restrict the freedom

znacznych obciążeń śniegiem i nie ograniczać przy tym swobody użytkowania obiektu.

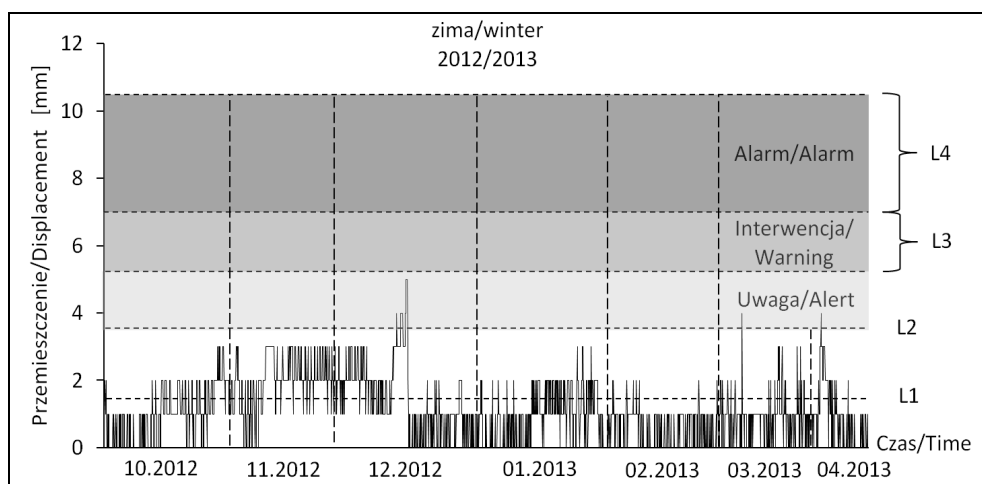
Model numeryczny podsystemu *off-line* obejmujący wszystkie główne elementy konstrukcji, został opracowany przy wykorzystaniu oprogramowania ARSA Professional.

Na Rys. 2 przedstawiono wykres zmian ugięć w przykładowym punkcie pomiarowym w okresie zimowym 2012/2013. Z analizy wyników pomiarów we wszystkich punktach wynika, że jedynie w dwóch miejscach (P7 i P5 – Rys.1) wystąpiło przekroczenie wartości progowej L2, które wskazywało dopiero na możliwość zaistnienia sytuacji wymagającej odśnieżania dachu, nie oznaczając jeszcze konieczności odśnieżania. Wynika stąd, że mimo kilkukrotnych znacznych opadów śniegu i związanych z tego typu sytuacjami, procedur nakazujących odśnieżanie dachu, zgodnie ze wskazaniem systemu nie było konieczne usuwanie śniegu z połaci dachowej.

to use of the object.

The numerical model of the *on-line* subsystem, covering all the main elements of considered structure, has been developed using software ARSA Professional.

Figure 2 shows the diagram of changes of deflections in the sample measurement point during the winter 2012/2013. The analysis of the results of measurements at all points showed that only in two places (P7 and P5 - Fig.1) the records had exceeded the threshold value L2, which indicated only the future possibility of a situation that requires snow removal from the roof, but marking a proof for no need of snow removal. This means that despite multiple cases of substantial snowfalls and associated with them owner's procedures requiring the roof snow removal, according to the indications of the system it was not necessary to remove snow from the roof.



Rys. 2. Przemieszczenia w punkcie P7 w okresie zimowym 2012/2013.

Fig. 2. Displacements at the point P7 in the winter season 2012/2013.

#### 4. Podsumowanie

System WiSeNe<sup>MONIT</sup> został opracowany do monitoringu zachowania się konstrukcji poddanej oddziaływaniom klimatycznym śniegiem i wodami opadowymi, a więc jest systemem służącym poprawie bezpieczeństwa obiektu oraz usprawniającym i optymalizującym jego eksploatację i utrzymanie. Ponadto system ten pozwala wypełnić, dotyczące obiektów użyteczności publicznej, zapisy prawne wymagające instalacji urządzeń do stałej kontroli podstawowych parametrów konstrukcji. Prototypowa instalacja wskazuje na przydatność i celowość stosowania tego typu systemów w obiektach wielkopowierzchniowych.

#### 4. Summary

WiSeNe<sup>MONIT</sup> system was developed for monitoring behavior of the structure subjected to the climatic actions in relations to snow and rainwater, so it is a system to be useful for improving the safety of the building as well as streamlining and optimizing its exploitation and maintenance. In addition, this system allows to meet the legal provisions requiring the installation of the monitoring devices for controlling the basic parameters of the behavior of building structures in the public domain. The prototype installation shows the usefulness and desirability of such systems for the safety of large area buildings.

#### Literatura • References

- [1] Giżejowski M.A., Wilde K., Uziak J., Wierzbicki S., (2011), *On a necessity of monitoring systems for sustainable development of mechanical and civil engineering infrastructure*. Botswana Journal of Technology 2(10), 2011, p. 9-20.
- [2] Raport końcowy z realizacji projektu MONIT, (2013), *Monitorowanie stanu technicznego konstrukcji oraz ocean jej żywotności*, Politechnika Warszawska, Warszawa 2013.
- [3] Wierzbicki S., Giżejowski M., Stachura Z., (2013), *Structural failures and monitoring of structural health with use of WiSeNe<sup>MONIT</sup> system*. Research and Applications in Structural Engineering, Mechanics and Computation, CRC PRESS/BALKEMA: Proceedings and Monographs in Engineering, Water and Earth Sciences.

*Przedstawiono wyniki badań zrealizowanych w projekcie MONIT w zakresie monitoringu konstrukcji obiektów kubaturowych. Results of research project MONIT with regard to monitoring of building structures are presented in this paper.*