

STANISŁAW WIERZBICKI
Warsaw University of Technology
e-mail: s.wierzbicki@il.pw.edu.pl

MONITORING OF STRUCTURE OF INDUSTRIAL BUILDING ON THE EXAMPLE OF THE WiSeNe^{MONIT} SYSTEM

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. In this paper, the WiSeNe^{MONIT} monitoring system is presented together with its pilot installation. The system was customized for the purpose of monitoring of a large span steel roof and installed in the hypermarket located in north-east of Poland. The data recorded from the system devices are evaluated for periods between December 2011 and February 2013, and presented in the paper together with some practical observations.

Keywords: structures safety, structures monitoring, wireless system

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 streamline the process of maintaining [1, 2].

The WiSeNe^{MONIT} 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 Warsaw University of Technology (leader and implementer) and the private firm WiSeNe Sp. z o.o. [3].

2. Organization of the WiSeNe^{MONIT} 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 (Fig. 1).

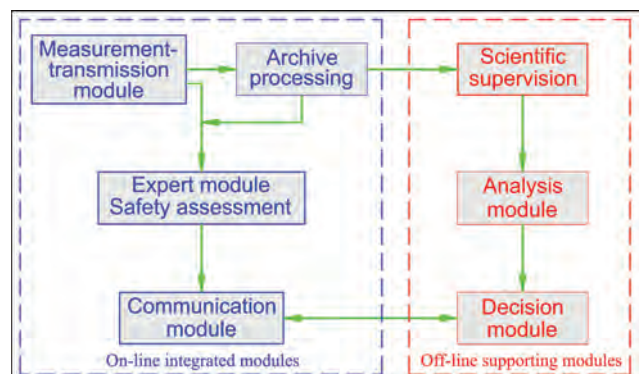


Fig. 1. General scheme of the WiSeNe^{MONIT} system

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 distribution of any installations. Both communication and power are accomplished wirelessly, and the only element of a system that requires an external power source is the central unit managing the system. 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 evaluates 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 typical installation scheme of the *on-line* subsystem is shown in Figure 2.

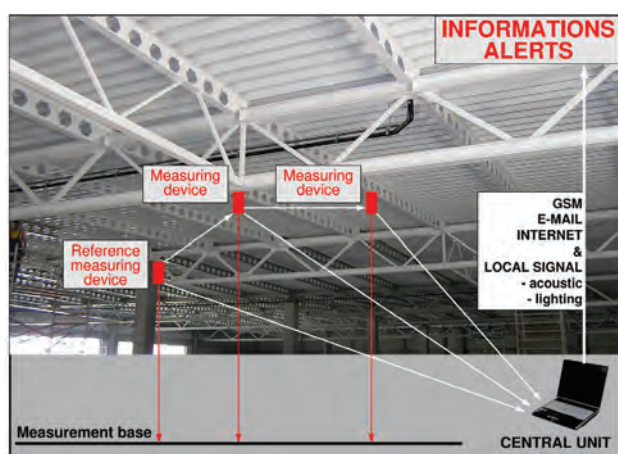


Fig. 2. Typical installation scheme of the WiSeNe^{MONIT} system

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, the degree of capacity utilization of structure elements and the type of message is referred – Table 1. For each measurement point in the object, the value of the permissible changes in deflections that occur after the system is installed (LDP) and the threshold values of the deflection changes (L1 ÷ L4) corresponding to the standard 30, 50, 70 and 100% of the limit LDP, are specified.

Table 1. Reaction levels corresponding to threshold levels of structure health assessment

Displacement state (due to climatic actions)	System state		End user state	
	Reaction type	Sampling frequency	Signal	Activity
$\Delta \leq L1$	Normal	T	None	None
$L1 < \delta \leq L2$	Raised	T/2	Alert	Observation
$L2 < \delta \leq L3$	High	T/4	Warning	Inspection
$L3 < \delta \leq L4$	Higher	T/8	Alarm	Intervention
$\Delta > L4$	Highest	T/8	Closure	Avacuation

For each measuring point, the threshold value step change of displacement (LD), 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 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 – Fig. 3c. 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 the status of strains/stresses in all relevant structural elements, which support the system for more accurate and comprehensive assessment of the level of utilization of capacity of structural elements and, therefore, the overall safety.

For the development of a numerical model, which is the main part 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 identifiable 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 and validation of the designing solution.

3. Pilot installation

Pilot installation was carried out in a large area commercial building located in the northeastern region of Poland [2] – Figure 3a. *On-line* subsystem consists of a central unit (Fig. 3c) with a transceiver, 18 measuring devices (Fig. 3b) and retransmission equipment (9 devices).

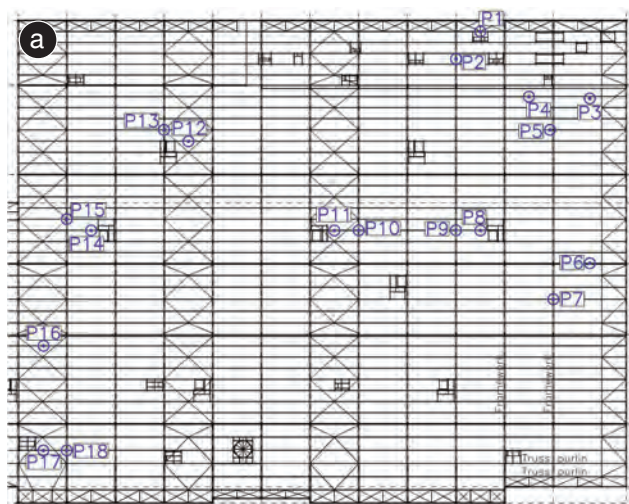


Fig. 3. WiSeNe^{MONIT} – *on-line* subsystem: a) installation scheme, b) sample of the measuring device attached to the structure, c) the indicators on the front panel of the central unit (where: obiekt – object, zasilanie – power, zagrożenie – threat, ewakuacja – evacuation, usterka – defect, awaria – failure, sieć – network, akumulator – battery)

Communication with the Internet is accomplished via a GSM router, and access to the system is via http page. 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 points with regard to expected significant snow loading and at the same time so as not to restrict the freedom to use the object.

The numerical model of the *off-line* subsystem, covering all the main elements of structure, was developed with help of Autodesk Robot Structural Analysis Professional software (Fig. 4). It consists of about 19000 elements and 12800 nodes, and the number of equations needed to be solved is about 75600 [2]. The calibrated numerical model was used for the evaluation of displacements produced by permanent and climatic load combinations and adjustment of the initial threshold values established on the basis of a structural design.

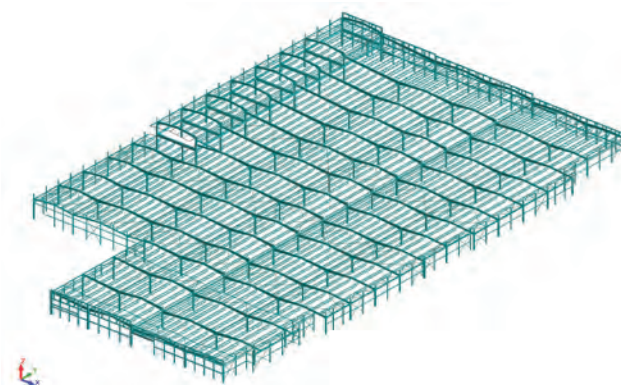


Fig. 4. Printout of constructed numerical model from the *off-line* subsystem of WiSeNe^{MONIT}

Figures 5 and 6 show the records of the displacement and temperature from the measuring device P7 [2]. The analysis of the results of measurements at all points showed that only in two places, P5 and P7 (Fig. 3a and Fig. 5) the records of the displacement 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 owner's procedures requiring the roof snow removal associated with them, according to the indications of the system it was not necessary to remove snow from the roof (Fig. 7).

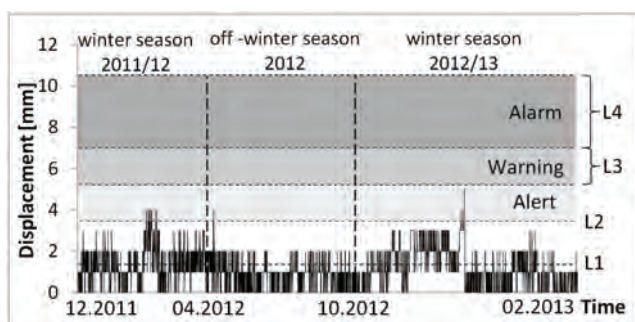


Fig. 5. Displacement records from the measuring device P7 [2]

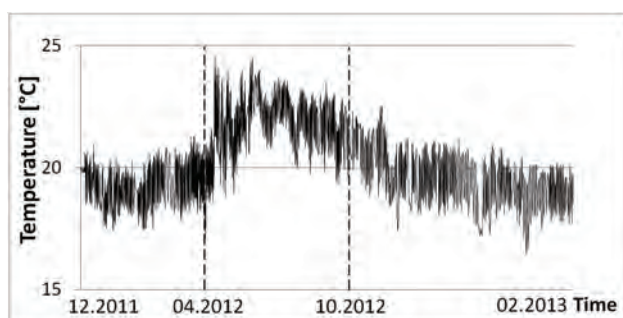


Fig. 6. Temperature records from the measuring device P7 [2]

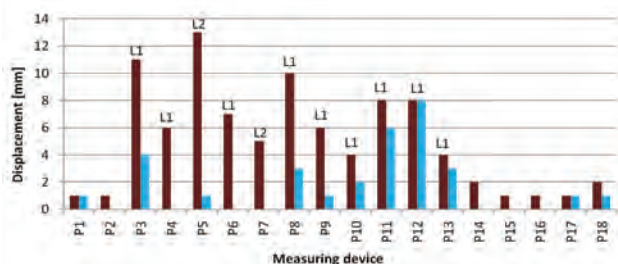


Fig. 7. Displacement decreasing caused by snow removal

The temperature of roof steel structure varies from about 16°C in winter season to about 24°C in summer

(Fig. 6). As it has been indicated by the *off-line* subsystem, this change of temperature results in the displacement change of around 1 mm, so that it is in the range of measurement tolerances. This means that the influence of the temperature may be omitted in the case of this structure.

4. Summary

WiSeNe^{MONIT} 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.

References

- [1] Gizejowski M.A., 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 2(10) (2011), pp. 9–20.
- [2] Wierzbicki S., Gizejowski 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.
- [3] Raport końcowy z realizacji projektu MONIT, *Monitorowanie stanu technicznego konstrukcji oraz ocena jej żywotności*, Politechnika Warszawska, Warszawa 2013.

Results of research project MONIT (www.monit.pw.edu.pl) with regard to monitoring of building structures are presented in this paper.

Stanisław Wierzbicki

Monitoring konstrukcji budynku halowego na przykładzie systemu WiSeNe^{MONIT}

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 użytkownika budynku, usprawniając jednocześnie proces jego utrzymania [1, 2].

System WiSeNe^{MONIT} technicznego monitorowania konstrukcji dachów został opracowany w ramach projektu MONIT realizowanego przez konsorcjum jednostek naukowo-badawczych, wśród których 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, ostrzeżenie 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. [3].

2. Organizacja systemu WiSeNe^{MONIT}

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 rozprowadzania 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. Typowy schemat instalacji podsystemu *on-line* przedstawiono na rysunku 2.

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 (tab. 1). Dla każdego punktu pomiarowego

w obiekcie określona jest wartość dopuszczalna zmiany ugięcia od obciążeń występujących po zainstalowaniu systemu (LDP) oraz wartości progowe zmiany ugięcia, L1 ÷ L4, odpowiadające standardowo 30, 50, 70 i 100% wartości dopuszczalnej LDP.

Dla każdego punktu pomiarowego ustalana jest również wartość progowa skokowej zmiany przemieszczenia (LD), 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 (rys. 3c). 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 odkształceń/naprężeń we wszystkich istotnych elementach konstrukcji, co umożliwia bardziej precyzyjną i kompleksową ocenę poziomu wyężenia elementów konstrukcji, a zatem i jej bezpieczeństwa.

Do opracowania modelu numerycznego, który jest głównym elementem modułu *off-line*, może być wykorzystane 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 podsystemu *on-line*, do modelu numerycznego wprowadzane są odpowiednie korekty. Po uzyskaniu zgodności wyników analiz numerycznych z wynikami pomiarów, model jest wykorzystywany do wspomaganie modułu *on-line*. Model taki może też służyć do weryfikacji nośności konstrukcji oraz sprawdzenia poprawności przyjętych rozwiązań projektowych i ich korekty.

3. Instalacja pilotowa

Instalację pilotową zrealizowano w wielkopowierzchniowym obiekcie handlowym zlokalizowa-

nym w północno-wschodnim rejonie Polski [2] – rysunek 3a. Podsystem *on-line* składa się z jednostki centralnej (rys. 3c) z transceiverem, 18 urządzeń pomiarowych (rys. 3b) oraz 9 urządzeń retransmisyjnych. Komunikacja z siecią Internet jest realizowana przy pomocy routera GSM, a dostęp do systemu odbywa się poprzez stronę http. 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 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 Autodesk Robot Structural Analysis Professional (rys. 4). Model składa się z około 19000 elementów i 12800 węzłów, a liczba równań niezbędnych do rozwiązania zadania obliczeniowego wynosi około 75600 [2]. Skalibrowany model numeryczny został wykorzystany do oceny przemieszczeń wywołanych obciążeniami stałymi i klimatycznymi i korekty wartości progowych ustalonych wstępnie na podstawie projektu konstrukcji.

Na rysunkach 5 i 6 przedstawiono wykresy przemieszczeń oraz temperatur w przykładowym punkcie pomiarowym P7 [2]. Z analizy wyników pomiarów przemieszczeń we wszystkich punktach wynika, że jedynie w dwóch miejscach, P5 i P7 (rys. 3a i 5), 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, obowiązujących w sieci handlowej procedur nakazujących odśnieżanie dachu, zgodnie ze wskazaniami systemu nie było konieczne usuwanie śniegu z połaci dachowej – (rys. 7).

Temperatura konstrukcji stalowej dachu zmienia się od około 16°C w okresie zimowym do około 24°C w lecie – (rys. 6). Z analiz przeprowadzonych przy pomocy modułu *off-line* wynika, że takie zmiany temperatury skutkują zmianami przemieszczeń na poziomie około 1 mm, a więc w zakresie tolerancji pomiarowych systemu. Oznacza to, że wpływ temperatury może być w przypadku tej konstrukcji pominięty.

4. Podsumowanie

System WiSeNe^{MONIT} 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 tego typu 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.

Przedstawiono wyniki badań zrealizowanych w projekcie MONIT w zakresie monitoringu konstrukcji obiektów kubaturowych – www.monit.pw.edu.pl.