



KRZYSZTOF WILDE, *krzysztof.wilde@gmail.com*

MIKOŁAJ MIŚKIEWICZ, *mmisk@pg.gda.pl*

Katedra Mechanika Budowli i Mostów, Politechnika Gdańska

JERZY SIEMIŃSKI, *arcon3@wp.pl*

Pracownia Projektowa Arcon

TOMASZ BALCEROWSKI, *t.balcerowski@ekoinbud.pl*

Ekoinbud Sp. z o.o., Gdańsk

MONITORING KONSTRUKCJI DACHU HALI „OLIVIA” W TRAKCIE PRAC REMONTOWYCH

MONITORING OF SPORTS ARENA „OLIVIA” ROOF DURING REPAIR

Streszczenie W artykule przedstawione są dane i analizy stanu konstrukcji dachu Hali „Olivia” pozyskane przy zastosowaniu systemu monitoringu technicznego (SMT OLIVIA – 2) przed remontem I w trakcie demontażu poszycia dachu. Wyniki analiz numerycznych pokazują trudności w modelowaniu obciążania konstrukcji użytkowanej przez ponad 40 lat.

Abstract The paper presents the analysis of data obtained during the reconstruction of the steel roof of ports Arena „Olivia”. The data is obtained by the monitoring system SMT OLIVIA-2. The problems related to validation of the numerical models with the measurement data are highlighted.

1. Wstęp

Badania związane z wykorzystaniem systemów monitoringu technicznego są relatywnie nowe. Pierwsze udokumentowane zastosowania systemów monitoringu technicznego (MT) datowane są na lata osiemdziesiąte dwudziestego wieku. Systemy MT stanowią element diagnostyki z wykorzystaniem technologii nieniszczących [1]. Podstawową różnicą pomiędzy diagnostyką nieniszczącą, a systemem MT jest ciągłość działania oraz funkcja wnioskowania o stanie konstrukcji. Diagnostykę nieniszczącą przeprowadza się okresowo, a dane analizuje doświadczony inżynier, zaś w systemach MT pomiary diagnostyczne wykonywane są ciągle w trakcie użytkowania obiektu oraz w sposób ciągły wykonuje się analizę i predykcję stanu konstrukcji.

Ogólna definicja systemu monitoringu zakłada, że jest to zbiór urządzeń i procedur, których celem jest identyfikacja, śledzenie i analiza, umożliwiające organizację i sterowanie danego procesu [2]. Dynamiczny rozwój systemów MT głównie dotyczy urządzeń mechanicznych (np. [2]). System MT bazuje na rozwiązaniach pozyskiwanych nauk technicznych takich jak: mechanika, materiałoznawstwo, elektronika, technologie informatyczne oraz wykorzystuje teorię decyzji. Zadania dla systemów MT zdefiniowano, jako [3]:

- I. Wykrywanie pojawienia się uszkodzeń.
- II. Wykrywanie miejsca położenia uszkodzenia.
- III. Wykrywanie typu i rozmiaru uszkodzenia.
- IV. Prognoza rozwoju uszkodzenia, ocena żywotności obiektu.

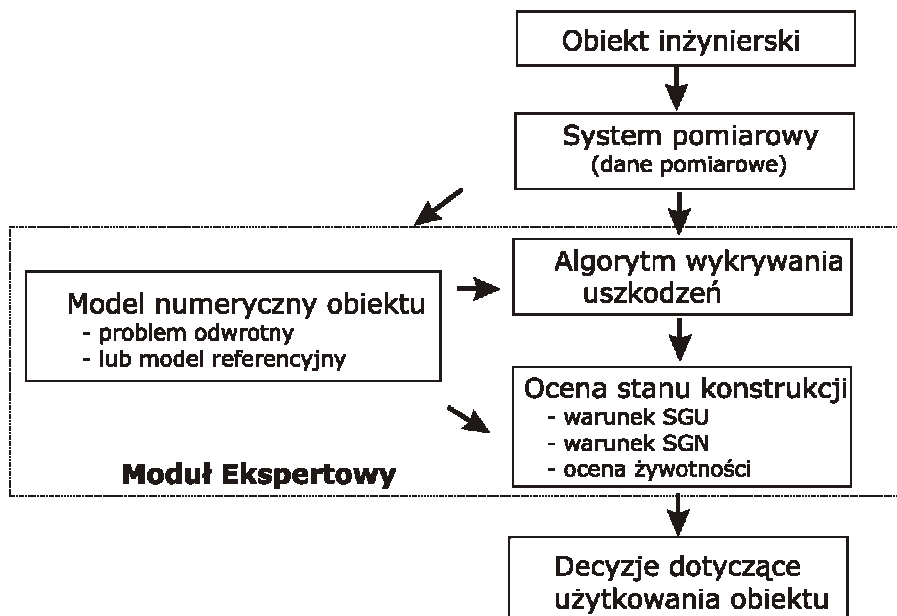
Rozwój nowoczesnych technologii, a w szczególności nadzieje związane z komercjalizacją osiągnięć w nanotechnologii, pozwalają na dodanie nowych zadań dla systemów MT [4]:

- V. Automatyczna i ciągła samo-diagnostyka obiektu.
- VI. Automatyczne i ciągłe samo-naprawianie uszkodzeń.
- VII. Aktywne sterowanie monitorowanym procesem.

Zastosowanie systemów MT do konstrukcji budowlanych dotyczy wyłącznie obiektów o szczególnym znaczeniu dla bezpieczeństwa jego użytkowników lub otoczenia obiektu. Przykładem może być system monitoringu obejmujący prawie 8000 punktów pomiarowych, który został zainstalowany na zaporze ziemnej Żelazny Most [5] lub system MT służący zwiększeniu bezpieczeństwa użytkowania Hali „Olivia” do czasu remontu konstrukcji dachu [6]. Systemy MT dla obiektów budowlanych mogą także realizować dodatkowe zadania [2] jak np.:

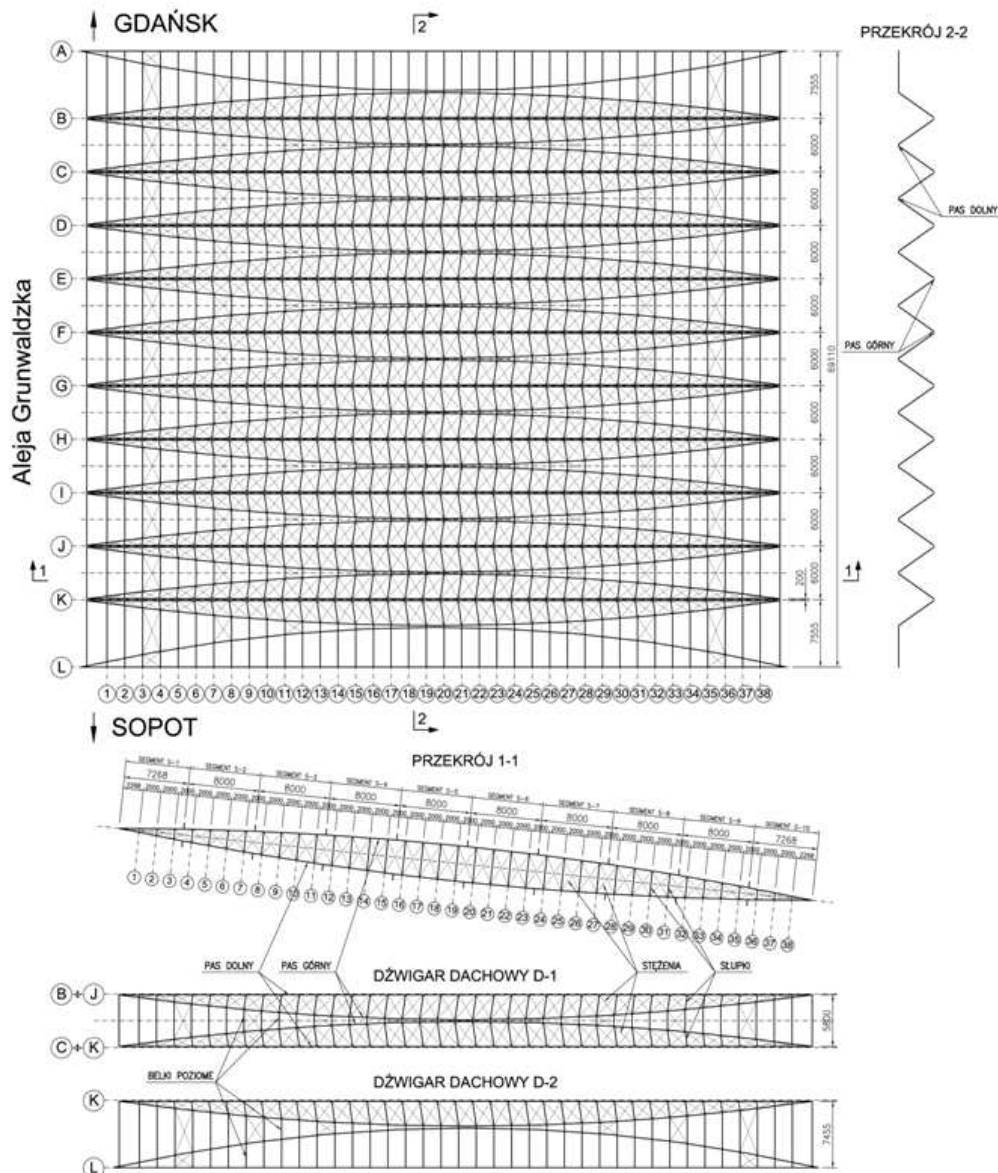
1. Dostarczyć danych do weryfikacji procedur projektowych;
2. Tworzyć zintegrowane bazy danych, bazy wiedzy;
3. Dostarczać informacji w czasie rzeczywistym o stanie konstrukcji;
4. Wspierać bezpieczeństwo zaraz po wystąpieniu awarii;
5. Dostarczać danych do planowania przeglądów konstrukcji;
6. Dostarczać wskazówek do technicznego utrzymania, napraw lub modernizacji.

Przykładowy schemat systemu MT przedstawiony jest na rys. 1. Decyzje o użytkowaniu obiektu są wykonywane na bazie wskazówek sformułowanych przez moduł ekspertowy. Moduł ekspertowy jest integralną częścią systemu monitoringu technicznego. Pozyskanie wiarygodnych danych o stanie technicznym obiektu umożliwia wykorzystanie modelu teoretycznego lub numerycznego obiektu [3]. Kompleksowe dane o stanie obiektu można uzyskać przez rozwiązanie problemu odwrotnego lub przyjęcie modelu referencyjnego, opisującego stan konstrukcji nieuszkodzonej. Wykorzystanie modeli numerycznych obiektu umożliwia sprawdzanie warunków stanu granicznego użytkowania i nośności.



Rys. 1. Przykładowy schemat systemu monitoringu technicznego

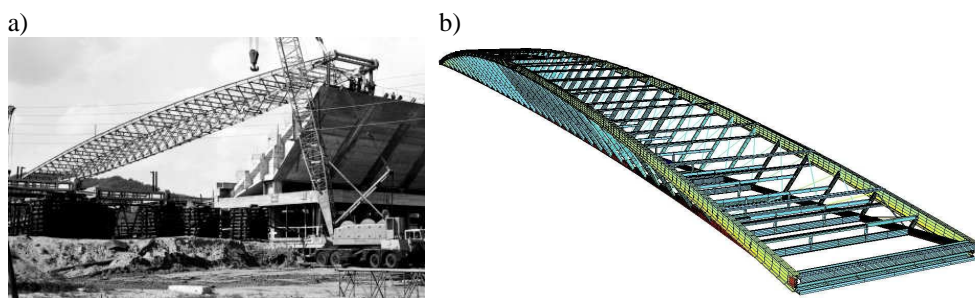
Celem niniejszego artykułu jest przedstawienie wykorzystania systemu MT do analizy zachowania się konstrukcji dachu Hali „Olivia” w trakcie demontażu poszycia. Wyniki pomiarów przedstawione są łącznie z symulacjami numerycznymi wykonanymi dedykowanym programem MES wykorzystanym w module ekspertowym systemu MT Hali Olivia (system SMT Olivia – 2, [6]).



Rys. 2. Konstrukcji dachu Hali „Olivia” w Gdańsku

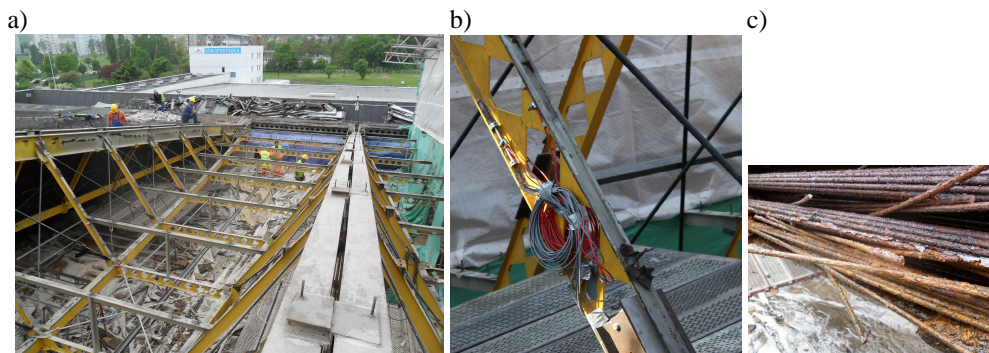
2. Opis Hali „Olivia”

Hala Olivia składa się z żelbetowej konstrukcji trybun i stalowej prętowo-ciężnowej konstrukcji dachu (rys. 2). Główne elementy nośne dachu stanowi lekka i piękna, przestrzenna konstrukcja zbudowana z płaskich, nachylonych względem siebie, sprężonych soczewkowych dźwigarów kratowych. Rozpiętość dźwigarów w kładzie wynosi 78,54 m, a wysokość konstrukcyjna w osiach pasów zmienia się według paraboli, w teoretycznie zakresie od 0 m na podporach do 4 m w środku rozpiętości. Na etapie montażu pokrycia wyróżniono dwa typy dźwigarów D-1 oraz D-2, które zespolono w stanie docelowym, zapewniając przestrzenną pracę ustroju, jako układu strukturalnego usytuowanym pomiędzy osiami B i K, natomiast D-2 jest dźwigarem skrajnym o położeniu A-B i K-L. Zdjęcie dźwigara D1 pokazane jest na rys. 3a. Wizualizacja dźwigara D1 w programie SOFiSTiK przedstawiona jest na rys. 3b.



Rys. 3. a) Dźwigar D1 po umieszczeniu na stanowisko docelowe (www.trojmiasto.pl) b) Wizualizacja modelu obliczeniowego dźwigara dachowego D-1 (SOFiSTiK)

W roku 2004 zaobserwowano niepokojące deformacje słupków skrajnego dźwigara dachu hali. Postępujący proces deformacji kolejnych słupków był powodem podjęcia w 2008 r. ekspertyzy technicznej dotyczącej stanu konstrukcji całego obiektu, ze szczególnym ukierunkowaniem konstrukcji dachu. W 2008 roku podjęto decyzję o remoncie dachu hali oraz o zainstalowaniu systemu monitoringu technicznego w celu podniesienia bezpieczeństwa użytkowania obiektu.

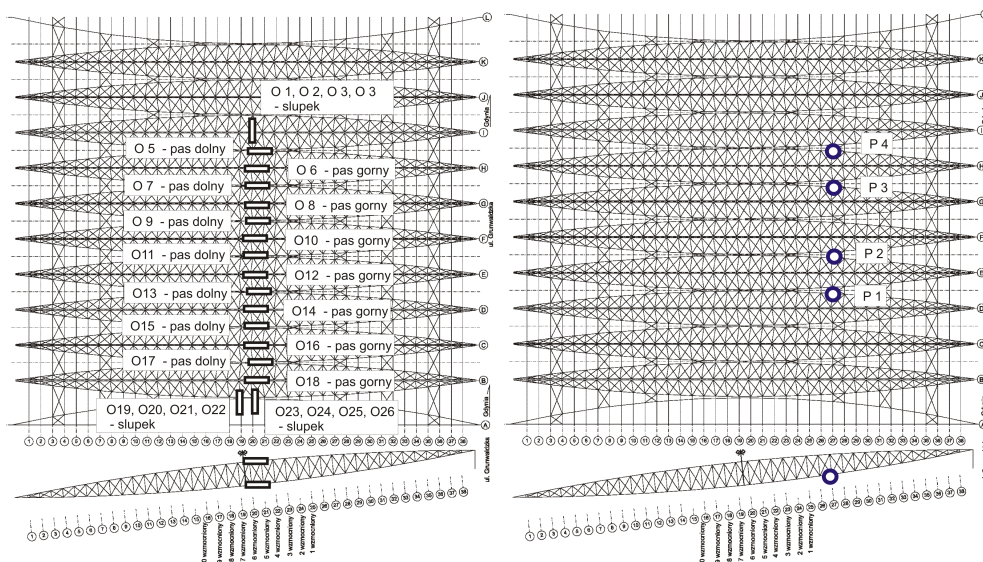


Rys. 4. Dach hali w trakcie demontażu poszycia a) widok ogólny b) słupek ażurowy z czujnikiem odkształceń c) zdjęcie cięgien sprężających

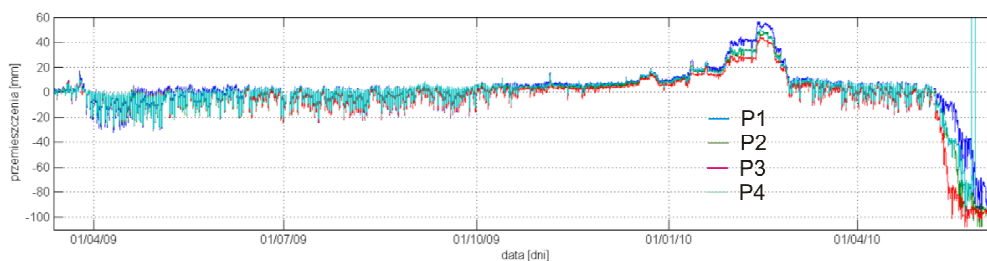
W roku 2010 rozpoczął się remont dachu hali. Zdjęcie pokazane na rys. 4a przedstawia usunięte elementy poszycia z dźwigara na osi E oraz fazę demontażu płyt azbestowo-cementowych z dźwigara leżącego w osi D.

3. System monitoringu technicznego SMT OLIVIA-2

Konfiguracja systemu SMT OLIVIA-2 została przedstawiona w pracy [6] (rys. 5). Do celów analizy procesu demontażu wykonano korektę położenia czujników odkształceń. Strunowe czujniki odkształceń zainstalowane na dźwigarze K i J zostały przeniesione na środkowy słupek dźwigara I. Czujniki, sztuk 4, zostały założone w środku rozpiętości słupka po dwa czujniki na pasie dolnym i górnym dwuteownika ażurowego (rys. 4b).



Rys. 5. Położenie czujników przemieszczeń i odkształceń na rzucie dachu hali



Rys. 6. Zarejestrowane zmiany ugięć konstrukcji dachu w punktach P1 – P4, w okresie 12.03.2009–06.06.2010

Analiza danych z okresu kwiecień – październik 2009 (rys. 6) wskazuje, że trend temperaturowy nie wpływa na opisaną bezwzględnie przemieszczeniami odpowiedź konstrukcji. Ekstremalny dobowy przyrost ugięcia konstrukcji w punktach P1-P4 wyniósł 32 mm. Potwierdza to, że konstrukcja zachowuje się jako układ zewnętrznie statycznie wyznaczalny, natomiast wewnętrznie statycznie niewyznaczalny. Reaguje on na dobowe gradienty

temperatury, a nie na roczne jej zmiany. Maksymalne ugięcie konstrukcji pomierzone w punkcie P1, wynikające z zalegania śniegu, pomierzono w dniu 13.02.2009 i wyniosło ono 56,42 mm.

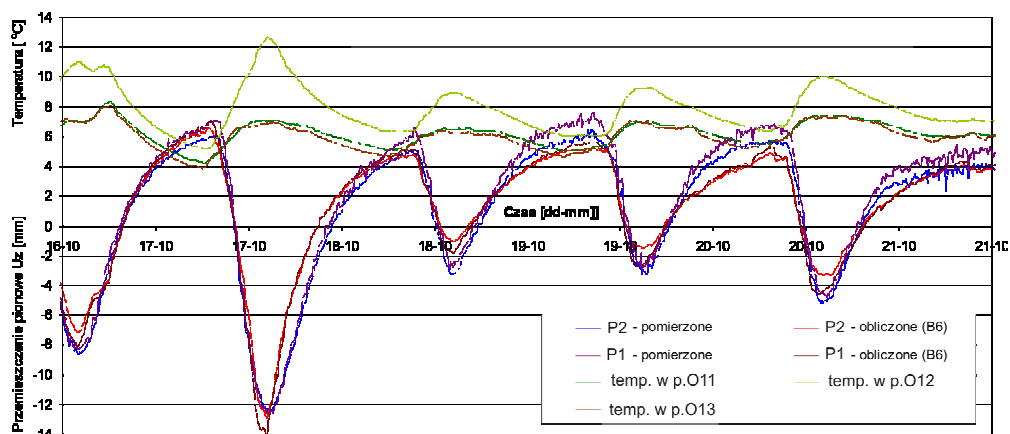
4. Symulacje konstrukcji dachu Hali „Olivia”

Modele numeryczne konstrukcji dachu wykonano za pomocą komercyjnego programu SOFiSTiK oraz autorskiego programem B6 wykonanego dla potrzeb sytemu ekspertowego SMT OLIVIA-2. Model wykonany programem SOFiSTiK, dla pojedynczego dźwigara, posiada 2684 węzłów. W programie wykorzystano 2-węzłowe przestrzenne elementy belkowe w liczbie 2400 oraz 2-węzłowe przestrzenne elementy typu kratowo-ciężnowego w liczbie 632.

W autorskim modelu, utworzony programem B6, zastosowano elementy 4-węzłowe przestrzenne prętowe elementy skończone z uwzględnieniem mimośrodów osi oraz 2-węzłowe przestrzenne elementy typu kratowo-ciężnowego. Obliczenia programem B6 przeprowadzono na tej samej siatce węzłów 2684 z użyciem własnych elementów belkowych w liczbie 800 i ciężnowych w liczbie 632 (dla pojedynczego dźwigara).

W symulacji numerycznej modelem numerycznej konstrukcji „obciążono”: ciężarem własnym, siłą sprężenia kabli, siłą sprężenia stężeń ciężnowych typu X. Obliczenia przeprowadzone w zakresie nieliniowym uwzględniając możliwość wystąpienia efektu wyłączania się elementów stężeń ciężnowych typu X. Model autorski zawierał elementy zastępcze modelujące współpracę z konstrukcją stalowej dachu z płytami azbestowo-cementowymi. Parametry opisujące współpracę tafli poszycia z konstrukcją dobrano wykorzystując metody iteracyjno-heurystyczne. Obliczenia konstrukcji dachu wykonywano na modelu złożonym z 5 dźwigarów.

Wyznaczenie wpływu zmian temperatur na przemieszczenia i odkształcenia monitorowanej konstrukcji dachu hali Olivii stanowiło główną trudność w zakresie symulacji numerycznych. Na podstawie zarejestrowanych zmian temperatur ustalono regułę rozkładu przestrzennego i zaimplementowano ją w ramach modelu MES odpowiednio identyfikując zmienne i przeprowadzając walidację tych rozkładów.



Rys. 7. Zarejestrowane i obliczone (B6) zmiany przemieszczeń pionowych i temperatury konstrukcji dachu w okresie 16÷21.10.2009 r. (powodowane jedynie obciążeniem termicznym)

Pomiarem odniesienia wpływu temperatury na zachowanie konstrukcji, tak jak pozostałych mierzonych wielkości, był pomiar wykonany w dniu 12.03.2009, kiedy to pierwszy raz

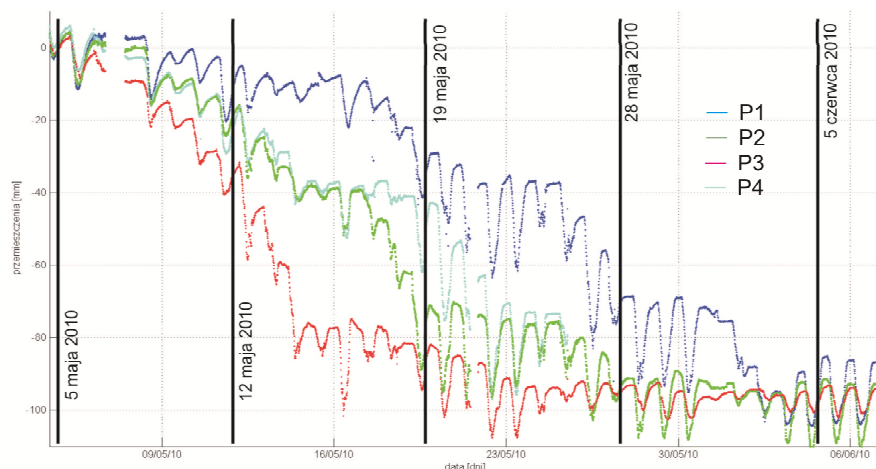
zarejestrowano wyniki z wszystkich punktów monitoringu temperatury dachu. Na potrzeby określenia rozkładu przestrzennego pola temperatur w początkowym okresie monitoringu prowadzono również kontrolny pomiar temperatury stref podporowych, tj. połączenie pasa górnego z dolnym oraz w punktach pośrednich rozmieszczonych wzdłuż dźwigarów. Potwierdziły one prawidłowość założonej tezy, że temperatura węzłowa dźwigarów jest średnią arytmetyczną temperatury pasa górnego i dolnego danego dźwigara w środku rozpiętości oraz że rozkład temperatury wzdłuż dźwigara dobrze przybliża krzywa paraboliczna. Wyniki obliczeń wpływu temperatury na przemieszczenia punktów P1 i P2 pokazane zostały na rys. 7.

W tablicach 1 i 2 zestawiono wartości z pomiarów wykonanych każdorazowo kilka minut przed rozpoczęciem procesu odśnieżania oraz z obliczeń programem B6 dla tzw. Równoważnej grubości pokrywy śniegu, ogólnie mówiąc oszacowanej na podstawie pomiarowej reakcji konstrukcji.

Tablica 1. Zarejestrowane i obliczone (B6) przyrosty przemieszczeń po opadach śniegu

Data	Punkt pomiarowy	w_{pomiar} [mm]	w_{B6} [mm]	w_{pomiar} / w_{B6} [%]
25.03.2009	P1	17.12	17.98	95
	P2	13.89	15.22	91
04.02.2010	P1	44.34	46.47	95
	P2	34.89	37.71	92
13.02.2010	P1	56.42	59.10	94
	P2	47.56	50.09	95

Przykładowo w dniu 25.03.2009 r. po obfitych opadach śniegu ugięcie w punkcie P1 wyniosło 17,12 mm (względem wartości odniesienia), zaś wyniki obliczeń z modułu numerycznego określiły równoważną grubość śniegu powodującą to ugięcie na 66 mm. Wizualnie oględziny na dachu potwierdziły zgodność obliczeniowej warstwy śniegu z grubością faktycznie zalegającego śniegu. Największy zarejestrowany przyrost ugięć zarejestrowano 13.02.2010 r. w punkcie P1, który wyniósł 56,42 mm. Obliczenia wskazały na 59,10 mm oraz równoważną grubość pokrywy śniegu na 398 mm, co potwierdziło się w wizji lokalnej realizowanej za pomocą systemowych kamer i geodezyjnych łat pomiarowych umieszczonych na połaci dachu.



Rys. 8. Zarejestrowane zmiany ugięć konstrukcji dachu w dniach od 04.05.2010 do 07.06.2010 (demontaż poszycia dachu i obciążenie termiczne)

Tablica 2. Zarejestrowane i obliczone (B6) przyrosty przemieszczeń w trakcie remontu

Data	Punkt pomiarowy	w_{pomiar} [mm]	w_{B6} [mm]	w_{pomiar} / w_{B6} [%]
05.05.2010	P1	-1.82	-1.12	163
	P2	-1.76	-1.65	107
12.05.2010	P1	-13.21	-21.61	61
	P2	-28.12	-38.24	74
19.05.2010	P1	-35.64	-63.31	56
	P2	-76.94	-97.16	79
28.05.2010	P1	-75.04	-69.05	109
	P2	-94.58	-104.52	90
05.06.2010	P1	-97.22	-99.35	98
	P2	-98.11	-117.63	83

W celu porównania przemieszczeń konstrukcji obliczeniowych i pomierzonych (tab. 2) wybrano reprezentatywne punkty czasowe, kiedy ingerencja na odpowiedź konstrukcji ze strony prac remontowych (jak piaskowanie, spawanie, suszenie itp.) była określona, co do aktualnego schematu obciążenia – 5 maja, 12 maja, 19 maja, 28 maja oraz 5 czerwca 2010.

5. Uwagi końcowe

W artykule przedstawiono wyniki pomiarowe i numeryczne uzyskane w trakcie monitoringu konstrukcji dachu Hali „Olivia” obejmującego okres przed remontem jak i w trakcie prac remontowych. Uzyskano dobrą zgodność pomierzonych i obliczeniowych przyrostów ugięć konstrukcji, jednak nie było możliwe uzyskanie zgodności dla odkształceń. Powodem tych trudności może być nieznana historia rzeczywistych deformacji konstrukcji dachu jak również brak szczegółowej wiedzy o lokalnych danych materiałowych. W trakcie prac remontowych ujawniono, że niektóre cięgna sprężające były w znacznym stopniu skordowane (rys. 4c).

Literatura

1. Cempel C.: Diagnostyka Wibroakustyczna Maszyn, PWN, Warszawa 1989.
2. Wilde, K.: Możliwości zastosowania systemów monitoringu technicznego w infrastrukturze elektroenergetycznej, Acta Energetica, vol. 02, s. 107÷114, 2009.
3. Doebling, S., Farrar, C., Prime, M.: A Summary Review of Vibrational Based Damage Identification Methods, The Shock and Vibration Digest, vol. 30, s. 91÷105, 1998.
4. Uhl T.: Structural Health Monitoring (SHM) – a new interdisciplinary approach to damage detection in mechanical structures, Pomiary, Automatyka, Kontrola vol. 55 (9), s. 703÷706, 2009.
5. Świdziński W., Świerczewski W. and Janicki K., Rozbudowa obiektu Hydrotechnicznego oparta na metodzie obserwacyjnej na przykładzie składowiska Żelazny Most. Bezpieczeństwo zapór – bezpieczeństwo ludności i środowiska, Monografie Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej, s. 98÷112. 2009.
6. Wilde K., Rucka M., Chróścielewski J., Jasina M., Malinowski M., Miśkiewicz M., Wilde M., System ciągłej obserwacji stanu technicznego hali „Olivia” w Gdańsku, Inżynieria i Budownictwo, 10, s. 552÷556, 2009.