

PIOTR WITAKOWSKI\*

## ZDALNE POMIARY PRZEMIESZCZEŃ OBIEKTÓW BUDOWLANYCH

---

### REMOTE MEASUREMENTS OF DISPLACEMENTS OF BUILDING STRUCTURES

#### Streszczenie

W artykule przedstawiono system zdalnego pomiaru przemieszczeń konstrukcji budowlanych. System wchodzi w skład ogólniejszego systemu kompleksowego zarządzania jakością w budownictwie. Opisano zasadę pomiaru, aparaturę i oprogramowanie wykorzystywane w systemie. Przedstawiono pierwsze testy wykonane w laboratorium i *in situ* na placu budowy.

*Słowa kluczowe: konstrukcja budowlana, system pomiarowy, pomiar przemieszczeń, kamera*

#### Abstract

The paper presents a system for remote measurements of displacements of building structures. The system is a part of general system for total quality management in civil engineering. The rule of measurement, apparatus and software used in the system has been described. The first laboratory tests and tests made *in situ* are presented.

*Keywords: building structure, measurement system, measurement of displacement, camera*

---

\* Dr hab. inż. Piotr Witakowski, prof. AGH, Instytut Techniki Budowlanej, Warszawa.

## 1. Przemieszczenia obiektów budowlanych jako kryterium bezpieczeństwa

Rosnące wymagania jakościowe wobec obiektów budowlanych mają zapewnić ich trwałość i bezpieczeństwo użytkowania. Samo pojęcie jakości w przypadku obiektu budowlanego, aczkolwiek intuicyjnie dobrze wyczuwalne, nie ma jednoznacznej, ogólnie przyjętej definicji. Podstawę dla takiej definicji mogą jednak stanowić wymagania podstawowe, jakie określone zostały pierwotnie w dyrektywie Unii Europejskiej [1], a następnie wprowadzona do polskiego prawa budowlanego w ustawie o tej samej nazwie [2]. Na owe wymagania podstawowe składają się:

- 1) nośność i stateczność,
- 2) bezpieczeństwo pożarowe,
- 3) higiena i ochrona środowiska,
- 4) bezpieczeństwo użytkowania,
- 5) ochrona przed hałasem,
- 6) oszczędność energii i izolacja cieplna.

Wymagania te powinny być spełnione zarówno w czasie budowy, jak i eksploatacji obiektu.

Często przyjmuje się, że jakość jest to zespół cech i charakterystyk wyrobu lub usługi, które noszą w sobie zdolność zaspokojenia określonej potrzeby. W odniesieniu do obiektu budowlanego jakość może być określona jako *stopień doskonałości w spełnieniu wymagań podstawowych*. Przy tak rozumianej jakości można stwierdzić, że krańcowo niska jakość może wywołać katastrofę budowlaną. Zgodnie z art. 73. 1. ustawy Prawo budowlane [2] katastrofą budowlaną jest niezamierzone, gwałtowne zniszczenie obiektu budowlanego lub jego części, a także konstrukcyjnych elementów rusztowań, elementów urządzeń formujących, ścianek szczelnych i obudowy wykopów. Widać więc, że katastrofą budowlaną jest brak spełnienia pierwszego wymagania podstawowego, czyli utrata nośności lub stateczności budowli. Podkreślenia wymaga fakt, że zagrożenie katastrofą budowlaną występuje zarówno w fazie realizacji obiektu, jak też jego eksploatacji.

Bezpieczeństwo obiektów budowlanych może być oceniane na podstawie wielu kryteriów. Zawsze jednak musi się wyrażać w postaci pewnego warunku, zgodnie z którym jakaś mierzalna cecha fizyczna powinna mieścić się w określonych granicach uznawanych za granice bezpieczeństwa.

Ponieważ katastrofy budowlane polegają na gwałtownej zmianie geometrii budowli (np. złamanie, zawalenie, przewrócenie itp.), najbardziej naturalnym kryterium bezpieczeństwa jest kryterium przemieszczeniowe. W miarę wzrostu obciążenia przemieszczenie wybranych punktów zmienia się nieznacznie i liniowo (odpowiada to pracy sprężystej konstrukcji), następnie nieco szybciej (odpowiada to uplastycznieniu i powstawaniu przegubów plastycznych) i wreszcie gwałtownie (jest to równoznaczne z katastrofą budowlaną). Projektant może obliczyć, jakie przemieszczenie odpowiada obciążeniu dopuszczalnemu. Wystarczy więc kontrolować przemieszczenie wybranych przez projektanta punktów kontrolnych, aby stwierdzić, czy zachowane jest kryterium bezpieczeństwa konstrukcji.

## 2. System jakości a monitoring

Postęp technologiczny, jaki obserwuje się we wszystkich dziedzinach produkcji, jest bezpośrednio związany z rozwojem systemów jakości i implementacją teleinformatyki. Można mówić, że istnieją dwie lokomotywy postępu – teleinformatyka i systemy jakości. Wśród systemów jakości można wyróżnić 4 poziomy. Są to:

- 1) systemy kontroli jakości – systemy te sprowadzają się do eliminacji złych wyrobów po zakończeniu produkcji,
- 2) systemy zapewnienia jakości – systemy te oparte są na normach ISO z 1994 r. i sprowadzają się do ustalenia procedur wykonawczych i ich przestrzegania w czasie produkcji,
- 3) systemy zarządzania jakością – systemy te oparte są na normach ISO z 2000 r. i charakteryzują się podejściem procesowym i stałym doskonaleniem procesów,
- 4) systemy kompleksowego zarządzania jakością – TQM (*Total Quality Management*), przy których cały proces produkcji jest zorganizowany według kryterium maksymalnej jakości.

Obecnie wszystkie liczące się firmy wykonawcze w budownictwie działają na podstawie systemów zarządzania jakością i posiadają certyfikaty ISO 2000. Ponieważ troska o podnoszenie poziomu jakości przynosi wykonawcy korzyści rynkowe, obserwuje się stałą tendencję do zwiększania rangi jakości i zmierzania do wprowadzania systemów TQM na wzór tych gałęzi przemysłu, w których stawia się najwyższe wymagania jakościowe.

Ze względu na specyfikę budownictwa system zarządzania jakością w budownictwie musi mieć 4 cechy:

- wielodostęp do informacji o jakości – każdy z uczestników procesu budowlanego powinien mieć zapewniony niezależny dostęp do informacji,
- niezależność dostępu do informacji od położenia i czasu,
- bezpieczeństwo informacji,
- szybkość działania – interwencja w sytuacji zagrożenia naruszenia jakości powinna być na tyle szybka, aby usunąć zagrożenie.

Ten ostatni warunek ma szczególne znaczenie w przypadku budownictwa betonowego.

System zarządzania jakością wymaga tu przestrzegania 3 zasad:

**ZASADA 1.** Pomiary należy wykonywać *in situ*.

**ZASADA 2.** Przetwarzanie należy wykonywać w centrum.

**ZASADA 3.** Decydowanie należy umożliwiać przy osobie.

Pierwsza z tych zasad mówi, że pomiary i obserwacje istotne z punktu widzenia jakości należy wykonywać na placu budowy lub w miejscu użytkowania. O wyniku pomiaru i ocenie rzeczywistej sytuacji decydują bowiem warunki pomiaru, w jakich jest on wykonywany – inne warunki panują w laboratorium, a inne na placu budowy.

Druga zasada mówi, że przetwarzanie wyników pomiarów należy wykonywać w centrum obliczeniowo-pomiarowym. Do kompleksowej analizy niezbędne jest bowiem wykorzystanie wszystkich dostępnych informacji, a więc pochodzących: a) z różnych pomiarów, b) z różnych miejsc i c) z różnych czasów.

Wreszcie trzecia zasada mówi, że podejmujący decyzje (decydent) musi mieć udostępniony komplet informacji niezwłocznie i w tym miejscu, w którym aktualnie przebywa. Tylko w tym przypadku jego decyzje mogą wpłynąć na przebieg procesu technologicznego

na placu budowy i przywrócenie warunków zapewniających spełnienie wymagań jakościowych. Oznacza to, że zarządzanie jakością w budownictwie wymaga monitorowania potencjalnych zagrożeń dla obiektu.

Ostatnie lata są okresem bardzo dynamicznego rozwoju systemów monitorowania w wielu dziedzinach gospodarki. Przeciętny człowiek styka się z nimi najczęściej w obiektach handlowych lub w obiektach, do których dostęp podlega ochronie, ale są one stosowane również w wielu gałęziach przemysłu i nauki – wszędzie tam, gdzie stała obecność człowieka nie jest możliwa, a informacja z tego miejsca musi być pobierana w sposób nieprzerwany. Monitoring często mylony jest z obserwacją. Trzeba więc podkreślić, że monitoring nie jest obserwacją, aczkolwiek w skład monitoringu wchodzi obserwacja. Monitoring (od łac. *monitor* – ostrzegający, przypominający) jest to działalność mająca na celu wykrywanie zagrożeń. Co za tym idzie niezbędne przy monitoringu jest wcześniejsze ustalenie rodzaju zagrożenia – określenie **warunku monitoringu** – i dostosowanie systemu monitorowania do tego zagrożenia oraz ustalenie sposobu informowania o zagrożeniu. System monitoringu musi się więc składać zawsze z dwóch podsystemów: obserwacyjnego i ostrzegawczego. Podsystem obserwacyjny musi umożliwiać pozyskiwanie informacji stosownych do rodzaju potencjalnego zagrożenia. System ostrzegawczy musi być wyposażony w możliwość analizy obserwacji, porównywania jej ze stanami alarmowymi i przekazywania informacji o wystąpieniu stanów alarmowych pod z góry ustalone adresy.

Systemy monitorowania coraz częściej stosowane są również w budownictwie. Spośród 5 etapów, które składają się na cykl życia obiektu budowlanego (tj.: koncepcja, projektowanie, realizacja, eksploatacja, rozbiórka), z punktu widzenia potrzeb monitoringu najważniejsze znaczenie mają etapy realizacji i eksploatacji. W etapie realizacji monitorowanie obiektu jest konieczne dla wprowadzenia systemów zarządzania jakością. W etapie eksploatacji najważniejszym celem monitorowania jest zapobieganie katastrofom budowlanym. W każdym z tych etapów istnieją jednak inne zagrożenia [3], a co za tym idzie, inaczej musi być sformułowany warunek monitoringu. W fazie realizacji największe zagrożenia mogą się pojawić z powodu utraty monolityczności w konstrukcjach betonowych i żelbetonowych oraz zagrożenie w wyniku utraty stateczności. W fazie eksploatacji największe zagrożenia to zagrożenie pożarowe i zagrożenie utraty nośności i stateczności konstrukcji.

Niezależnie do wspomnianych zagrożeń związanych z bezpieczeństwem konstrukcji, systemy monitorowania w etapie realizacji zaczynają być stosowane na placu budowy wszędzie tam, gdzie trwają procesy decydujące o jakości prac [4,5]. Natomiast w etapie eksploatacji systemy takie często są stosowane tam, gdzie toczą się procesy decydujące o trwałości obiektu i jakości jego użytkowania [6].

W każdym przypadku podstawowe znaczenie mają systemy zdalnego monitoringu (ang. *Remote Monitoring System*), a w przypadku zabezpieczania obiektów budowlanych przed stanami awaryjnymi znaczenie ma wyłącznie monitoring zdalny. Przy takim monitoringu obserwator jest w miejscu na tyle odległym od miejsca obserwacji, że przekaz informacji z obiektu monitorowanego do obserwatora wymaga zastosowania odrębnej technologii transmisji. Do obserwatora może być przekazywana całość zaobserwowanej informacji lub też jedynie informacja wytworzona przez podsystem ostrzegawczy.

W każdym przypadku na system zdalnego monitoringu RSM składają się zawsze 4 segmenty [3]:

- 1) segment obserwacji (czujnika),
- 2) segment transmisji,

- 3) segment analizy (centrali),
- 4) segment dystrybucji.

Segment obserwacji obejmuje wszelkie instalacje na obiekcie – czujniki, sondy, rejestratory, modemy, okablowanie itp. Rodzaj i rozmieszczenie czujników pomiarowych muszą być dostosowane do warunku monitoringu. Segment transmisji odpowiada za przekazanie obserwacji wykonanych przez segment obserwacji do ośrodka, w którym analizowane są poczynione obserwacje i identyfikowane jest potencjalne zagrożenie określone przez warunek monitoringu. Segment analizy obejmuje centralę systemu wraz z niezbędnym oprogramowaniem umożliwiającym analizę zaobserwowanych wyników. Segment dystrybucji powinien umożliwiać przekazywanie wyników analizy w dowolne miejsce kraju. W systemach internetowych, tj. gdy segment transmisji wykorzystuje Internet, również segment dystrybucji działa za pomocą tego samego medium. Jeśli w segmencie transmisji wykorzystywany jest Internet, wówczas system nazywa się **systemem internetowym**.

Spośród wszystkich systemów zdalnego monitorowania na szczególną uwagę zasługują systemy monitoringu wizualnego (ang. *Remote Video Monitoring*), określane symbolem RVM. Obserwuje się bardzo dynamiczny rozwój tych systemów i szerokie zastosowanie w różnych dziedzinach gospodarki. W systemach tych obserwacje są obrazami zdjętymi (zarejestrowanymi) przez urządzenia wizyjne – czujnikami są tu kamery lub aparaty fotograficzne. Dzięki temu systemy te mogą dostarczać znacznie większej obfitości informacji niż inne. Równoczesny rozwój urzędzeń wizyjnych i powstanie systemów telewizji przemysłowej CCTV (ang. *CCTV – Close Circuit Tele-Vision*) umożliwiło zastosowanie tych systemów w wielu dziedzinach i powoduje nadal stale rosnące potrzeby w zakresie monitoringu wizyjnego. Jednym z obszarów zastosowania tych systemów jest monitoring obiektów budowlanych.

### 3. Centrum usług zarządzania jakością w budownictwie

W Instytucie Techniki Budowlanej od 10 lat trwają prace zmierzające do budowy Centrum Usług Zarządzania Jakością w Budownictwie [7, 8]. Zakres świadczonych usług ma przede wszystkim obejmować wszystkie rodzaje budownictwa betonowego jako tego budownictwa, które stawia największe wymagania systemom jakości i dotyczyć w pierwszym etapie fazy realizacji dla tego budownictwa. W dalszej kolejności zakres usług ma być rozszerzony na inne rodzaje budownictwa i na fazę eksploatacji. Zasięg działania tego Centrum w toku dotychczasowych prac został najpierw sprawdzony przy monitorowaniu budów położonych na terenie Warszawy, a następnie przy monitorowaniu budów położonych w innych miastach (Kraków, Wrocław, Poznań). Nie natrafiono na trudności, które uniemożliwiałyby monitorowanie budów położonych w dowolnym punkcie Europy, jeśli tylko w punkcie tym można zapewnić łączność internetową lub GSM. Centrum stanowi w istocie wiele zintegrowanych systemów monitorowania połączonych wspólnym segmentem analizy (segmentem centrali). Segment ten, z którym komunikują się urządzenia pomiarowe i obserwacyjne rozmieszczone na budowach, położony jest na terenie ITB. Segment transmisji oparty jest na sieci GSM i Internecie. Zasadniczym zadaniem systemu informatycznego Centrum jest umożliwienie zdalnego zarządzania jakością, a centralną

jego częścią jest globalna baza danych i obsługujące ją oprogramowanie. Strukturę informatyczną Centrum przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1

### Struktura informatyczna Centrum

|                                  |  |
|----------------------------------|--|
| System zarządzający centrum      |  |
| Baza danych                      | system zarządzania bazą danych                   |
|                                  | a. podsystemy zarządzające dla szj               |
|                                  | b. podsystemy zdalnego pomiaru                   |
|                                  | c. podsystemy laboratoryjne                      |
|                                  | d. podsystemy obliczeniowe                       |
|                                  | system powiązania inwestycji z terenem – MAPINFO |
| oprogramowanie wirtualnej budowy |  |

Zlokalizowanie w Centrum zarówno bazy danych, jak też oprogramowania analitycznego umożliwi obsługę systemu przez wykwalifikowany personel oraz pielęgnację i doskonalenie oprogramowania. Zasadniczą zaletą jest jednak fakt, że rozwiązanie takie pozwala na prowadzenie analiz:

- 1) na podstawie obserwacji i pomiarów wykonanych w tym samym czasie przez różne systemy pomiarowe (analiza kompleksowa),
- 2) na podstawie obserwacji i pomiarów wykonanych przez ten sam system pomiarowy, lecz w różnym czasie (analiza historyczna),

gdyż w tej samej bazie gromadzone są wyniki pochodzące z różnych czasów i z różnych systemów. Umożliwia to prowadzenie analiz praktycznie niewykonalnych dla wielu oddzielnych systemów monitorowania.

Spośród wszystkich systemów informatycznych składających się na Centrum za możliwość zdalnego działania odpowiedzialne są PODSYSTEMY ZDALNEGO POMIARU. W zależności od rodzaju mierzonej wielkości podsystemy te muszą być wyposażone w inny segment obserwacji i dysponować innymi czujnikami. W założeniach Centrum powinno umożliwiać monitorowanie wszystkich wielkości interesujących dla inżyniera z punktu widzenia zarządzania jakością [6, 7]. Do chwili obecnej zostały skonstruowane i funkcjonują następujące podsystemy zdalnego pomiaru:

- podsystem pomiaru temperatury (SPT),
- podsystem pomiaru wytrzymałości (SPD),
- podsystem pomiaru położenia (GPS),
- podsystem zdalnej obserwacji wizualnej (ZOW),
- podsystem pomiaru wilgotności (SPW),
- podsystem pomiaru rezystancji (SPR).

Przewiduje się wyposażenie Centrum w dalsze podsystemy zdalnego pomiaru, a w szczególności:

- podsystem pomiaru przemieszczeń,
- podsystem pomiaru odkształceń,
- podsystem pomiaru przyspieszeń,
- podsystem pomiaru siły,
- podsystem pomiaru ciśnienia.

Obecnie najbardziej zaawansowane są prace nad budową podsystemu zdalnego pomiaru przemieszczeń.

#### 4. Projekt badawczo-rozwojowy

W 2008 roku Instytut Techniki Budowlanej i Instytut Mikromechaniki i Fotoniki, Wydziału Mechatroniki Politechniki Warszawskiej przystąpiły do realizacji projektu badawczo-rozwojowego zatytułowanego „System i czujniki optoelektroniczne do zdalnego monitorowania i pomiarów przemieszczeń i odkształceń obiektów inżynierskich”. W wyniku realizacji projektu miały powstać 3 elementy:

1. Zdalnie sterowany system obserwacyjno-pomiarowy umożliwiający identyfikację i dokumentację zdarzeń oraz monitorowanie i pomiary pól przemieszczeń i odkształceń nadzorowanego obiektu lub jego parametrów. Zakładano, że system będzie wykorzystywał duże pole pomiarowe – rzędu kilku m<sup>2</sup>, a jego czułość będzie rzędu 1 mm.
2. Nowa generacja czujników optoelektronicznych (głowic pomiarowych) umożliwiająca lokalny pomiar pól przemieszczeń/odkształceń w wielu punktach badanej konstrukcji. Zakładano, że czujniki będą wykorzystywać małe pole pomiarowe – rzędu kilku mm<sup>2</sup>, a ich czułość będzie rzędu 1 mikrometra. Przewidywano też indywidualne zastosowanie czujnika do pomiaru pola przemieszczenia z czułością nanometrową.
3. System zdalnej transmisji i przetwarzania danych obsługujący systemy pomiarowe i czujniki do celów monitorowania, archiwizacji i wnioskowania o zdrowiu konstrukcji na przykładzie wybranych zastosowań w budownictwie.

Po analizie przyjęto, że całość projektu zostanie zrealizowana przez zbudowanie trzech różnych systemów pomiarowych działających na trzech różnych poziomach, których charakterystykę przedstawiono w tab. 2.

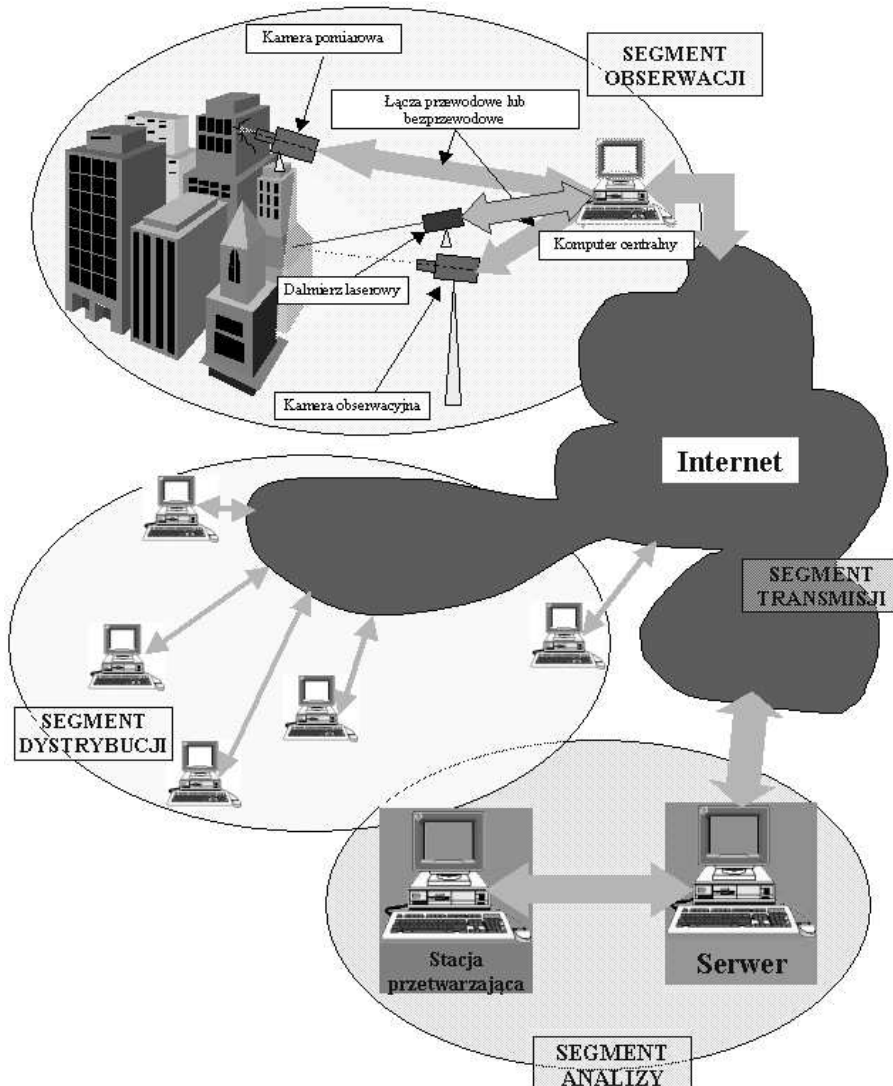
Tabela 2

##### Poziomy pomiarowe przy pomiarze przemieszczeń i odkształceń obiektów budowlanych

| Poziom | Nazwa      | Opis   | Dokładność pomiaru | Metoda pomiaru           |
|--------|------------|--|--------------------|--------------------------|
| A      | globalny   | obserwacja całego obiektu i pomiar przemieszczeń punktów charakterystycznych | 1 mm               | korelacja obrazów        |
| B      | lokalny    | obserwacja wybranego fragmentu o wymiarach 1m i pomiar pola odkształceń      | 1 μm               | metoda projekcji prążków |
| C      | precyzyjny | obserwacja wybranego fragmentu o wymiarach 1cm i pomiar pola odkształceń     | 1 nm               | siatki dyfrakcyjne       |

Kluczowe znaczenie dla całej koncepcji monitorowania i oceny bezpieczeństwa konstrukcji ma poziom globalny. Na tym poziomie następuje rozeznanie co do wielkości przemieszczeń wybranych punktów charakterystycznych i ocena, czy zaobserwowane przemieszczenia tych punktów mogą powodować zagrożenie utratą nośności i stateczności. Ponadto pomiary przemieszczeń tych punktów powinny umożliwić analizę wyężenia całej

konstrukcji i identyfikację pól i punktów najbardziej wyężonych, w których należy prowadzić pomiary odkształceń na poziomach lokalnym i precyzyjnym. Do pomiaru przemieszczeń na poziomie globalnym została opracowana autorska metoda o nazwie **metoda laserowo-wizyjna**. Schemat ideowy całego systemu działania na poziomie globalnym według tej metody przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Schemat Systemu Zdalnej Obserwacji Wizualnej (ZOW) i Systemu Zdalnego Pomiaru Przemieszczeń (ZPP)

Fig. 1. Scheme of Remote Visual Observation System and Remote Displacement Measurement System



## 5. Metody obserwacji przemieszczeń

Wszystkie metody pomiaru przemieszczeń podzielić można na dwie grupy:

- a) metody obserwacji przemieszczeń bezwzględnych,
- b) metody obserwacji przemieszczeń względnych.

W pierwszym przypadku system pomiarowy musi korzystać z nieruchomego układu odniesienia. W szczególności samo urządzenie pomiarowe powinno być umieszczone w punkcie nieruchomym. Na tej zasadzie przeprowadza się pomiary metodami geodezyjnymi – zakłada się, że samo urządzenie pomiarowe jest nieruchome, a przemieszczenia mierzy się w stosunku do nieruchomej sieci geodezyjnej. W przypadku drugim nie można przyjąć założenia, że punkt obserwacyjny jest nieruchomy, toteż mierzy się przemieszczenie między punktem obserwowanym a punktem obserwacyjnym.

Drugi podział metod pomiarowych wiąże się z faktem, czy podczas pomiaru musimy narzędziem pomiarowym dotknąć do punktu obserwowanego. Według tego kryterium metody pomiaru przemieszczeń dzieli się na metody dotykowe i bezdotykowe. Lista różnego rodzaju metod bezdotykowych jest długa. Do metod tych należą:

- 1) systemy satelitarne,
- 2) fotogrametria lotnicza,
- 3) geodezyjne pomiary liniowo-kątowe,
- 4) radar,
- 5) metody akustyczne,
- 6) metody izotopowe,
- 7) fotogrametria cyfrowa naziemna,
- 8) fotografia cyfrowa,
- 9) pomiary laserowe,
- 10) metody rentgenowskie,
- 11) tomografia,
- 12) rezonans magnetyczny,
- 13) metody ultradźwiękowe,
- 14) czujniki bezdotykowe zbliżeniowe,
- 15) czujniki podczerwieni,
- 16) inne.

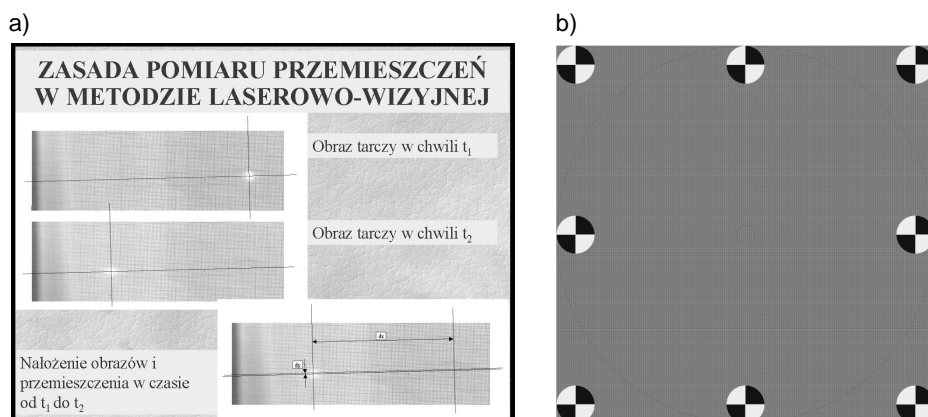
Metoda laserowo-wizyjna należy do metod bezdotykowych i w zależności od tego, czy źródło promienia laserowego jest nieruchome, czy ruchome pozwala na pomiar przemieszczeń bezwzględnych lub względnych.

## 6. Ogólna zasada pomiaru w metodzie laserowo-wizyjnej

W metodzie laserowo-wizyjnej zasada pomiaru polega na zamocowaniu na elemencie ulegającym przemieszczeniom tarczy celowniczej, którą oświetla się promieniem lasera z punktu nieruchomego. Przesunięcie plamki na tarczy jest miarą ruchu badanego elementu. Przesunięcie to jest ustalane metodą korelacji obrazów zarejestrowanych w systemie zdalnej obserwacji wizualnej ZOW (np. przez analizę porównawczą dwóch kadrów z kamery lub aparatu fotograficznego). Metodą tą można zmierzyć obie współ-

rzędne przemieszczenia w płaszczyźnie prostopadłej do osi promienia laserowego. Zasadę pomiaru i postać stosowanej tarczy celowniczej przedstawiono na rys. 2.

W wielu przypadkach znajomość dwóch współrzędnych przemieszczenia jest całkowicie wystarczająca. Dzieje się tak np. gdy monitorujemy ugięcie zginanego elementu. W przypadku gdy niezbędna jest znajomość wszystkich trzech składowych przemieszczenia, w miejsce znacznika laserowego stosuje się dalmierz laserowy. Współrzedną przemieszczenia równoległą do kierunku promienia lasera można wówczas odczytać jako różnicę wskazań dalmierza.



Rys. 2a) Zasada pomiaru przemieszczeń, b) postać stosowanej tarczy celowniczej

Fig. 2a) The rule of measurements, b) shape of the target shield applied

Wstępne wyniki wskazują, że przy odległości między emitерem i tarczą nie większej niż 50 m, dokładność pomiaru przemieszczenia w płaszczyźnie prostopadłej do promienia lasera może być lepsza od 1 mm – o dokładności decyduje ostrość rysunku tarczy i plamki. Dokładność pomiaru wzdłuż promienia zależy wprost od dokładności dalmierza. Dla stosowanego dalmierza DISTO 6A błąd przy odległości do 50 m nie przekraczał 1 mm.

## 7. Budowa systemu zdalnego pomiaru przemieszczeń

Obecnie System Zdalnego Pomiaru Przemieszczeń ZPP istnieje jedynie w postaci prototypu. Trwa jego testowanie i rozbudowa. Podstawowymi elementami zbudowanego systemu są:

- 1) dalmierz laserowy typu DISTO 6 prod. firmy Leica Geosystem,
- 2) kamera cyfrowa typu VIVOTEK IP7139 prod. firmy Vivotek,
- 3) oprogramowanie „Analizator przemieszczeń” wykonane przez firmę DELTA.

Zgodnie ze specyfikacją producenta rozdzielczość dalmierza DISTO A6 wynosi 1 mm, a jego dokładność na odległości do 200 m wynosi 1,5 mm. Jest to dokładność wystarczająca dla większości analiz dotyczących przemieszczeń elementów budowlanych. Podkreślenia wymaga fakt, że dalmierz przystosowany jest do pracy w trudnych warunkach atmosferycznych, a łączność z nim jest tylko bezprzewodowa w standardzie Bluetooth.

Stosowana kamera VIVOTEK oprócz łącza przewodowego RJ45 wyposażona jest w łączność bezprzewodową w standardzie Wi-Fi. Może przysyłać obrazy w standardzie MJPEG/MPEG4, przy czym jej rozdzielczość wynosi 1,3 Megapixels. Widok narzędzi pomiarowych pokazano na fot. 1.



Fot. 1. Narzędzia pomiarowe stosowane w systemie ZPP: a) dalmierz laserowy DOSTO A6, b) kamera cyfrowa VIVOITEK IP7139

Photo 1. Measurement tools used in ZPP system: a) laser telemeter DISTO A6, b) digital camera VIVOITEK IP7139

Prototyp urządzenia do zdalnego pomiaru przemieszczeń został wykonany przez firmę DELTA. Prototyp ten przedstawiony jest na fot. 2 po zdjęciu przezroczystego okna osłaniającego urządzenie pomiarowe. Na rysunku tym prototyp jest zmontowany na obrotnicy pozwalającej na dowolne ustawienie kierunku pomiaru w poziomie i pionie. Urządzenia pomiarowe i urządzenia łączności zawarte są w dużej obudowie przeznaczonej dla kamery. We wnętrzu obudowy widać w jej dolnej części kamerę z obiektywem, a nad nią dalmierz DISTO A6. Kamera ma wymienny obiektyw, więc każdorazowo można go dostosować do odległości, z jakiej monitoruje się przemieszczenia obiektu. Wewnątrz obudowy znajduje się również moduł łączności Wi-Fi (access point). Na górze obudowy widoczna jest antena modułu łączności.



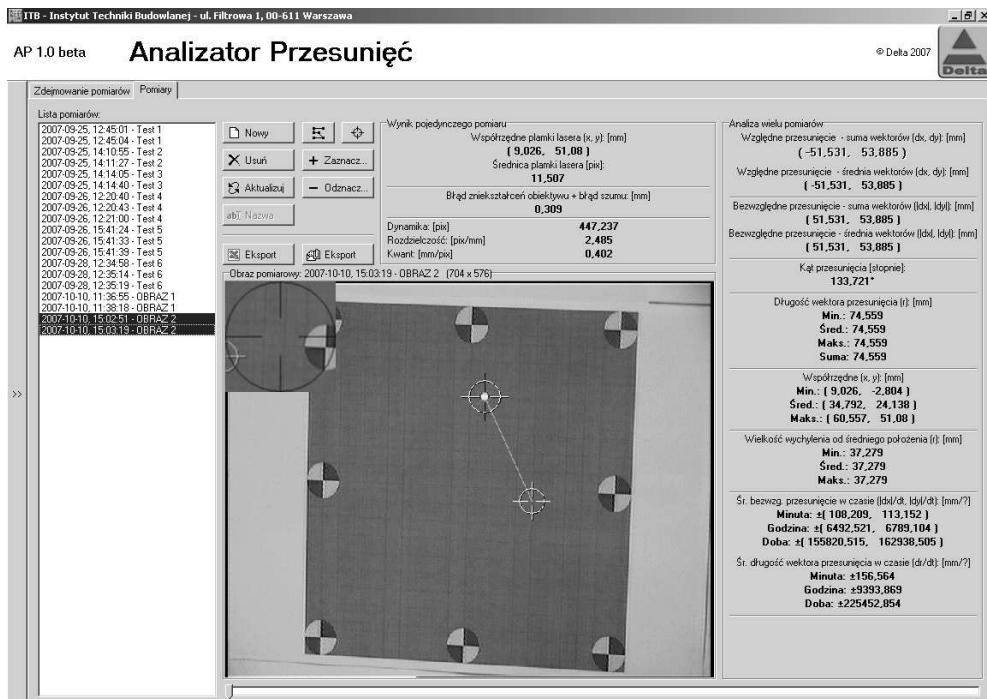
Fot. 2. Urządzenie do zdalnego pomiaru przemieszczeń

Photo 2. Device for remote measurement of displacements

Prototyp został oprogramowany przez firmę DELTA. Oprogramowanie o nazwie „Analizator Przemieszczeń” umożliwia porównywanie wielu obrazów tarczy i ustalanie przemieszczenia obiektu na podstawie położenia plamki lasera na tarczy celowniczej. Możliwość łączenia się z Internetem drogą radiową przez moduł Wi-Fi pozwala na badanie przemieszczeń obiektów budowlanych bez konieczności prowadzenia sieci przewodowej. Urządzenie wymaga wyłącznie doprowadzenia sieci zasilającej 230 V. Samo sterowanie pomiarami, obserwacja i analiza wyników pomiarów mogą odbywać się zdalnie za pośrednictwem Internetu z komputera ustawionego w dowolnym punkcie geograficznym.

## 8. Testy laboratoryjne

Prototyp urządzenia do zdalnego pomiaru przemieszczeń i jego oprogramowanie zostały przetestowane w warunkach laboratoryjnych przy badaniu przemieszczeń tarczy celowniczej o znaną wartość. Przykładowy zrzut ekranu podczas analizy przesunięcia między dwoma stanami przedstawiono na rys. 3. Program wyświetla obraz tarczy celowniczej i pokazuje na niej położenie plamki w każdym z dwóch stanów. Po prawej stronie ekranu wyświetlane są podstawowe informacje o wielkości i kierunku przesunięcia oraz o czasie, w jakim ono nastąpiło. Pozwala to na obliczanie szybkości przesunięcia. Ponadto w przypadku analizy większej liczby obrazów wyświetlane są wyniki analizy statystycznej dotyczącej przesunięć. Informacje te są bardzo przydatne w przypadku, gdy dokonuje się analizy drgań konstrukcji.



Rys. 3. Forma ekranowa z wynikami analizy przemieszczeń

Fig. 3. Screen form with results of displacement analysis

Badania laboratoryjne potwierdziły wszystkie założenia projektowe i wykazały przydatność systemu do badania przemieszczeń w warunkach placu budowy. Dokładność pomiaru przemieszczeń (w stosunku do zadanego przemieszczenia mierzonego suwmiarką) okazała się lepsza niż 1 mm.

## 9. Badania testowe na placu budowy

Przeprowadzono również badanie testowe Systemu Zdalnego Pomiaru Przemieszczeń w warunkach budowy. Badania przeprowadzono na terenie budowy Świątyni Opatrzności Bożej w Warszawie. Do wysokości około 20 m obiekt ten stanowią dwie oddzielnie pracujące żelbetowe, ażurowe konstrukcje o wspólnej pionowej osi. Konstrukcję wewnętrzną stanowi układ 32 słupów nachylonych do środka i połączonych wieńcem kilka metrów wyżej. Konstrukcję zewnętrzną stanowi pionowa ażurowa ściana połączona na wysokości 20 m galerią przeznaczoną do ruchu ludzi. Na tej wysokości obie konstrukcje miały być połączone układem rygli. Ze względu na pochylenie słupów konstrukcja wewnętrzna była w czasie budowy podparta stalową konstrukcją wsporczą i przed zabetonowaniem rygli należało częściowo usunąć to podparcie, co powodowało ich przesunięcie dośrodkowe. Przesunięcia to powinno być kontrolowane i było przedmiotem badania za pomocą systemu

Zdalnego Pomiaru Przemieszczeń. Podczas badania stanowisko dla dalmierza przyjęto na galerii konstrukcji zewnętrznej, a tarczę umieszczono na wieńcu konstrukcji wewnętrznej – por. fot. 3. Mierzono w ten sposób przemieszczenie konstrukcji wewnętrznej względem zewnętrznej.

a)



b)



Fot. 3a) Widok zewnętrzny konstrukcji, b) tarcza celownicza podczas pomiarów

Photo 3a) Outside view of structure, b) target shield during measurements

Przeprowadzone badania wykazały sprawność aparatury i zgodność zmierzonych przemieszczeń z wynikami niezależnie wykonanych pomiarów geodezyjnych.

## 10. Podsumowanie

Najważniejszym zadaniem dla systemów jakości w budownictwie jest zapobieganie katastrofom – dotyczy to zarówno etapu realizacji, jak i etapu eksploatacji. Rozwój teleinformatyki otwiera nowe możliwości dla zarządzania jakością w budownictwie, przy czym szczególnego znaczenia nabierają metody zdalnego monitorowania optycznego (*Remote Video Monitoring*). Zastosowanie internetowych systemów monitorowania po raz pierwszy w historii budownictwa uniezależniło dostęp do informacji o budowie od odległości i czasu. Systemy takie zapewniają szybkość przekazu informacji i podejmowania decyzji – wszyscy uprawnieni mają dostęp on-line. Przy monitorowaniu optycznym to samo instrumentarium może być wykorzystane do obserwacji dużych obiektów, jak też do precyzyjnego pomiaru odległości i przemieszczeń. Te same systemy mogą być stosowane zarówno w fazie realizacji, jak i w fazie eksploatacji obiektów.

Laserowo-wizyjna metoda pomiaru przemieszczeń może być zastosowana w każdych warunkach atmosferycznych, a w połączeniu z internetowym systemem transmisji może zapewnić informację o przemieszczeniach punktów charakterystycznych obiektu w trybie on-line i na dowolną odległość z dokładnością pomiaru 1 mm w każdych warunkach. Oparty na tej metodzie System Zdalnego Pomiaru Przemieszczeń wykazał poprawność funkcjonowania zarówno w warunkach laboratoryjnych, jak i w warunkach placu budowy. Wymaga jednak dalszego rozwoju w zakresie sprzętu i oprogramowania.

## Literatura

- [1] Dyrektywa Rady NR 89/106/EWG z dnia 21 grudnia 1988 r., w sprawie zbliżenia przepisów prawnych i administracyjnych państw członkowskich dotyczących wyrobów budowlanych.
- [2] Ustawa z dnia 7 lipca 1994 r. Prawo budowlane (jednolity tekst – Dz. U. Nr 156 z 1.09.2006 r.).
- [3] Witkowski P., *Zdalne monitorowanie obiektów budowlanych podczas budowy i eksploatacji*, XIX Konferencja Naukowa – Korbiewów’ 2007 „Metody Komputerowe w Projektowaniu i Analizie Konstrukcji Hydrotechnicznych”, Korbiewów, marzec 2007.
- [4] Witkowski P., *Internetowy system zarządzania jakością w budownictwie betonowym*, Materiały Konferencyjne III Konferencji „DNI BETONU – tradycja i nowoczesność”, Wisła, październik 2004.
- [5] Witkowski P., *Informatyzacja procesów pomiarowych jako warunek kompleksowego zarządzania jakością w budownictwie. Wprowadzenie*, Wydawnictwo ITB, Warszawa 2005.
- [6] Witkowski P., *Internetowy monitoring wznoszonych i eksploatowanych obiektów betonowych*, XX Konferencja Naukowo-Techniczna „JADWISIN ‘2006” Beton i Prefabrykacja, Serock, maj 2006.
- [7] Witkowski P., *Koncepcja centrum usług zarządzania jakością w budownictwie betonowym*, Wydawnictwo ITB, Warszawa 2005.
- [8] Witkowski P., *Bezdotykowe metody obserwacji i pomiarów obiektów budowlanych. Wprowadzenie*, <http://www.itb.pl/files/itb/wydawnictwa/instrukcje/443%20do%20inter.pdf>.