

MONITORING KONSTRUKCJI STALOWYCH



Część 4

Pomiary temperatury, drgań i zjawisk pogody. Metody wizyjne



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

Pomiar temperatury w systemach monitoringu jest często traktowany jako pomocniczy. Zjawiska dynamiczne są monitorowane tylko w niektórych przypadkach konstrukcji szczególnie wrażliwych na tego typu zachowania, takich jak np. zadaszenia stadionów, konstrukcje linowe czy obiekty narażone na oddziaływania dynamiczne pochodzenia komunikacyjnego.

Z pomiarami przemieszczeń i odkształceń często związane jest monitorowanie temperatury. Wiele czujników stosowanych do ww. pomiarów jest wyposażonych w wewnętrzne sensory temperatury, wykorzystywane np. do kompensacji pomiarów właściwych – z tego typu sytuacją mamy do czynienia np. w tensometrach strunowych. Takie rozwiązanie jest na ogół wystarczające do celu monitoringu. W przypadku konieczności zastosowania dodatkowego pomiaru temperatury stosuje się czujniki zewnętrzne, w zależności od potrzeb i możliwości: termistorowe, strunowe lub optyczne (FP). Zakresy i dokładności czujników termistorowych i optycznych są zbliżone: zakres $-20-80^{\circ}\text{C}$, dokładność $(+/-)1^{\circ}\text{C}$. W przypadku rozwiązań strunowych uzyskiwane są około dwukrotnie lepsze parametry. Przykładowe rozwiązania czujników przedstawiono na rys. 1 [M8].

Pomiary drgań

Kolejna grupa czujników jest związana z monitorowaniem parametrów dynamicznych konstrukcji. Praktyczne pomiary drgań konstrukcji budowlanych są ukierunkowane na określenie wielkości amplitud przemieszczeń, prędkości i przyspieszeń, częstotliwości drgań, przesunięcia fazowego i tłumienia. Są one określane na podstawie odczytów przebiegów wielkości mierzonych w czasie, tzw. wibrogramów, które poddaje się najpierw filtrowaniu, a następnie odpowiedniej obróbce. W przypadku konstrukcji charakteryzujących się niskimi częstotliwościami drgań własnych zalecany jest pomiar przemieszczeń, które w takich przypadkach osiągają największe wartości. Można je mierzyć przy pomocy czujników typu LVDT (Linear Variable Differential Transformer) lub czujników indukcyjnych. Do pomiaru kolejnej wielkości, czyli prędkości, stosuje się np. geofony, wykorzystywane w geofizyce do rejestrowania drgań sejsmicznych, oraz metody wykorzystujące wibrometrię laserową LDV (Laser Doppler Vibrometry).

Ze względu na relatywnie niskie koszty, szeroki zakres pomiarowy i wysoką dokładność do pomiaru drgań najczęściej stosuje się akcelerometrię, czyli czujniki, które są mocowane do badanego elementu konstrukcji i mierzą przyspieszenia. Generalnie możemy mieć do dyspozycji akcelerometrię piezoelektryczną, piezoporową i pojemnościową.

Akcelerometrię piezoelektryczną bazują na kryształach o właściwościach piezoelektrycznych, czyli odpowiadających na obciążenie mechaniczne powstaniem ładunku elektrycznego. Czujniki piezoporowe, podobnie jak tensometry, zmieniają swój opór elektryczny w wyniku obciążenia, a pojemnościowe wykorzystują zmianę pojemności płytek zbliżających się do siebie pod wpływem przyspieszenia. W praktycznych zastosowaniach w systemach monitoringu wykorzystywane są głównie akcelerometrię piezoelektryczną, podczas gdy dwa ostatnie (piezoporowe i pojemnościowe) występują głównie w mikroakcelerometrach MEMS.

Stosowane w praktyce akcelerometrię piezoelektryczną mogą być jedno-, dwu- lub trójosiowe – rys. 2 [M3]. Mimo że te ostatnie są najwygodniejsze, to ze względu na ich koszt oraz możliwe wzajemne zakłócenie się pomiarów wykonywanych dla poszczególnych kierunków często stosuje się kompilację dwóch lub trzech akcelerometrów jednoosiowych zamiast akcelerometrów dwu- lub trójosiowych – rys. 3.

Inną metodą pomiaru drgań jest technika wykorzystująca wibrometrię laserową, pozwalająca na przeprowadzenie bezdotykowych pomiarów drgań konstrukcji w trzech kierunkach. Metoda ta bazuje na porównaniu wiązki lasera odbijanej od badanego elementu i docierającej do fotodekoderu ze znanym sygnałem referencyjnym. Rozwiązanie to nie jest jednak wykorzystywane w praktycznych zastosowaniach w systemach monitoringu – powodem są wysokie koszty urządzeń w korelacji z brakiem konieczności stosowania aż tak zaawansowanych narzędzi (umożliwiających wykonywanie pomiarów na znacznych powierzchniach lub fragmentach konstrukcji).

Pomiary zjawisk pogodowych

Kolejnym zagadnieniem, pojawiającym się w przypadku niektórych, bardziej złożonych systemów monitoringu, jest pozyskiwanie informacji pogodowych, dotyczących głównie prędkości i kierunku wiatru, opadów atmosferycznych, oblodzenia, temperatury powietrza i ew. wilgotności. Do tego celu stosowane są urządzenia mierzące poszczególne zjawiska lub stacje pogody obejmujące pomiarami kilka wielkości.

Do pomiaru wiatru mogą być wykorzystywane anemometry/wiatromiery (obrotowe, wiatrakowe, czasowe, wychyłowe, ciśnieniowe, cieplne, ultrasonograficzne, Wilda, ultradźwiękowe) – rys. 4 [M6, M11].

Innym rozwiązaniem jest np. zastosowanie monitora wiatru [M14], który poza pomiarem prędkości wiatru może sygnalizować przekroczenie zaprogramowanej wcześniej wartości progowej. Urządzenie składa się z anemometru czasowego oraz sterownika, a sygnalizacja przekroczenia ustalonej wartości progowej odbywa się akustycznie i/lub wizualnie.

Kolejne istotne zjawisko, którego efekty są ważne z punktu widzenia systemów monitoringu, to opady śniegu. Do pomiaru wielkości/ciężaru tych opadów służą różnego typu śniegowaski i śniegomiery. Śniegowaski (rys. 5a, b) [1] rozmieszcza się na dachu w charakterystycznych miejscach. W przypadku śniegowasków stałych (tyczek) obserwuje się ich wskazania przy pomocy kamer. Informacje uzyskane ze śniegowasków pozwalają określić grubość pokrywy śnieżnej, ale bez znajomości gęstości objętościowej śniegu nie jest możliwe jednoznaczne określenie jego ciężaru.

Więcej informacji można uzyskać dzięki czujnikowi wykorzystującemu pomiar równoważnika śniegowo-wodnego (SWE – Snow Water Equivalent). Oparty na tej metodzie czujnik (rys. 5c) [M5] monitoruje zmiany energii elektromagnetycznej, naturalnie emitowanej z ziemi [4, M5]. Nagromadzenie się śniegu powoduje tłumienie emisji promieniowania, dzięki czemu można obliczyć SWE.

Inne możliwości dotyczące pomiarów śniegu to śniegomiery wagowe i objętościowe – są one wykorzystywane głównie w rozwiązaniach przenośnych. Są co prawda znane rozwiązania automatycznego pomiaru ciężaru śniegu taką wagą, jednak ze względu na problemy techniczne (przesklepienie i klinowanie się śniegu zalegającego na wadze) wykonywane przy ich pomocy pomiary mogą nie być wiarygodne.

Z monitorowaniem grubości/ciężaru śniegu częściowo związane są pomiary opadów deszczu, a urządzeniami umożliwiającymi ich prowadzenie są proste deszczomierze służące do pomiaru wysokości opadu lub urządzenia bardziej rozbudowane, zwane pluwiografami, służące do rejestracji ilości, czasu trwania oraz natężenia opadów. Pluwiografy mogą być np. pływakowe, kropłowe, komorowo-zaporowe, korytkowo-wyrotowe czy wagowe. Na rys. 6a [M2] przedstawiono przykładowy deszczomierz korytkowy, podgrzewany, który może służyć także do pomiaru opadów śniegu. Istnieją też deszczomierze umożliwiające również pomiar temperatury – rys. 6b [M4].

Jedną z podstawowych wielkości mierzonych w ramach obserwacji warunków atmosferycznych jest temperatura. Do jej pomiaru służą różnego typu termometry cieczowe (rtęciowe, alkoholowe) lub elektroniczne, w których czujnikami temperatury są najczęściej termistory lub układy półprzewodnikowe.

Najwygodniejszym rozwiązaniem jest połączenie pomiarów różnych wielkości w jednym urządzeniu lub w jednym zespole urządzeń. Przedstawiona na rys. 7a [M12] kompaktowa stacja pogody mierzy prędkość i kie-



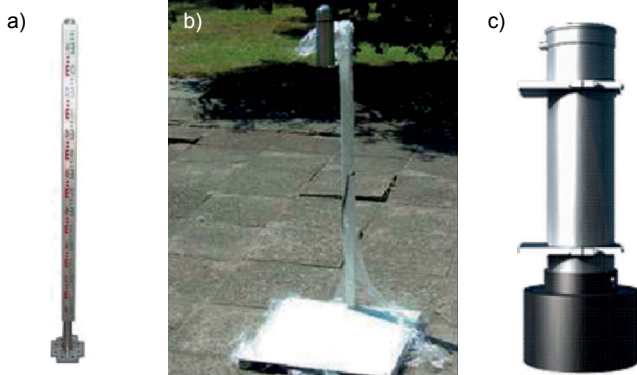
Rys. 1. Czujniki temperatury [M7]:
a) czujnik termistorowy, b) czujnik strunowy, c) czujnik optyczny

runek wiatru, ilość i intensywność opadów, ciśnienie, temperaturę i wilgotność [M10, M12]. Metoda pomiaru opadu (sensor piezoelektryczny) polega na pomiarze siły uderzeń pojedynczych kropli (także gradu), co pozwala na obliczenie ich objętości. Urządzenie mierzy opad całkowity, jego intensywność oraz czas trwania. Sensor wiatru zawiera trzy przetworniki ultradźwiękowe. Prędkość i kierunek wiatru są określane na podstawie czasu potrzebnego sygnałowi ultradźwiękowemu do przebycia od jednego z przetworników do pozostałych dwóch.

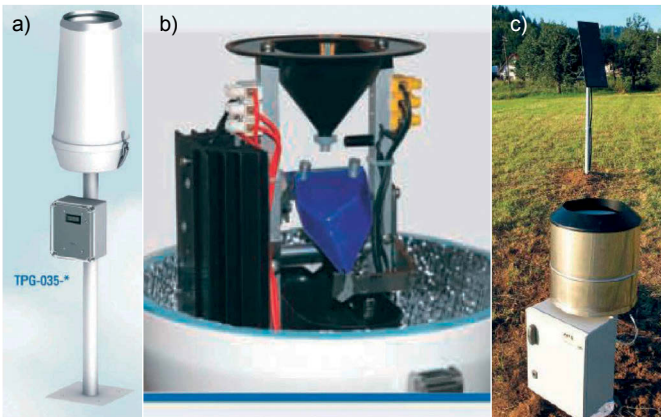
Pomiar ciśnienia jest wykonywany przez silikonowy sensor pojemnościowy, a pomiar temperatury – przez ceramiczny sensor pojemnościowy. Pomiaru wilgotności względnej powietrza dokonuje polimerowy cienkofilmowy sensor pojemnościowy. Czujnik może być wyposażony w podgrzewanie. Impulsy prądowe przekazywane przez detektor są filtrowane, wzmacniane, zamieniane na postać cyfrową i analizowane wg wybranych parametrów. Do konfiguracji stacji oraz obserwacji mierzonych danych służy oprogramowanie PC. Innym rozwiązaniem jest bezprzewodowa, automatyczna stacja meteorologiczna, przedstawiona na rys. 7b [M1]. Stacja zawiera zintegrowany zestaw czujników deszczu, temperatury, wilgotności i wiatru oraz jest wyposażona w panel słoneczny.

W niektórych przypadkach stosuje się także czujniki do kontroli oblodzenia, np. elementów olinowania. Można tu wykorzystać metody wizyjne (obserwacja oblodzonej powierzchni), czujniki do analizy stanu nawierzchni, które mogą sygnalizować pojawienie się lodu lub wody na powierzchni, albo sygnalizator wibracyjny, wykorzystujący efekt zmiany częstotliwości drgań oblodzonego elementu (wskutek zwiększenia jego masy).

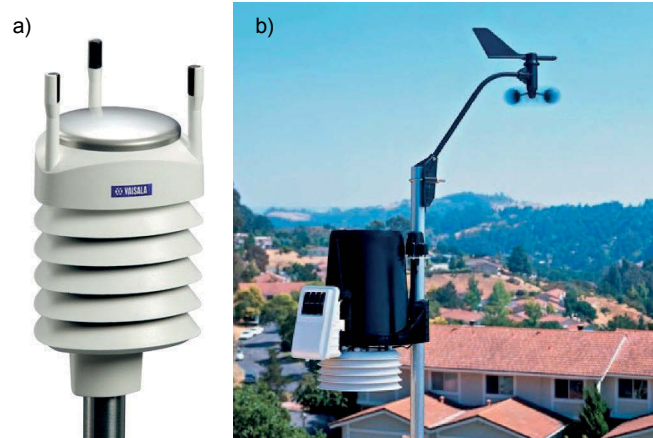
Monitorowanie zjawisk pogodowych jest stosowane w bardziej złożonych systemach monitoringu i w przypadku obiektów o nietypowych ustrojach konstrukcyjnych, dla których oddziaływanie klimatyczne są szczególnie istotne, a ich ustalenie zgodnie z normami nie jest całkiem jednoznaczne. Informacje uzyskane ze stacji pogody, np. o zalegającym na dachu śniegu, opadach deszczu czy prędkości wiatru pozwalają lepiej zinterpretować wyniki innych pomiarów wykonywanych przez urządzenia systemu monitoringu. Dane pogodowe mogą być ponadto wykorzystywane do prognozowania zmian pogodowych, co może być pomocne w podejmowaniu decyzji o ewentualnych działaniach zapobiegawczych, takich jak odsnieżanie dachu czy udrażnianie instalacji odwadniającej dach. Także informacje dotyczące prędkości wiatru mogą być przydatne w przypadku monitorowania drgań konstrukcji budynku, pomagając w ustaleniu charakterystyk własnych konstrukcji.



Rys. 5. Śniegowskazy i czujniki do pomiaru śniegu [1, 4]: a) śniegowskaz stały, b) śniegowskaz ultradźwiękowy, c) czujnik GMON3



Rys. 6. Deszczomierze podgrzewane [M2, M4]: a) deszczomierz korytkowy, b) mechanizm pomiarowy deszczomierza korytkowego, c) deszczomierz z czujnikiem temperatury



Rys. 7. Automatyczne stacje meteorologiczne [M1, M9]: a) stacja WXT520, b) bezprzewodowa stacja Davis Vantage Pro2 Plus



Rys. 8. Przykładowa kamera sieciowa IP [M8]

Metody wizyjne

Ważną grupę urządzeń wykorzystywanych w systemach monitoringu konstrukcji stanowią rozwiązania umożliwiające kontrolę wizyjną. Do monitoringu wizyjnego stosowane są generalnie systemy tzw. telewizji przemysłowej, analogowej lub cyfrowej. W systemie analogowym sygnał może być rejestrowany przez kamery analogowe i zapisywany na rejestratorze cyfrowym, a następnie może być analizowany na lokalnym monitorze lub przesyłany przez internet do innych systemów lub użytkowników [M7].

Nowszym i lepszym rozwiązaniem są systemy cyfrowe. Wykorzystywane są tam kamery cyfrowe IP o rozdzielczości 1 Mpix lub wyższej, np. Full HD. W rozwiązaniu tym kamery są urządzeniami sieciowymi, komunikującymi się z serwerem/rejestratorem za pomocą sieci LAN/WAN. Dostęp do kamer sieciowych IP jest możliwy praktycznie z każdego miejsca na ziemi. Kamery takie pozwalają na zapis i transmisję obrazu po sieci, umożliwiając tym samym prowadzenie lokalnego lub zdalnego nadzoru wizyjnego za pośrednictwem infrastruktury sieciowej. Podczas gdy kamery tradycyjne umożliwiają jedynie transmisję sygnałów w jednym kierunku, to w przypadku kamer IP transmisja sygnałów może być dwukierunkowa. Kamery takie mogą równocześnie komunikować się z wieloma urządzeniami i tym samym realizować różne zadania, takie jak np. detekcja ruchu. Odpowiednie kamery IP umożliwiają zarówno obserwację w ciągu dnia, jak i przy słabym oświetleniu i w godzinach nocnych. Na rys. 8a [M9] pokazano przykładową kamerę o rozdzielczości 2 Mpix (1280 x 1024 pikseli), przeznaczoną do pracy w warunkach wewnętrznych, a na rys. 8b [M9] przykładową kamerę kopułkową o rozdzielczości 3 Mpix (2048x1536) przystosowaną do instalacji na zewnątrz i do pracy w dzień i w nocy.

Podobnie jak w przypadku zjawisk pogodowych metody wizyjne są stosowane w bardziej złożonych systemach monitoringu. Obserwacje np. zalegającego na dachu śniegu czy opadu deszczu pozwalają lepiej zinterpretować wyniki innych pomiarów wykonywanych przez urządzenia systemu monitoringu. Także obserwacja niewralgicznych/krytycznych miejsc konstrukcji pozwala pozyskiwać bieżące informacje o zachodzących tam zmianach.

Metody oparte na zjawisku propagacji fal

Do wykrywania lokalnych uszkodzeń, np. w węzłach, mogą być wykorzystywane metody oparte na propagacji fal. Jedną z metod w tym obszarze są badania ultradźwiękowe, które nadają się do określenia wymiarów elementów, grubości warstw różnych materiałów, wyznaczania głębokości uszkodzenia, np. w wyniku korozji, a także własności materiałów. Znany jest np. sposób pomiaru sił wciąganych z systemowymi końcówkami sworzniowymi, wykorzystujący metodę ultradźwiękową z czujnikami zlokalizowanymi na sworzniu łączącym ciągnio z blachą węzłową. Mimo że metody ultradźwiękowe znalazły szerokie zastosowanie w badaniach nieniszczących konstrukcji stalowych, to w systemach monitoringu nie są szerzej stosowane.

Kolejna metoda jest oparta na emisji akustycznej i polega na rejestracji przebiegu fal sprężystych generowanych przez zmiany materiału, na poziomie mikro- lub makrostrukturalnym, na skutek przyłożonego zewnętrznego oddziaływania (obciążenia, działania środowiska zewnętrznego itp.). Emisja akustyczna jest zjawiskiem towarzyszącym między innymi takim procesom, jak odkształcenie plastyczne, pęknięcie materiału, korozja, przecieki (nieszczelności), przemiany strukturalne i fazowe, reakcje chemiczne, delaminacja, pęknięcie włókien i osnowy w kompozytach itd. Generowane fale akustyczne są rejestrowane za pomocą czujników piezoelektrycznych montowanych na badanym obiekcie – rys. 9 [M13]. Na podstawie analizy sygnałów emisji akustycznej otrzymuje się informacje o aktywnych procesach w materiale, zachodzących pod działaniem obciążenia lub pod wpływem czynników środowiskowych. Metoda emisji akustycznej jest rozwijającą się metodą nieniszczącą, jednak – podobnie jak w przypadku metod ultradźwiękowych – jest stosowana raczej w badaniach diagnostycznych wykonywanych okresowo/incydentalnie, nie w typowych, stałych systemach monitoringu.

Metodę wykorzystującą fale sprężyste i termografię przedstawiono w [2, 3]. Metoda ta zakłada, że energia będzie dostarczana do badanego elementu konstrukcji w postaci fali sprężystej generowanej przez przetwornik ultradźwiękowy, co spowoduje wzrost temperatury w konstrukcji, odpowiednio większy w miejscach występowania defektów struktury. Ilość tej energii musi być na tyle duża, żeby spowodowany tym wzrost temperatury konstrukcji był mierzalny kamerą termowizyjną. Z tego też powodu metoda ta może być problematyczna przy masywnych elementach, gdzie energia konieczna do wywołania odpowiedniego wzrostu temperatury byłaby bardzo duża. Ponadto przy metodzie tej mogą wystąpić problemy z wykrywaniem niektórych wad materiału, np. niewielkich kulistych pustek. Ze względu na to, że metoda nastęrcza problemów z interpretacją wyników przy elementach masywnych (w typowych konstrukcjach stalowych mamy zwykle do czynienia z co najmniej kilkumilimetrowymi grubościami elementów), to mimo założeń uwzględniających jej wykorzystanie w systemach monitoringu dotychczas nie znalazła ona szerszego zastosowania w tym obszarze.

W [2] opisano także metodę „monitorowania stanu konstrukcji w oparciu o pomiary wizyjne”. Metoda polega na wykorzystaniu do oceny stanu konstrukcji obrazu wykonywanego przy pomocy aparatów fotograficznych (pomiary statyczne) lub kamer (pomiary dynamiczne). Metoda ma umożliwiać m.in. pomiary deformacji/ugięcia konstrukcji czy też, w przypadku wykorzystania kamer, analizę modalną. Brak jednak praktycznych aplikacji metody. ■

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

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

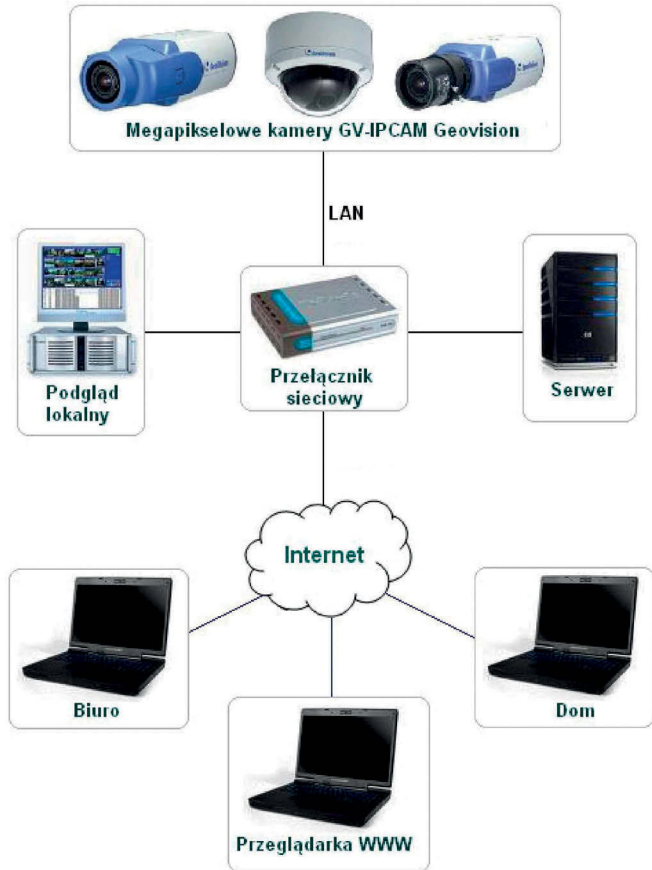
Bibliografia

- [1] Bednarski Ł., Sierńko R., Obciążenie śniegiem obiektów budowlanych. „Inżynier Budownictwa”, nr 90, grudzień 2011, str. 45-49.
- [2] Prezentacja: Monitorowanie technicznego stanu konstrukcji i ocena jej żywotności. Seminarium projektu MONIT, Politechnika Warszawska, Warszawa 2009.
- [3] Uhl T., Współczesne metody monitorowania i diagnozowania konstrukcji. www.fundacjaro-zwojunauki.pl/res/Tom2/6_Uhl.pdf.
- [4] Wright M., Kavanaugh J., Labine C., Performance Analysis of GMON3 Snow Water Equivalency Sensor. Proceedings of the Western Snow Conference 2011, Stateline (South Lake Tahoe), Nevada, USA, April 18, 2011.

Materiały informacyjne ze stron internetowych

- [M1] stacjemeteo.pl (dostęp 01.2016)
- [M2] www.a-ster.pl (dostęp 01.2016)
- [M3] www.automatykab2b.pl (dostęp 01.2016)
- [M4] www.bmsonic.waw.pl (dostęp 01.2016)
- [M5] www.campbellsci.com (dostęp 08.2016)
- [M6] www.chipelectronics.com (dostęp 01.2016)
- [M7] www.e-alarmy.pl (dostęp 08.2016)
- [M8] www.geokon.pl (dostęp 01.2016)
- [M9] www.geovision.pl (dostęp 08.2016)
- [M10] www.label.pl (dostęp 01.2016)
- [M11] www.mera-sp.com.pl (dostęp 01.2016)
- [M12] www.vaisala.com (dostęp 08.2016)
- [M13] www.vallen.de (dostęp 01.2016)
- [M14] www.wiatromierze.pl (dostęp 01.2016)

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



Rys. 9. Cyfrowy system telewizji przemysłowej [M8]



Rys. 10. Przykładowe czujniki wykorzystywane w metodzie emisji akustycznej [M11]