

MOŻLIWOŚCI ZASTOSOWANIA SYSTEMÓW MONITORINGU TECHNICZNEGO W INFRASTRUKTURZE ELEKTROENERGETYCZNEJ

prof. dr hab. Krzysztof Wilde / Politechnika Gdańska

1. WSTĘP

Monitoring wybranego procesu rozumiemy jako zbiór procedur identyfikacji, śledzenia, analizy i oddziaływania, który umożliwia organizację i sterowanie danym problemem. Powszechnie stosowane są techniki monitoringowe w zwalczaniu terroryzmu czy zarządzaniu zdrowiem publicznym. Szeroko rozbudowana jest infrastruktura monitoringowa, ukierunkowana na rozpoznanie preferencji klientów w wybranych segmentach rynku detalicznego. W zagadnieniach związanych z infrastrukturą budowlaną najlepiej rozwinięte są systemy monitoringu stosowane w transporcie. Zarządzanie w transporcie lotniczym oparte jest na systemach monitoringu, zaś w transporcie samochodowym powszechne jest w bogatych krajach stosowanie monitoringu w celu identyfikacji niepożądanych incydentów lub zarządzania czasem podróży. Standardowe rozwiązania wykorzystują system kamer, dedykowany oprogramowaniu identyfikacji obrazu i inne wyspecjalizowane systemy pomiarowe. Systemy monitoringu stosowane są także w obiektach inżynierskich o specjalnym znaczeniu, w których katastrofa może prowadzić do dużych strat finansowych, zniszczenia środowiska naturalnego lub strat ludzkich.

Systemy monitoringu technicznego (ang. *Structural Health Monitoring* – SHM) instalowane są w celu pomiaru, akwizycji i analizy wybranych parametrów technicznych obiektów budowlanych. Infrastruktura budowlana składa się, we wszystkich krajach, z dużej liczby starych budynków, wież, mostów, tuneli, zapór lub innych obiektów, które wymagają regularnych inspekcji technicznych określających bezpieczeństwo ich użytkowania. Oględziny wizualne, inspekcje wykonywane przez doświadczonych inżynierów mogą być wspierane nieniszczącymi badaniami diagnostycznymi. W obiektach o szczególnym znaczeniu wskazane jest ciągłe, zautomatyzowane diagnozowanie stanu wytrzymałości elementów konstrukcyjnych. Wczesne i precyzyjne wykrycie uszkodzeń, powstających w trakcie użytkowania, pozwala na prewencyjne działania naprawcze oraz utrzymanie nieprzerwanej eksploatacji obiektu. Instalacja systemów ciągłego monitoringu stanu technicznego pozwala na wydłużenie okresu eksploatacji obiektu. Instalacja systemu monitoringu technicznego (MT) jest uzasadniona ekonomicznie, jeżeli koszty systemu i jego utrzymania są mniejsze niż zyski z poprawy jakości użytkowania i wydłużenia trwałości elementów infrastruktury.

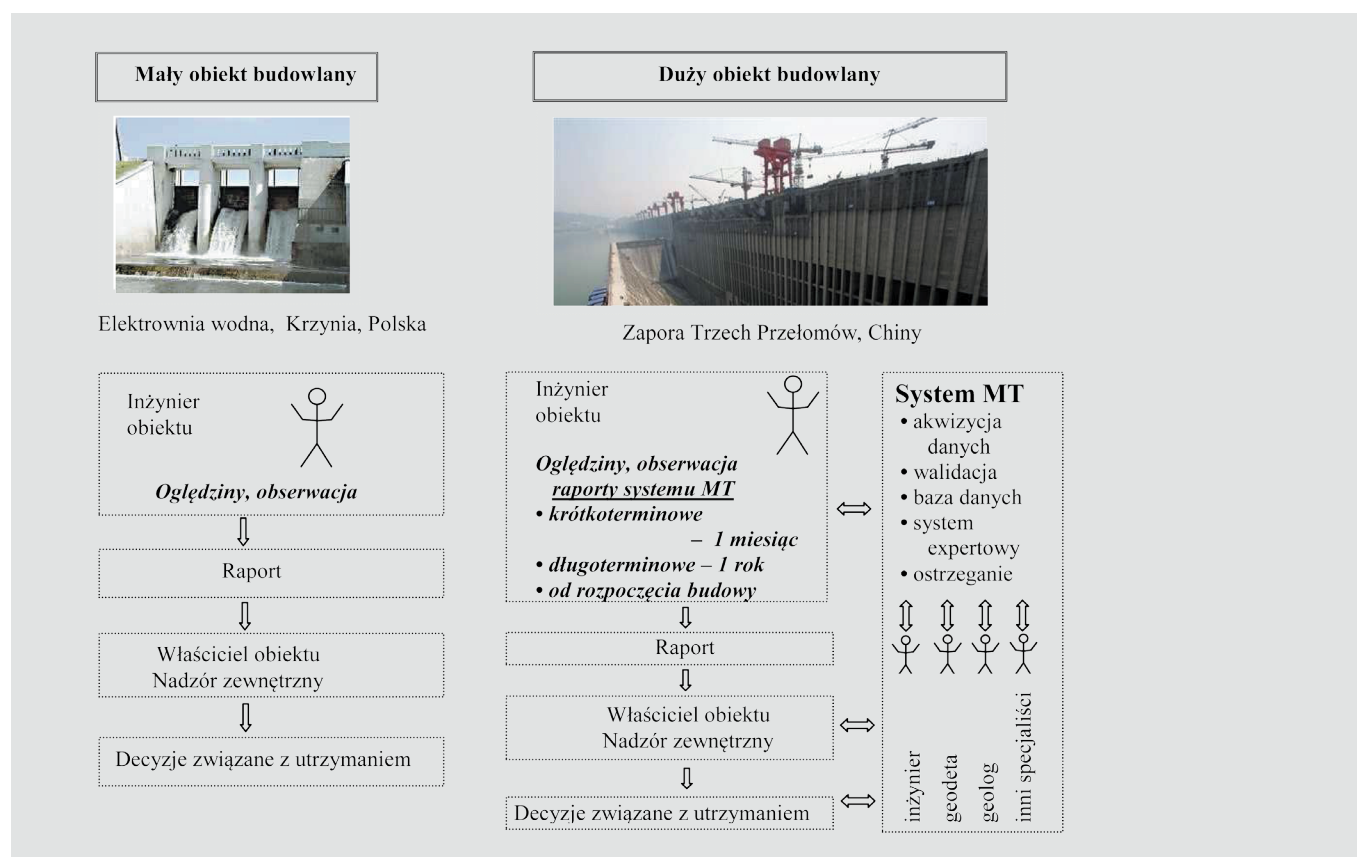
Systemy MT dynamicznie rozwijają się w Azji, szczególnie w Chinach, Japonii i Singapurze, a także w Europie, m.in. w Belgii, Wielkiej Brytanii, Niemczech, jak również w Stanach Zjednoczonych i Kanadzie. Jedne z pierwszych praktycznych zastosowań systemów MT w infrastrukturalnych obiektach budowlanych dotyczyły mostów [1] i budowli wysokich. Aktualnie systemy MT stosuje się w zaporach, systemach zabezpieczeń portów, wieżach chłodniczych, tunelach i elektrowniach [2]. Potrzeba monitoringu strukturalnego w infrastrukturze elektroenergetycznej została dostrzeżona przez Komisję Europejską. W 7 Programie Ramowym UE przeznaczono 5 milionów euro na tzw. inteligentne systemy sieci przesyłowych, w których zawiera się tematyka diagnostyki, monitoringu, utrzymania i sterowania systemami przesyłu energii (7FP, Diagnostics, Surveillance, Maintenance and Control of Power Transmission and Grid Connections, ENERGY. 2008.72.3).

Streszczenie

W artykule przedstawiono wybrane systemy monitoringu technicznego, działające na terenie obiektów zlokalizowanych w Polsce. Zaprezentowano przykładowe zastosowanie diagnostyki uszkodzeń płyty stalowej z użyciem technologii bazującej na drganiach i transformacji falkowej. Możliwości zastosowania monitoringu w infrastrukturze elektroenergetycznej omówione zostały na przykładzie linii przesyłowych wysokiego napięcia.

Efektywne zastosowanie systemów MT wymaga właściwego doboru metody diagnostycznej, która w sposób cykliczny lub ciągły będzie stanowiła bazę do oceny stanu technicznego. Najczęściej stosowane techniki to metody radiograficzne, sklerometryczne, magnetyczne, ultradźwiękowe, akustyczne lub oparte na wzbudzanych prądach wirowych oraz analizie pola temperatur [7]. Wymienione metody stosowane są na konstrukcji w precyzyjnie określonej lokalizacji, tam gdzie spodziewane jest pojawienie się uszkodzenia. Wymagają one także bezpośredniego dostępu do wybranych elementów konstrukcyjnych monitorowanego obiektu. Duże obiekty budowlane, na przykład zapory wodne czy konstrukcje wsporcze linii wysokiego napięcia, nie spełniają tych wymogów. Dostępne są także metody globalnego skanowania dużych obiektów budowlanych, które mogą stanowić bazę dla systemów MT. Do globalnych metod diagnostycznych zaliczamy metody wibracyjne [8], kierunkowe metody ultradźwiękowe [9] lub skanowanie stanowiące kombinację metod fotogrametrycznych i skaningu laserowego 3D i narzędzi GPS [10].

Celem niniejszego artykułu jest przedstawienie problematyki monitoringu technicznego w infrastrukturze elektroenergetycznej z opisem możliwych zastosowań metod wibracyjnych.

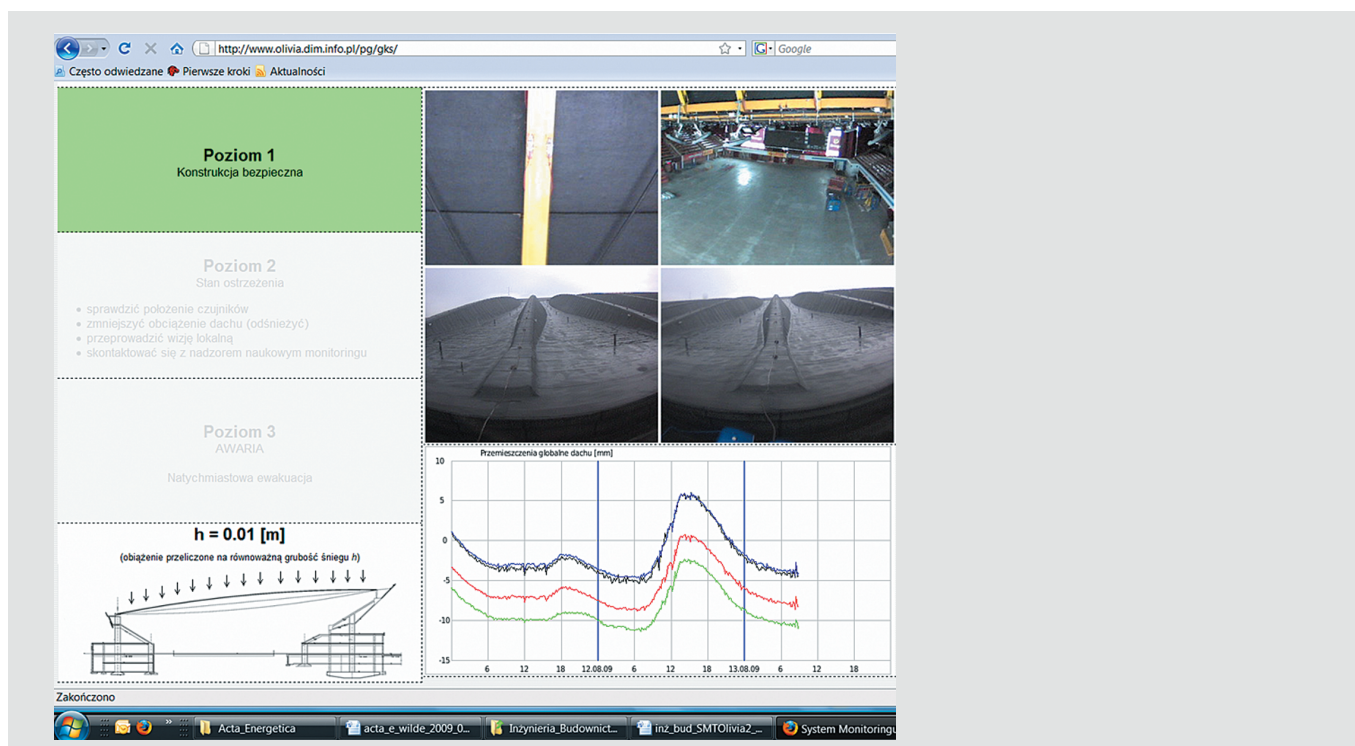


Rys. 1. Koncepty procesu monitorowania obiektów

2. SYSTEMY MONITORINGU TECHNICZNEGO

Celem użytkowania systemu MT jest wykrycie uszkodzenia w najszybszym możliwym terminie. Uszkodzenie jest zdefiniowane jako zmiana właściwości materiałowych lub geometrycznych konstrukcji, które mają negatywny wpływ na pracę konstrukcji [3]. Działanie najprostszego systemu MT zapewnia inżynier obiektu, który przeprowadza regularne obserwacje wybranej konstrukcji. Sporządzone raporty stanowią dla właściciela obiektu i/lub instytucji nadzorujących podstawę do decyzji związanych z użytkowaniem i utrzymaniem obiektu (rys. 1). W skomplikowanych obiektach, takich jak duże zapory wodne, obserwacja wizyjna jest wspomagana danymi z systemów pomiarowych. Na przykład zaporę we Włocławku posiada zautomatyzowany system akwizycji danych [4]. Zestaw czujników składa się z piezometrów, inklinometrów, szczelinomierzy, czujników do pomiaru poziomu wody i temperatury. Łącznie zastosowano 190 czujników. System został założony w 1997 roku, a jego głównym zadaniem jest dostarczanie danych służbom technicznym pracującym na zaporze.

Duży system monitoringu technicznego został zainstalowany przez KGHM Polska Miedź S.A. w składowisku Żelazny Most [5]. Obiekt jest mokrym składowiskiem odpadów przemysłowych. Odpady gromadzone są na obszarze ograniczonym zaporami ziemnymi. Ciągły przyrost masy odpadów powoduje konieczność podwyższania zapór ziemnych. Celem systemu MT jest ocena bezpieczeństwa konstrukcji i dostarczenie danych koniecznych do projektowania i wykonania rozbudowy zapór. System MT składa się z ponad 8000 punktów pomiarowych, obejmujących dane geologiczne, hydrogeologiczne, geotechniczne, geofizyczne, chemiczne i geometryczne. Duże ilości danych zbierane są w bazie danych (Oracle) zintegrowanej z rozwiązaniami GIS. System posiada narzędzia selektywnego wyboru danych i ich prezentacji. Jednak zainstalowany system MT posiada nieliczne moduły do symulacji numerycznych zachodzących procesów i nie jest wyposażony w systemy ekspertowe wspomagające decyzje zespołu specjalistów powołanego do oceny stanu obiektu.



Rys. 2. Ekran modułu sygnalizacyjnego systemu SMT OLIVIA – 2

Przykładem systemu ze zintegrowanym modułem numerycznym i ekspertowym jest system SMT OLIVIA – 2, zainstalowany w Hali Sportowo-Widowiskowej „OLIVIA” w Gdańsku [6]. System automatycznie wykonuje pomiary co 10 minut w 74 punktach dachu oraz w trybie ciągłym wykonuje symulacje numeryczne zachowania się konstrukcji dachu hali. Zautomatyzowana i ciągła ocena stanu konstrukcji określana jest na podstawie wyników pomiarowych i ich relacji do wartości dopuszczalnych oraz indeksu zgodności wartości pomiarowych z wynikami numerycznymi. Moduł sygnalizacyjny (rys. 2) ma za zadanie przedstawienie najważniejszych wyników pomiarowych i obliczeniowych użytkownikowi obiektu: przemieszczenia 4 dźwigarów dachowych (w ostatnich trzech dniach), podgląd z kamer na niewralgicznym elemencie konstrukcyjnym i wewnątrz obiektu oraz z kamer na połaci dachowej. Ekran sygnalizacyjny pokazuje także wynik symulacji numerycznych określających równoważną grubość śniegu, która powoduje stan ugięcia całej konstrukcji dachu. Aktualnie trwają prace nad dodaniem modułu diagnostyki bazującej na drganiach wywołanych działaniem wiatru i ruchu ulicznego.

3. SYSTEMY MONITORINGU TECHNICZNEGO BAZUJĄCE NA DRGANIACH

3.1. Drgania w diagnostyce nieniszczącej

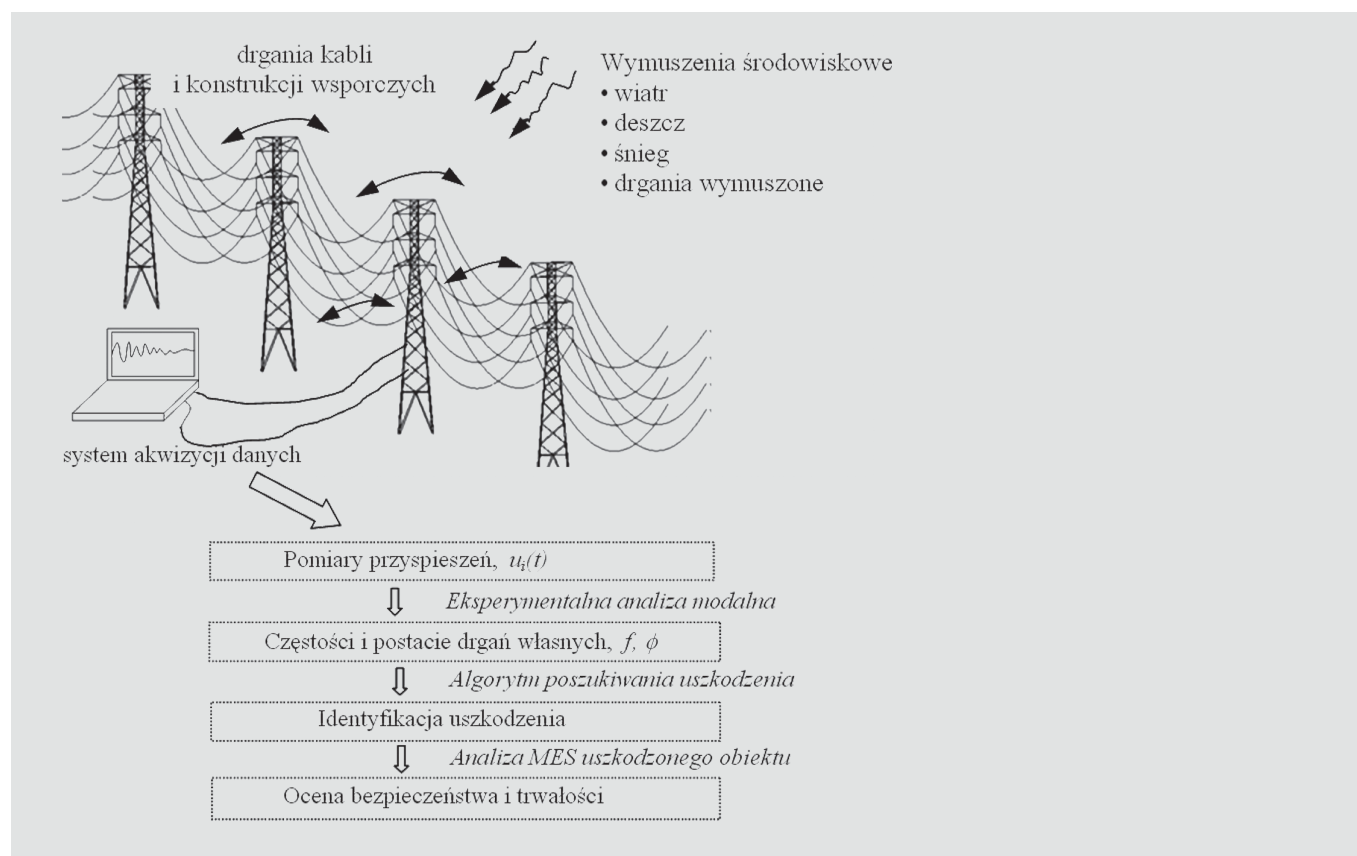
Podstawą działania systemów diagnostyki bazującej na drganiach jest założenie, że wystąpienie uszkodzenia powoduje zmianę sztywności, masy lub właściwości dyssypacji energii elementów konstrukcji. Skutkiem tych

zmian jest zmiana właściwości dynamicznych badanego obiektu, które dostarczają dane do diagnostyki. Obciążenia środowiskowe, takie jak deszcz, śnieg, ruch uliczny w pobliżu obiektu, czy nagłe zmiany rozkładu temperatur powodują drgania. Drgania obiektu o małych amplitudach mogą być także celowo wzbudzone do celów diagnostycznych. Rys. 3 pokazuje koncepcję monitoringu bazującego na drganiach w konstrukcjach wsporczych sieci wysokiego napięcia. System akwizycji danych zbiera przebiegi przyspieszeń w kilku wybranych lokalizacjach. Ciągła analiza modalna umożliwia wyznaczenie parametrów modalnych: częstotliwości drgań własnych oraz postaci drgań własnych. Zmiany w parametrach modalnych pozwalają na identyfikację obecności uszkodzenia. W przypadku rozległych uszkodzeń możliwe jest określenie jego położenia.

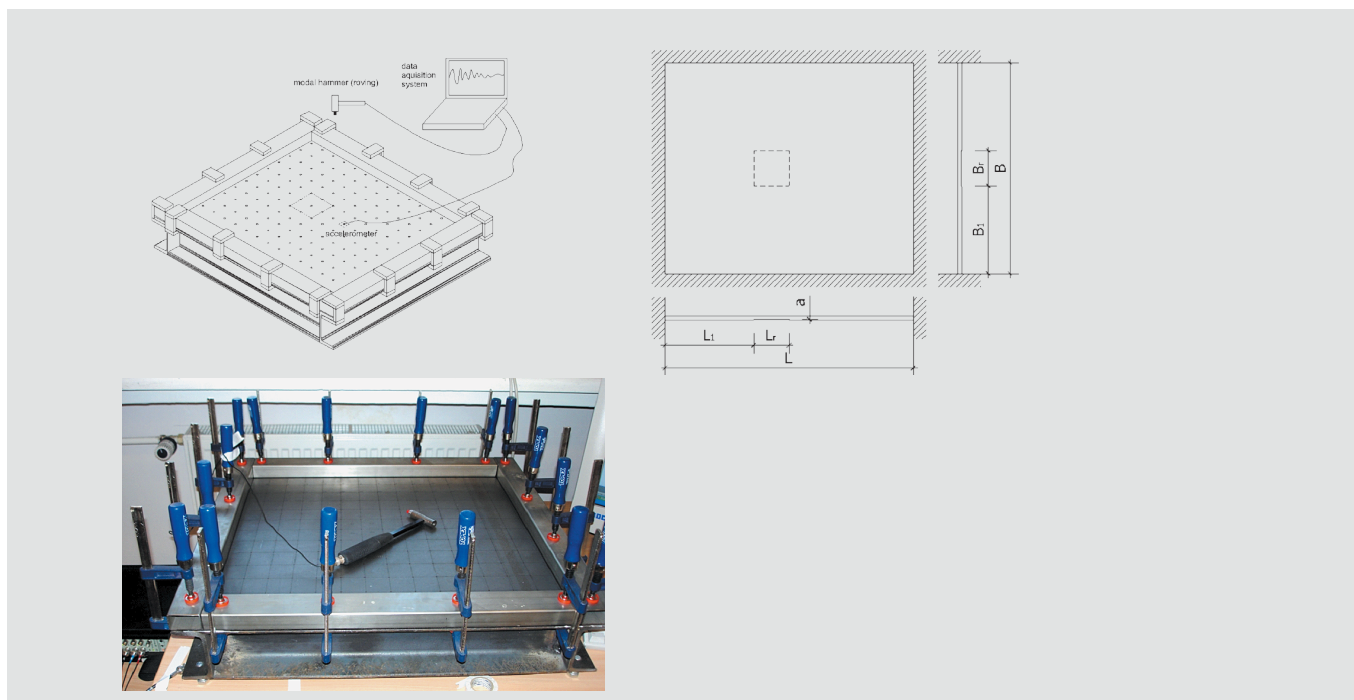
Koncepcja diagnostyki bazującej na drganiach jest intuicyjnie uzasadniona, jednak praktyczne jej zastosowania napotykają na liczne problemy. Podstawowym warunkiem efektywności metod diagnostyki wibracyjnej jest wrażliwość parametrów dynamicznych konstrukcji na uszkodzenia. Typowa rysa, drobne pęknięcie elementu czy ubytek korozyjny mają najczęściej lokalny charakter i nie powodują znaczących zmian w dynamice całej konstrukcji.

3.2. Przykład diagnostyki płyty stalowej na bazie drgań i transformaty falkowej

Udane zastosowanie metody poszukiwania uszkodzenia na bazie drgań przedstawione jest na przykładzie płyty stalowej, sztywno zamocowanej na wszystkich swoich krawędziach. Płyta ma wymiary: długość $L = 560$ mm, szerokość $B = 480$ mm i grubość $H = 2$ mm. Parametry materiałowe zostały wyznaczone eksperymentalnie: moduł Younga $E = 192$ GPa, współczynnik Poissona $\nu = 0,25$ oraz gęstość $\rho = 7430$ kg/m³. Płyta (rys. 4) ma prostokątne uszkodzenie, wykonane piłą o wysokiej precyzji, o wymiarach $L_r = 80$ mm, $B_r = 80$ mm i głębokości $a = 0,5$ mm. Odległości od lewego dolnego narożnika uszkodzenia do lewego dolnego narożnika płyty w kierunku poziomym i pionowym wynoszą: $L_1 = 200$ mm i $B_1 = 200$ mm. Pole powierzchni uszkodzenia wynosi 2,4% całego pola płyty, zaś głębokość uszkodzenia stanowi 25% grubości płyty.

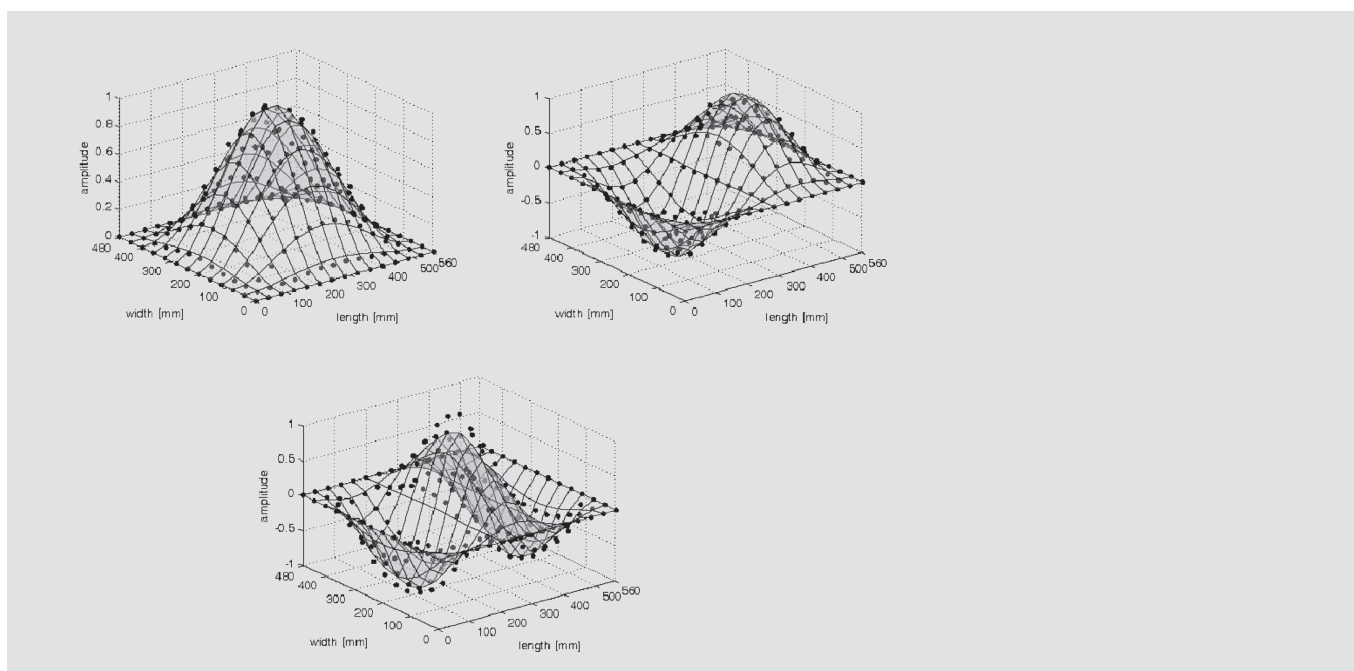


Rys. 3. Koncepcja działania systemu monitoringu technicznego na bazie drgań



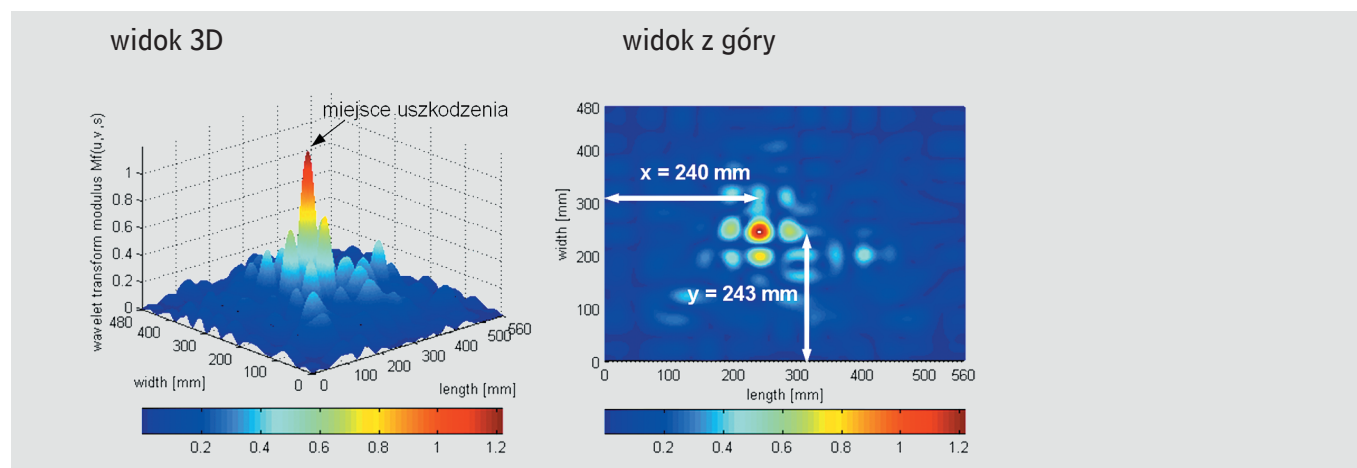
Rys. 4. Stanowisko do badań eksperymentalnych utwardzonej płyty stalowej

Impulsy wzbudzające drgania płyty wywołane były młotkiem modalnym PCB 086C03 w 143 punktach płyty. Pomiar przyspieszeń wykonany był w jednym punkcie (o numerze 74) na spodniej stronie płyty. Do pomiarów wykorzystano system akwizycji danych Pulse 3650C. Każdy pomiar powtórzony był 5 razy. Wyniki zostały uśrednione w domenie częstotliwości. Obliczenia eksperymentalnych postaci drgań wykonane zostały estymatorem $H_2(\omega)$ [11]. Dla porównania dokonano obliczeń numerycznych postaci drgań za pomocą komercyjnego kodu MES, SOFiSTiK z użyciem elementów skończonych o rozmiarach 40×40 mm. Pierwsze trzy częstotliwości drgań własnych płyty obliczone modelem MES wynoszą $f_1 = 65.100$ Hz, $f_2 = 120.00.100$ Hz, $f_3 = 207.09.100$ Hz, zaś częstotliwości wyznaczone eksperymentalnie wynoszą $f_1 = 64.875$ Hz, $f_2 = 114.875$ Hz, $f_3 = 195.25$ Hz. Numeryczne i eksperymentalne postacie drgań własnych przedstawione są na rys. 4. Czarne punkty oznaczają wartości eksperymentalne, a czarne linie przedstawiają postacie obliczeniowe. Indeksy MAC (kryterium zgodności postaci eksperymentalnych z numerycznymi) zawierają się w przedziale od 0,9693 do 0,9967, wskazując na dobrą zgodność wyników.



Rys. 5. Eksperymentalna i numeryczna 1, 2 i 3 postać drgań własnych płyty stalowej

Wyniki poszukiwania lokalizacji uszkodzenia za pomocą transformacji falkowej (rbio5.5) eksperymentalnych postaci drgań zostały przedstawione na rys. 6. Jako parametr wskazujący miejsce imperfekcji wybrano moduł $Mf(u, v, s)$ obliczony z poziomego i pionowego składowika dwuwymiarowej transformaty falkowej. Szczegóły zastosowanego algorytmu przedstawione zostały w [12]. Maksymalna wartość modułu transformaty falkowej, która sugeruje możliwe położenie uszkodzenia, znajduje się w odległości $x = 240$ mm i $y = 243$ mm od lewego dolnego narożnika płyty. Rzeczywiste położenie uszkodzenia to $x = 240$ mm i $y = 240$ mm. Zastosowana metoda pozwoliła precyzyjnie określić miejsce zniszczenia oraz oszacować jego prawdopodobny kształt.



Rys. 6. Moduł współczynników transformaty falkowej obliczony na bazie eksperymentalnych postaci drgań własnych

3.3. Cele instalacji systemu monitoringu technicznego sieci wysokiego napięcia

Przykładem awarii spowodowanej uszkodzeniami mechanicznymi konstrukcji wsporczych linii elektroenergetycznych był *blackout* w okolicach Szczecina w 2008 roku. Przerwa w dostawie prądu dotknęła ok. 500 tys. mieszkańców. Uszkodzone zostały 42 km linii średniego napięcia oraz 41 słupów wysokiego napięcia (liczba ta dotyczy wyłącznie uszkodzeń mechanicznych konstrukcji wsporczych, nie uwzględniono słupów, w których uszkodzeniu uległy izolatory lub zerwane zostały przewody) [14]. Kaskadowe zniszczenie słupów 124–129 linii Morzyczyn – Police, 220 kV, przedstawiono na fot. 1. Słupy projektowane są na przeniesienie obciążeń pionowych oraz poziomych prostopadłych do linii. Jednak nie przewiduje się nierównomiernego obciążenia naciągami przewodów spowodowanego gromadzeniem się szadzi. Jednym z wniosków z tej katastrofy jest konieczność weryfikacji zasad projektowania konstrukcji wsporczych, a w szczególności poprawne szacowanie obciążeń od szadzi i wiatru.



Fot 1. Awaria słupów 124–129 linii Morzyczyn – Police (zdjęcie autorstwa Teresy i Wiesława Paczkowskich [14])

Stosowalność systemów MT do oceny stanu sieci wysokiego napięcia (kable i konstrukcji wsporczych) została przedstawiona m.in. w [15]. Systemy wsporcze linii WN, czyli słupy kratownicowe, posiadają relatywnie małą sztywność i są wrażliwe na wzbudzenia dynamiczne, np. działanie podmuchów wiatru. Uszkodzenie pojedynczego węzła konstrukcji kratowej ma wpływ na globalną sztywność układu. Najczęstszym powodem katastrof konstrukcji wsporczych jest bezpośredni lub pośredni wpływ oblodzenia lub szadzi oraz silne oddziaływania wiatru [14], [15]. Dodatkowa masa lodu lub szadzi dołączona do kabli znacznie zmienia dynamiczne parametry układu kabel – konstrukcja wsporcza oraz zwiększa obciążenia dynamiczne od podmuchów wiatru. Wrażliwość dynamicznych parametrów sieci przesyłowych na uszkodzenia lub zmiany w obciążeniach sugeruje możliwość zastosowania wibracyjnych metod monitoringu technicznego.

Zadaniem dla systemu MT dla linii elektroenergetycznych jest przede wszystkim zwiększenie bezpieczeństwa użytkowania sieci. Jednak system MT powinien także:

1. dostarczyć danych do weryfikacji procedur projektowych
2. zbierać dane i wykrywać nietypowe zdarzenia w zachowaniu się konstrukcji
3. zbierać dane o obciążeniach zewnętrznych
4. wykrywać uszkodzenia w najszybszym możliwym czasie
5. dostarczać informacji w czasie rzeczywistym o stanie konstrukcji
6. wysyłać ostrzeżenia w przypadku wystąpienia obciążeń ekstremalnych
7. wspierać bezpieczeństwo zaraz po wystąpieniu awarii
8. dostarczać danych do planowania przeglądów konstrukcji
9. dostarczać wskazówek do technicznego utrzymania sieci, napraw lub ich modernizacji.

4. UWAGI KOŃCOWE

Znaczna część infrastruktury elektroenergetycznej w Polsce i Europie jest stara lub osiąga zakładany wiek eksploatacyjny. Zastosowanie systemów monitoringu technicznego w krótkim lub długim okresie użytkowania pozwoliłoby na zebranie informacji niezbędnych do podjęcia poprawnych decyzji dotyczących utrzymania, remontów lub modernizacji istniejącej infrastruktury. Przykładem może być prosty i szybki monitoring parametrów dynamicznych słupa i przewodów linii przesyłowych wysokiego napięcia z zastosowaniem metod bazujących na organiach.

Aktualnie prace nad systemami monitoringu są przedmiotem badań wielu międzynarodowych zespołów. Rozwiązania stosowane w systemach MT wykorzystują najnowsze osiągnięcia w technologiach pomiarowych, teleinformatycznych, przetwarzania sygnałów, identyfikacji, modelowania numerycznego, projektowania konstrukcyjnego, wykonawstwa i zarządzania wiedzą. Użycie systemów monitoringu technicznego stanowi narzędzie zapobiegania awarii i pozwala w znacznym stopniu zredukować negatywne skutki po katastrofie wywołanej obciążeniami ekstremalnymi.

PODZIĘKOWANIA

Autor dziękuje dr Teresie Paczkowskiej i dr. Wiesławowi Paczkowskiemu z Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technicznego za udostępnienie zdjęcia kaskadowego uszkodzenia słupów wysokiego napięcia linii Morzyczyn – Police.

BIBLIOGRAFIA

1. Ko J.M., Ni Y.Q., Technology developments in structural health monitoring of large-scale bridges *Engineering Structures*, 27, nr 12, October 2005, s. 1715–1725.
2. Liu D.A., Yang Z.F., Tang C.H., Wang J., Liu Y., An automatic monitoring system for the shiplock slope of Wuqiangxi Hydropower Station *Engineering Geology*, 76, nr 1–2, December 2004, s. 79–91.
3. Robertson A., Farrar C., Sohn H., Singular detection for structural health monitoring using holder exponents, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 17(6), 2003, s. 1163–1184.
4. Selerski S., Chmielewska I., Automatyczne systemy technicznej kontroli zapór (ASTKZ) Dębe, Włocławek i Wióry – podobieństwa i różnice. *Bezpieczeństwo zapór – bezpieczeństwo ludności i środowiska, Monografie Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej*, 2009, s. 98–112.
5. Świdziński W., Świerczewski W., 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*, 2009, s. 98–112.
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*, 10/2009.
7. Doeherty J., Handbook on Experimental Mechanics, Bethel, CT: Society for Experimental Mechanics Inc., Chapter 12, *Nondestructive evaluation*, 1987.
8. Cawley, P., Defect location in structures by a vibration technique, Ph.D. thesis, Department of Mechanical Engineering, University of Bristol, 1978.
9. Wilcox P., *Lamb wave inspection of large structures using permanently attached transducers*, Ph.D. thesis, Department of Mechanical Engineering, Imperial College of Science, 1998.
10. Boavids J., Oliveira A., Berberan A., Dam monitoring using combined terrestrial imaging systems, 13th Symposium on Deformation Measurement Analysis, Lisbon 2008.
11. Wilde K., Modal diagnostics of civil engineering structures, Wydawnictwa Politechniki Gdańskiej, 2008.
12. Rucka M., Wilde K., Application of continuous wavelet transform in vibration based damage detection method for beam and plates. *Journal of Sound and Vibration*, 297, 2006, s. 536–550.
13. Mulherin M., Atmospheric icing and communication tower failure in the United States, *Cold Regions Science and Technology*, 27, 1998, s. 91–104.
14. Paczkowska T., Paczkowski W., Aspekty budowlane katastrofy energetycznej w rejonie szczecińskim, *Awarie Budowlane*, XXIV Konferencja Naukowo-Techniczna Szczecin – Międzyzdroje, 2009, s. 151–176.
15. Maguire J., Residual life assessment of electricity pylons – a case study, *Key Engineering Materials*, 413–414, 2009, s. 219–228.