

ZAPOBIEGANIE AWARIOM BUDOWLANYM ISTNIEJĄCYCH KONSTRUKCJI POPRZEZ CIĄGŁE POMIARY WIELKOŚCI DYNAMICZNYCH W CZASIE BUDOWY

RAFAŁ SIEŃKO, *e-mail: rsienko@pk.edu.pl*

TOMASZ HOWIACKI

Politechnika Krakowska

ŁUKASZ BEDNARSKI

Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie

Streszczenie: Współcześnie, ze względu na dużą liczbę oddziaływań dynamicznych, ale także ze względu na rozwój nauki i technologii pomiarowych, coraz częściej docenia się rolę monitoringu wielkości dynamicznych w trakcie prowadzonych prac budowlanych. Kontrola procesu budowy na podstawie mierzonych w sposób ciągły drgań jest jednak zadaniem bardzo złożonym. Trudności wynikają między innymi z samego zagadnienia generowania, propagacji oraz odbioru drgań przez obiekty budowlane, braku jednoznacznych kryteriów oceny wpływu tych oddziaływań na stan techniczny różnego rodzaju konstrukcji budowlanych, problemów w budowie modeli teoretycznych oraz konieczności zaangażowania skomplikowanych procedur informatycznych współpracujących z elektroniką pomiarową, dzięki którym możliwe będzie natychmiastowe informowanie o wystąpieniu ewentualnych nieprawidłowości. Tylko takie podejście do pomiarów będzie w stanie w sposób efektywny zapobiegać powstawaniu uszkodzeń oraz awarii istniejących obiektów znajdujących się w obszarze wpływu prowadzonych prac budowlanych o charakterze dynamicznym. W niniejszym referacie opisano wybrane przykłady realizacji systemów monitorowania dynamicznego konstrukcji w Polsce.

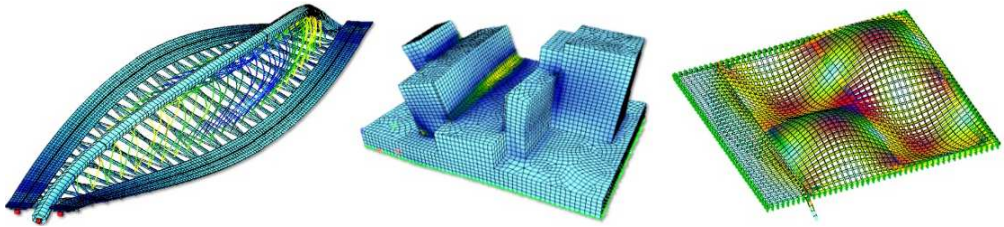
Słowa kluczowe: oddziaływania dynamiczne, kontrola procesu budowy, pomiary drgań, monitoring konstrukcji

1. Wprowadzenie

Rozwój nauk technicznych, takich jak wytrzymałość materiałów czy mechanika budowli, wspomagany ciągłym postępowaniem w obszarze szeroko rozumianych metod numerycznych umożliwiających budowanie skomplikowanych modeli rzeczywistych obiektów, pozwolił na prognozowanie zachowania się konstrukcji na drodze zaawansowanych rozważań teoretycznych [1, 2] – rys. 1. Dzięki temu powstało wiele wyjątkowych pod względem geometrycznym, konstrukcyjnym, statycznym oraz materiałowym obiektów. Niestety, często wiedza teoretyczna weryfikowana była negatywnie przez rzeczywistość, co skutkowało awariami, a nawet katastrofami budowlanymi [3, 4]. Oczywiście, należy bezsprzecznie stwierdzić, że zdarzenia te dostarczały zazwyczaj istotnej wiedzy na temat zjawisk wcześniej nieznanymi lub zaniedbywanymi oraz przypominały, że w procesie budowy istotną rolę odgrywa człowiek i jego niedoskonałość. Należy zdawać sobie sprawę, że nawet współcześnie, nie jest możliwe precyzyjne ujęcie w modelu teoretycznym wszystkich zmiennych: począwszy od niejednorodności materiałów, imperfekcji geometrii, tolerancji wykonania, losowości oddziaływań o różnym charakterze, niejednorodnych warunków gruntowo-wodnych, wpływu zmęczenia, zjawisk reologicznych i wielu innych.

W związku z powyższym coraz częściej wykorzystuje się w budownictwie, stosowane obecnie już na szeroką skalę w przemyśle kosmicznym i lotniczym, monitorowanie konstrukcji

(ang. *Structural Health Monitoring*) [5], polegające na ciągłej w czasie kontroli zachowania się obiektu budowlanego na podstawie pomiarów wybranych wielkości fizycznych. Tendencja ta jest zgodna z ogólną wytyczną zawartą w normie stanowiącej podstawę projektowania konstrukcji (Eurokod 0 [6]), która zaleca, aby prowadzić „kontrolę w stadium projektowania, wykonywania i utrzymania” obiektów budowlanych. Aby kontrola w trakcie procesu budowy była efektywna, konieczne jest uprzednie rozpoznanie występujących oddziaływań i zagrożeń [7]. Rozpoznanie tym powinna być objęta nie tylko wznoszona konstrukcja, ale również obiekty już istniejące, a znajdujące się w zasięgu możliwego wpływu prowadzonych prac budowlanych. Oddziaływania powstające w czasie budowy mogą bowiem skutkować obniżeniem ich stanu technicznego, a nawet prowadzić do uszkodzenia lub awarii.



Rys. 1. Przykłady przestrzennych modeli konstrukcji stosowanych do analizy dynamicznej [SOFiSTiK]

W dalszej części referatu opisano wybrane przykłady realizacji systemów monitorowania dynamicznego konstrukcji w Polsce. Zasada ogólna mówiąca, że lepiej zapobiegać niż leczyć (łac. *morbum evitare quam curare facilius est*) jest w inżynierii lądowej aktualna szczególnie dziś, w dobie nowoczesnych technologii pomiarowych, które można efektywnie wykorzystać do kontroli procesu budowy oraz w czasie eksploatacji wykonanej już konstrukcji.

2. Monitoring dynamicznej odpowiedzi konstrukcji

W rozwiązywaniu zagadnień dynamiki budowli coraz częściej wykorzystuje się przestrzenne modele numeryczne (teoretyczna analiza modalna) oraz pomiary drgań w skali naturalnej, przy czym drgania te generowane są według ściśle zaprojektowanej procedury, a konstrukcja na czas pomiarów zazwyczaj wyłączana jest z eksploatacji (eksperymentalna analiza modalna [8]). W rzeczywistości, nie zawsze jest możliwe wykonanie badania obiektu, który musi być pozbawiony innych, niż zaprojektowane, oddziaływań dynamicznych. Co więcej, wydaje się, że pomiary, które prowadzone będą w sposób ciągły na obiekcie użytkowanym, którego właściwości i oddziaływania zmieniają się w czasie, będą znacznie lepiej opisywać zachowanie się rzeczywistej konstrukcji (operacyjna analiza modalna) – tablica 1. To ostatnie podejście można zakwalifikować do zadań diagnostyki, w której dany jest obiekt, rzeczywiste oddziaływania oraz przyjęte kryteria oceny, a poszukiwana jest m.in. odpowiedź na pytanie, czy istnieje związek przyczynowo-skutkowy między stanem technicznym obiektu, a występującymi oddziaływaniami [9]. Rozwiązanie tego zagadnienia wraz z analizą stanu wyężenia konstrukcji pozwala na wskazanie sygnałów diagnostycznych, np. przyspieszeń drgań w wybranych punktach oraz określenie ich wartości granicznych. Kolejnym krokiem jest instalacja systemu monitorowania, który w czasie rzeczywistym może śledzić wybrane sygnały diagnostyczne.

Aby system monitorowania dynamicznego konstrukcji był skuteczny, a pozyskiwane informacje wiarygodne i użyteczne, konieczne jest spełnienie kilku warunków, m.in. związanych z wyborem mierzonych wielkości, sposobem montażu i lokalizacją punktów pomiarowych, a także zastosowanymi procedurami przetwarzania danych i informowania o zagrożeniach.

Tablica 1. Teoretyczna, eksperymentalna oraz operacyjna analiza dynamiczna konstrukcji [8, 10]

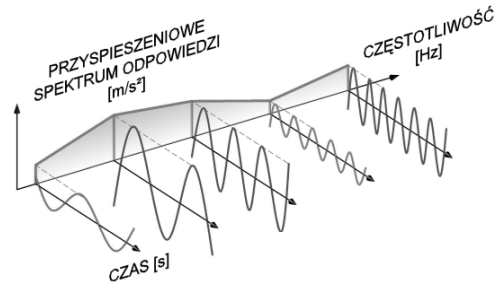
Rodzaj analizy dynamicznej konstrukcji		
Teoretyczna	Eksperymentalna	Operacyjna
– założone parametry modelu (materiały, geometria, warunki brzegowe, obciążenia stałe)	– pomiary rzeczywistego obiektu	– pomiary rzeczywistego obiektu
– zaprojektowane lub przyjęte na podstawie dostępnych baz danych wzbudzenie	– ograniczenia dokładności urządzeń pomiarowych	– pomiary ciągłe w czasie
– współcześnie przestrzenne modele numeryczne (konieczność zastosowania zaawansowanego oprogramowania)	– zaprojektowane wzbudzenie, którego wystąpienie w normalnych warunkach eksploatacji jest zazwyczaj mało prawdopodobne	– ograniczenia dokładności urządzeń pomiarowych
– projektowanie, diagnoza, ekspertyza	– konieczność wyłączenia obiektu z eksploatacji na czas eksperymentu	– rzeczywiste warunki pracy i oddziaływania dynamiczne
	– projektowanie, diagnoza, ekspertyza	– możliwość realnej kontroli bezpieczeństwa pracy konstrukcji
		– projektowanie, diagnoza, ekspertyza

W przypadku, gdy mamy do czynienia z niskoczęstotliwościowym ruchem danego elementu konstrukcji, korzystnie jest mierzyć jego przemieszczenia (najczęściej występują wtedy duże amplitudy), natomiast, gdy ruch charakteryzuje się wysokimi częstotliwościami zazwyczaj instalowane są czujniki przyspieszeń lub prędkości [11]. Wybór mierzonej wielkości może zależeć również od wytycznych formalnych zawartych w normach i przepisach, na których będzie opierać się dalsza analiza sygnałów. W Polsce, w ocenie oddziaływań dynamicznych na konstrukcje budynków, najczęściej wykonywane są pomiary przyspieszeń [12, 13] lub prędkości drgań w punktach zlokalizowanych bezpośrednio na fundamentach lub ścianach fundamentowych na wysokości powierzchni otaczającego obiektu terenu lub na elementach konstrukcyjnych na kierunkach ich głównych przemieszczeń (np. prostopadle do powierzchni ścian lub stropów). Czujniki (powszechnie wykorzystywane są akcelerometry piezoelektryczne lub piezorezystancyjne) należy instalować tak, aby ich ruch (w szczególności w rozumieniu funkcji przyspieszenia) był taki sam, jak ruch konstrukcji bez wprowadzania dodatkowych zakłóceń [14]. Należy pamiętać, by masa urządzeń pomiarowych była znacznie mniejsza od masy monitorowanego elementu, a połączenie z elementem konstrukcyjnym wystarczająco sztywne. Ze względu na minimalizację gabarytów współczesnych czujników, spełnienie powyższych wymagań nie stanowi obecnie istotnego zagadnienia.

Mierzone przez czujniki zmiany wielkości fizycznych przetwarzane są przez elektronikę pomiarową rejestratorów oraz oprogramowanie informatyczne w taki sposób, by użytkownikom (np. kierownictwu budowy) przekazywane były wyłącznie informacje w użytecznej dla nich postaci. Dlatego rejestrowane w sposób ciągły wartości przyspieszeń drgań przechowywane są w pamięci tymczasowej, a dopiero po przekroczeniu zdefiniowanej przez Eksperta wartości granicznej (np. minimalnej, maksymalnej, średniokwadratowej wartości przyspieszenia z danego odcinka czasu itp.), konkretne przebiegi czasowe przesyłane są do pamięci trwałej i poddawane dalszej analizie. Warto zwrócić uwagę, że określenie wartości granicznych powinno być poprzedzone pomiarami tła dynamicznego, tj. efektów oddziaływań dynamicznych w okresie, gdy na budowie niewykonywane są jeszcze żadne prace (np. ruch samochodowy, przejazdy tramwajów, metra itp.).

Zarejestrowany przebieg czasowy ma charakter dyskretny, przy czym pomiary przyspieszeń powinny być prowadzone z częstotliwością co najmniej 4-ro krotnie większą (zalecana 10-cio krotnie większa) niż prognozowana częstotliwość drgań analizowanej konstrukcji. W celu zidentyfikowania w całym przebiegu czasowym dominujących częstotliwości drgań konstrukcji, czyli częstotliwości, przy których amplitudy przyspieszeń drgań pomierzone przez dany czujnik są największe, sygnał wejściowy jest odpowiednio filtrowany, a następnie rozkładany na składowe harmoniczne. Składowe te przedstawiane są w funkcji częstotliwości w postaci widma częstotliwościowego sygnału (przyspieszeniowego spektrum odpowiedzi).

Do analizy spektralnej stosuje się powszechnie dyskretną transformatę Fouriera (ang. *Discrete Fourier Transform DFT*).



Rys. 2. Konstrukcja przyspieszeniowego spektrum odpowiedzi

Zarejestrowany przebieg czasowy można zatem wyrazić jako złożenie drgań zachodzących z różnymi częstotliwościami (rys. 2). Zastosowanie odpowiednich filtrów pozwala rozdzielić sygnał na tercjowe pasma częstotliwości (1/3 oktawowe) opisane wartościami częstotliwości środkowych f_{sr} . Przebieg czasowy przyspieszenia $a(t)$ opisywany jest ostatecznie funkcją $a(t, f_{sr})$. Przypisując pasmom tercjowym wartości maksymalne przyspieszeń tworzone są widma częstotliwościowe, których wartości zgodnie z [12] mogą stanowić kryterium oceny wpływu drgań na budynki. W przypadku oceny oddziaływań dynamicznych na ludzi znajdujących się w budynkach, stosuje się wartości skuteczne (średniokwadratowe) [15].

W warunkach placu budowy nie jest możliwe przeglądanie wyników analizy spektralnej, czy tercjowej dla każdego zarejestrowanego sygnału z uwagi na pracochłonność tego procesu. Do inżynierów odpowiedzialnych za bezpieczeństwo prowadzonych prac budowlanych przesyłany musi jednoznaczny komunikat, umożliwiający podjęcie natychmiastowej decyzji. Stąd wstępna ocena wpływu drgań na monitorowane budynki prowadzona jest często za pomocą wskaźnika drgań W . Wartości obliczonych wskaźników dla poszczególnych budynków (lub pojedynczych punktów pomiarowych), mogą być prezentowane w czasie rzeczywistym na monitorze stacji alarmowej, zlokalizowanej na terenie placu budowy. Pozwala to na natychmiastowe podjęcie odpowiednich działań zapobiegających negatywnemu wpływowi drgań na budynki otaczające teren budowy. Bezwymiarowy wskaźnik drgań jest to zmodyfikowany wskaźnik $WODB$ [16], który stanowi miarę odczuwalności drgań przez konstrukcję budynków. Jest to stosunek maksymalnej wartości przyspieszenia drgań $a_{max,i}$ uzyskanego z analizy tercjowej do wartości przyjętej granicy $a_{gr,i}$ (np. na podstawie normy [12]) w tym samym paśmie częstotliwości i , zgodnie z formułą:

$$W = \max \left(\frac{a_{max,i}}{a_{gr,i}} \right) \quad (1)$$

Jeśli wartość wskaźnika W wyznaczonego w dowolnym punkcie pomiarowym jest równa lub większa od jedności, oznacza to osiągnięcie lub przekroczenie zadanej wartości granicznej. Konieczne jest wówczas podjęcie decyzji o wstrzymaniu danego sposobu prowadzenia prac budowlanych i przyjęciu nowej lub zmodyfikowanej technologii.

Ważnym aspektem prowadzonych pomiarów jest autodiagnostyka samego systemu monitoringu, polegająca na możliwości natychmiastowego informowania administratora o zaistniałych nieprawidłowościach w pracy urządzenia. Nieprawidłowości te mogą wynikać np. z przerw w dostawie zasilania elektrycznego, awarii elektroniki, zakłóceń pomiarów pojedynczego czujnika lub jego uszkodzenia.

W dalszej części referatu opisano konkretne przykłady zastosowań systemów monitorowania dynamicznego konstrukcji znajdujących się w obszarze wpływu oddziaływań parasejsmicznych, których źródłem były prowadzone prace budowlane.

3. Wbijanie pali prefabrykowanych w podłoże gruntowe

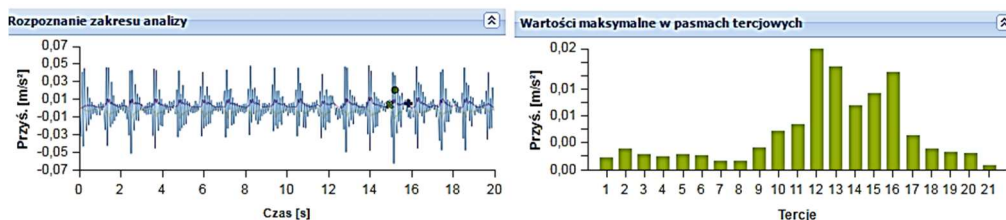
Pierwszy z przykładów dotyczy oddziaływań związanych z wbijaniem pali prefabrykowanych w podłoże gruntowe. W związku z bardzo bliskim sąsiedztwem zabudowy mieszkalnej, głównie w postaci murowanych domów jednorodzinnych z lat 60-tych XX w., istniała uzasadniona obawa, że prowadzone prace mogą skutkować niekorzystnym wpływem na ich stan techniczny [17]. Najczęstszymi objawami przekroczenia stanów granicznych jest powstawanie lub rozwój zarysowań, spękania oraz odpajanie wypraw tynkarskich.

Dwuosiowe punkty pomiaru drgań zainstalowano w poziomie terenu na fundamentach wybranych budynków, mocując czujniki w taki sposób, by realizowały pomiar przyspieszeń drgań w dwóch prostopadłych do siebie kierunkach poziomych. Widok przykładowych punktów pomiarowych wyposażonych w akcelerometry piezoelektryczne pokazano na rys. 3.



Rys. 3. Widok przykładowych punktów pomiarowych, w których mierzono przyspieszenia drgań (fot. R. Sieńko)

Początkowo wbito dwa pale testowe, stopniowo zwiększając energię uderzeń kafara i analizując w czasie rzeczywistym odpowiedź poszczególnych budynków zgodnie z przyjętymi na podstawie normy [12] kryteriami oceny. Przykładowy, charakterystyczny dla wbijania pali przebieg czasowy przyspieszeń drgań wraz z jego widmem amplitud maksymalnych w poszczególnych pasmach tercjowych pokazano na rys. 4.



Rys. 4. Charakterystyczny przebieg czasowy drgań zarejestrowany w czasie wbijania pali wraz z wynikami analizy tercjowej (dzięki uprzejmości SHM System)

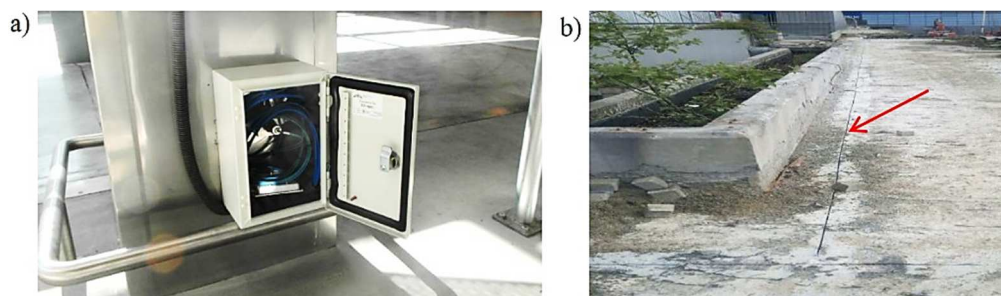
Największa wartość amplitudy przyspieszeń zarejestrowana została w tercji 12 (środkowa wartość częstotliwości w tym paśmie wynosi 12,5 Hz), jednak osiągnęła ona zaledwie granicę A odczuwalności drgań przez budynek zgodnie ze skalą SWD-I [12]. Pomiar testowe

wykazały, że wbijanie pali nie powinno powodować niekorzystnego wpływu na obiekty sąsiednie. Ostatecznie, ze względu na zmienność warunków gruntowych, ekspert nadzorujący pracę z ramienia Wykonawcy zdecydował o pozostawieniu systemu monitorowania na cały okres realizacji posadowienia pośredniego. W trakcie pomiarów zwrócono uwagę m. in. na fakt, że nie zawsze drgania muszą mieć najbardziej niekorzystny wpływ na budynki, które zlokalizowane są najbliżej ich źródła. Propagacja drgań w podłożu gruntowym zależy bowiem w bardzo istotny sposób od zmiennych w przestrzeni i czasie warunków gruntowo-wodnych.

4. Rozbiórka żelbetowego parkingu

Kolejnym przykładem praktycznego zastosowania systemu monitorowania dynamicznego będą prace rozbiórkowe żelbetowej konstrukcji parkingu wielopoziomowego zlokalizowanego w bezpośrednim sąsiedztwie istniejącego obiektu handlowego. Ze względu na bardzo duże oddziaływania dynamiczne generowane podczas prac rozbiórkowych (młoty udarowe na pojazdach gąsienicowych, przewracanie i upadek elementów konstrukcji) istniało realne zagrożenie negatywnego wpływu drgań na istniejący budynek. Ekspert nadzorujący prace zdecydował więc, że konieczne jest prowadzenie ciągłego w czasie pomiaru przyspieszeń drgań wybranych elementów konstrukcji (słupów i ścian) obiektu wielkopowierzchniowego w czasie całego procesu rozbiórki.

Widok przykładowego punktu pomiarowego w obudowie ochronnej przedstawiono na rys. 5a. Procedury ostrzegawcze zostały zdefiniowane w taki sposób, aby po zarejestrowaniu przez czujniki przebiegów drgań, których wybrane estymaty nie spełniały przyjętych kryteriów bezpiecznej pracy konstrukcji, system automatycznie informował o tym fakcie kierującego pracami inżyniera poprzez wiadomość e-mail oraz sms. Funkcjonalność ta okazała się kluczowa, ponieważ informacje wysyłane w czasie rzeczywistym na plac budowy natychmiast po przekroczeniu przyjętej wartości granicznej oddziaływania, narzucały wstrzymanie rozbiórki i zmianę jej technologii. Ciągły pomiar drgań umożliwił również wykrycie poważnego błędu konstrukcyjnego, jakim było sztywne wypełnienie dylatacji między sąsiadującymi obiektami. Brak szczeliny skutkowało przenoszeniem drgań praktycznie bez ich tłumienia z części podlegającej rozbiórce na część, która miała być dalej eksploatowana. Postanowiono o ponownym oddylatowaniu konstrukcji za pomocą piły tarczowej (rys. 5b), co pozwoliło na bezpieczne dokończenie prac.

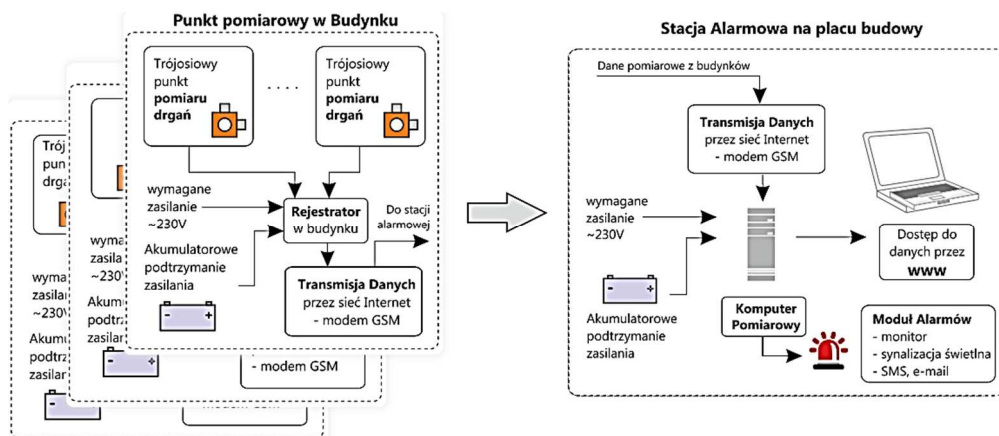


Rys. 5 a) widok przykładowego punktu pomiarowego w obudowie ochronnej, b) ponowne oddylatowanie płyty stropowej od pozostałej części konstrukcji (fot. M. Korusiewicz)

5. Budowa zespołu budynków w centrum Krakowa

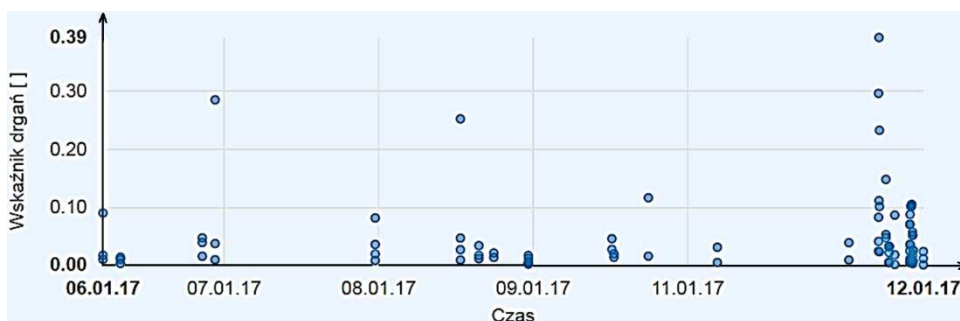
Jednym z największych w Polsce systemów monitorowania dynamicznego, realizującego pomiary przyspieszeń drgań w sposób ciągły, zdalny i automatyczny, jest system zaprojektowany na potrzeby budowy kompleksu budynków zlokalizowanych w ścisłej zabudowie

centrum Krakowa. Pomiarami zostały objęte cztery istniejące budynki oraz elementy konstrukcyjne w czterech, nowobudowanych obiektach. System zbudowany został łącznie z 24 trójosiowych punktów pomiarowych (72 akcelerometry piezoelektryczne), kilkunastu rejestratorów danych dynamicznych próbkujących dane z częstotliwością maksymalną 4 kHz, stacji alarmowej umieszczonej w biurze budowy oraz oprogramowania służącego do automatycznego przetwarzania danych pomiarowych i informowania o zagrożeniach oddziaływaniami dynamicznymi oraz o ewentualnej awarii samego systemu. Schemat budowy systemu monitorowania pokazano na rys. 6.



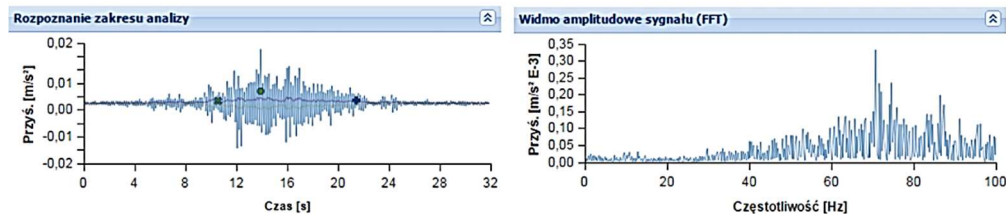
Rys. 6. Schemat budowy systemu monitorowania dynamicznego

Odpowiednio przetworzone dane pomiarowe ze wszystkich monitorowanych obiektów prezentowane są na monitorze stacji alarmowej w czasie rzeczywistym w postaci chwilowych wartości wskaźników drgań W zarejestrowanych przez system w okresie jednego tygodnia (rys. 7). W przypadku wystąpienia zagrożenia niekorzystnego wpływu prac o charakterze dynamicznym na sąsiednie budynki, system automatycznie informuje o tym fakcie osoby odpowiedzialne za pomocą wiadomości e-mail, sms oraz poprzez sygnalizator świetlny zainstalowany w biurze budowy. Dzięki tej funkcji możliwe jest podejmowanie natychmiastowych działań zaradczych polegających na ograniczeniu wpływów dynamicznych, czy wręcz zmianie technologii wykonania konkretnych robót budowlanych. Oczywistym jest, że koszty zapobiegania usterkom są zawsze znacznie mniejsze, niż koszty późniejszych napraw. Zainstalowany system monitorowania dynamicznego ma zatem realne uzasadnienie ekonomiczne.



Rys. 7. Przykładowy wykres wskaźnika drgań, prezentowany na monitorze stacji alarmowej

Analiza przebiegów czasowych drgań umożliwia wyodrębnienie wpływów dynamicznych nie pochodzących z placu budowy, a związanych z ruchem pociągów i tramwajów. Funkcjonalność ta ma bardzo istotne znaczenie z punktu widzenia ewentualnych sporów z zarządcami (właścicielami) sąsiednich obiektów w przypadku stwierdzenia przez nich wystąpienia uszkodzeń podczas realizacji budowy. Charakterystyczny przebieg czasowy drgań na kierunku poziomym w wybranym punkcie pomiarowym dla przejazdu tramwaju wraz z jego analizą spektralną pokazano na rys. 8.



Rys. 8. Charakterystyczny przebieg czasowy drgań na kierunku poziomym związany z przejazdem tramwaju wraz z jego analizą spektralną

6. Podsumowanie

Przedstawione w niniejszym referacie przykłady potwierdzają, że zainstalowanie systemu monitorowania dynamicznego konstrukcji istniejących budynków w pobliżu prowadzonych prac budowlanych może przynosić wymierne korzyści, zarówno w kontekście wzrostu bezpieczeństwa sąsiadujących obiektów, jak i w sensie ekonomicznym. Skuteczność prowadzonych pomiarów w zakresie realnej kontroli ryzyka wymaga jednak spełnienia wielu warunków, począwszy od wyboru czujników oraz miejsc i sposobu ich instalacji na konstrukcji, poprzez zastosowanie elektroniki obsługującej pomiary, a na oprogramowaniu do analizy pozyskanych danych i informowania o zagrożeniach kończąc. System zbudowany w taki sposób jest zgodny z założeniami metody operacyjnej, która w przeciwieństwie do metod eksperymentalnych, nie wymaga wyłączenia badanych konstrukcji z eksploatacji. Co więcej, pomiary realizowane w sposób ciągły umożliwiają uwzględnienie wpływu na mierzone wielkości fizyczne, zmieniających się w czasie właściwości konstrukcji związanych m. in. ze zjawiskami reologicznymi czy postępującą jej degradacją. Automatycznie uwzględniane są również zmienne w czasie oddziaływania nie tylko o charakterze dynamicznym, wynikające np. ze zmiany warunków hydrologicznych czy zmiany temperatury.

Należy podkreślić, że analiza dynamiczna konstrukcji zawsze wymaga indywidualnego podejścia do każdego zadania oraz stosowania zaawansowanych rozwiązań pomiarowych, a poprawna interpretacja wyników pomiarów – dobrego przygotowania merytorycznego i doświadczenia.

Literatura

1. Kawecki J., Kowalska A.: Tłumienie drgań w opisie sztywnościowo-bezwładnościowym, *Czasopismo techniczne*, 3-B/2010.
2. Rucka M., Wilde K., *Dynamika Budowli z przykładami w środowisku Matlab®*, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk, 2008.
3. Radomski W., *Katastrofy i awarie mostów a rozwój wiedzy budowlanej*, *Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne*, Wrzesień – Październik 2011.
4. Sieńko R., *Czy katastrof można uniknąć?*, *Budowlani – Biuletyn Małopolskiej Okręgowej Izby Inżynierów Budownictwa*, nr 21, styczeń – luty 2007.

5. Bednarski Ł., Sieńko R., Howiacki T., Wybrane zagadnienia monitorowania konstrukcji. XXX Jubileuszowe Ogólnopolskie Warsztaty Pracy Projektanta Konstrukcji. Szczyrk, 2015, s. 341–410.
6. PN-EN 1990: Eurokod 0, Podstawy projektowania konstrukcji.
7. Instrukcja ITB 443/2009, System kompleksowego zarządzania jakością w budownictwie. Bezdotykowe metody obserwacji i pomiarów obiektów budowlanych, Wydawnictwo ITB Warszawa 2009.
8. Wójcicki Z., Grosel J., Sawicki W.: Eksperymentalne badania dynamiczne budowli, Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, 2014.
9. Kawecki J., Stypuła K.: Zapewnienie komfortu wibracyjnego ludziom w budynkach narażonych na oddziaływanie komunikacyjne, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków, 2013.
10. Howiacki T., Teoretyczna, eksperymentalna oraz operacyjna analiza modalna konstrukcji na wybranych przykładach, XVII Konferencja Naukowa Doktorantów Wydziałów Budownictwa, Gliwice, 11–12.05.2016.
11. Ciesielski R., Kawecki J., Maciąg E.: Ocena wpływu wibracji na budowle i ludzi w budynkach (diagnostyka dynamiczna), Instytut Techniki Budowlanej, Warszawa, 1993.
12. PN-B-02170:2016-12 Ocena szkodliwości drgań przekazywanych przez podłoże na budynki.
13. Ciesielski R., Ujęcie obliczeniowe oraz ocena wpływu drgań i wstrząsów pochodzących ze źródeł zewnętrznych na niektóre typy budowli, Budownictwo Lądowe nr 4, Politechnika Krakowska, Zeszyt Naukowy nr 1, Kraków, 1961.
14. Department of Environment and Conservation NSW, Assessing Vibration: a technical guideline, Sydney, February 2006.
15. PN-88/B-02171 Ocena wpływu drgań na ludzi w budynkach.
16. Stecz P., Wpływ działania na budynki długotrwałych obciążeń dynamicznych generowanych przez jazdy pociągów metra, Rozprawa doktorska, Politechnika Krakowska, Kraków, 2014.
17. Stypuła K., Nowe inwestycje a ochrona środowiska przed drganiami, Izolacje 10/2008.

EXISTING BUILDINGS STRUCTURAL FAILURES PREVENTION THROUGH CONTINUOUS MEASUREMENTS OF DYNAMIC QUANTITIES DURING CONSTRUCTION PROCESS

Abstract: Nowadays, the role of dynamic measurements during construction is important not only due to the increase of intense dynamic load sources, but also because of the science development, growth of engineering consciousness and the ability to apply advanced technical solutions. The control of these processes is based on measured real-time vibrations. However, the complexity of generation and propagation of vibrations and response of structures make the real-time measurements a difficult task. In addition, the lack of clear criteria for evaluation of the impact of these actions on technical condition of the structure, difficulties in theoretical modeling and the need to involve advanced informatic and electronic means, through which it will be possible to immediately inform the authorized persons about abnormalities make the task even more complex. This approach enables to prevent damage or failure of existing structures, located in the area of the damaging vibration. This paper describes the basic principles of dynamic monitoring systems with examples of some projects in Poland.

Keywords: dynamic actions, construction process control, vibration measurements, monitoring