ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 2005
Seria: BUDOWNICTWO z. 104 Nr kol.1695

Prof. dr hab. inż. Janusz KAWECKI
Politechnika Krakowska

ROLA BADAŃ DOŚWIADCZALNYCH W PRACACH NAUKOWYCH*

Streszczenie. Badania doświadczalne są ważnym narzędziem pracy naukowej. W pracy przedstawiono najważniejsze informacje zadania badań doświadczalnych. Zwrócono również uwagę na planowanie i realizację badań doświadczalnych oraz zestawione podstawowe błędy występujące w pracach wykorzystujących badania doświadczalne. Kilka przykładów realizacji badań doświadczalnych przeprowadzonych na konstrukcjach w sali naturalnej dobrze ilustrują opisywane tu zagadnienia.

1. Wstęp

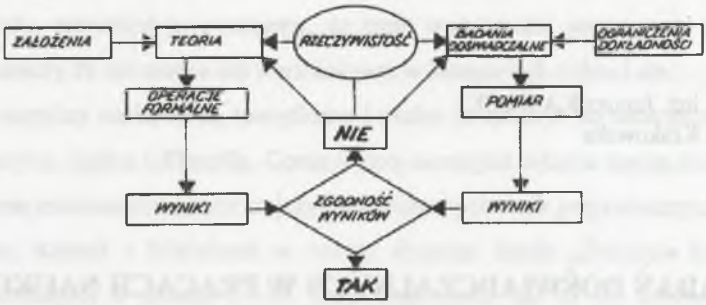
Podstawowym celem nauki jest poznanie rzeczywistości. O tym, że dany obszar rzeczywistości został rozpoznany, świadczy, umiejętność określenia praw rządzących zjawiskami. Znając bowiem owe prawa (zasady), możemy przewidzieć i kształtować zmiany zachodzące w danym obszarze rzeczywistości na podstawie znanych obserwacji zachowania się tej rzeczywistości.

Zrealizowanie podanego wyżej zadania może nastąpić na drodze teoretycznej lub badań doświadczanych (empiria).

Rzeczywistość nie jest całkowicie poznawalna, ale dokładność jej poznania można odpowiednio zwiększać, stosując coraz to lepsze metody i narzędzia umożliwiające to poznanie. Można więc stwierdzić, iż rzeczywistość jest prawie poznawalna. Kryterium tego poznania niech będzie sformułowane następującym żądaniem: „Teoria ma być zgodna z wynikami badań doświadczalnych, a te zaś powinny być możliwie najbliższe rzeczywistości".

Zarówno w „teorii", jak i w: badaniach doświadczalnych" na samym początku występują ograniczenia. W przypadku „teorii" są to założenia, a w przypadku „badań doświadczalnych" ograniczenia dokładności tych badań. Procedurę poznania rzeczywistości przedstawiono schematycznie na rys. 1.

*Wykład wygłoszony na V Konferencji Naukowej Doktorantów Wydziałów Budownictwa, Wisła, 18-19.11.2004 r.



Rys. 1. Schemat procedury poznawania rzeczywistości

2. Teoria eksperymentu i jej wykorzystanie w badaniach doświadczalnych

W badaniach doświadczalnych istotną rolą odgrywają takie czynniki, jak: walory intelektualne badacza, technika pomiarowa (np. możliwa do stosowania aparatura, jej dokładność i warunki pracy itp.) oraz metodyka badań doświadczalnych.

Metodyka badań doświadczalnych uwzględnia wyniki prac z różnych obszarów działalności naukowej, a w tym przede wszystkim:

a) teorii eksperymentu,

b) modelowania matematycznego,

c) programowania badań doświadczalnych,

d) analizy wyników badań doświadczalnych.

Można wykazać, że występują różne sprzężenia informacyjne między wymienionymi wyżej obszarami (np. b i c, c i d, d i a).

Przyjmuje się datować początki teorii eksperymentu na czas, gdy wykonano pierwsze doświadczenia. Autor doświadczenia musiał bowiem wykonać trzy główne czynności opisywane w teorii eksperymentu, tzn.:

- wyodrębnił jakiś czynnik,
- zmieniał wartość tego czynnika,
- badał wpływ tych zmian na wynik.

Dobrym przykładem ilustrującym praktyczną realizację powyższej procedury może być doświadczenie Galileusza. Zastosował opuszczanie różnych ciężarów z wysokiej wieży. Celem doświadczenia było wykazanie błędu założenia Arystotelesa, że prędkość spadania

zależy od ciężaru ciała spadającego. W przyjętej technice pomiarowej (pomiar czasu spadania) zastosował dziurawe wiadro wypełnione wodą.

Nie zawsze jednak podana wyżej procedura może być zastosowana, gdyż:

- nie wszystkie czynniki można badać oddzielnie,
- wpływ jednego czynnika może zależeć od wartości innych,
- istnieją czynniki, których nie można ustalić na wybranym poziomie wartości,
- występują czynniki niemierzalne (albo nie znane), które mogą również oddziaływać na wynik.

Wszystkie, wymienione wyżej, wady skierowały badaczy na poszukiwanie innej metodyki badań doświadczalnych. Zostały więc opracowane metodyki:

A- „białej skrzynki" (model dedukcyjny, cybernetyczny), w której badania planuje się i realizuje na podstawie znanych praw fizyki, dysponując informacjami o zależnościach przyczynowo- skutkowych;

B- „czarnej skrzynki" (model empiryczny, statystyczny), w której aproksymuje się korelacje statystyczne między badanymi czynnikami.

W każdym z podanych wyżej działań można wskazać na zalety i wady. W przypadku (A) zaletą jest to, iż poprawna realizacja prowadzi do opracowania teorii zdolnej do eksploracji, wadą zaś jest praktycznie brak możliwości realizacji w odniesieniu do bardzo złożonych obiektów badań i całych systemów. W przypadku (B) zaletą jest efektywność (wymagane informacje uzyskuje się przy ograniczonych kosztach), a wadą- ograniczone zastosowanie utylitarne (poza obrębem objętym badaniami).

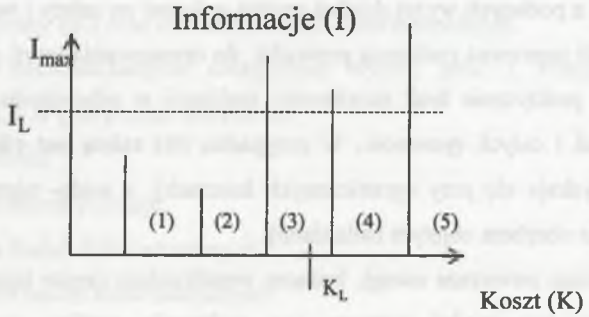
Uwzględniając powyższe uwagi, badacze współcześnie często łączą metodyki (A) i (B). Opracowywany jest model wstępny (na podstawie analizy teoretycznej), następnie przeprowadzane są badania doświadczalne i uzyskane wyniki w postaci np. korelacji statystycznych poddawane są analizie merytorycznej. Otrzymany model końcowy badany jest pod kątem zgodności z logiczną analizą teoretyczną.

W praktyce, oczekiwania odnośnie do opracowanych modeli dotyczą rozwiązań optymalnych. Bardziej potrzebna jest znajomość stanów optymalnych niż chwilowa znajomość teorii procesu. Oczekiwane są również modele zapewniające możliwość prognozowania zachowania się obiektu w przewidywanych stanach działania na niego różnych czynników. Stąd wynikają zainteresowania rozwijaniem metod gradientowych, adaptacyjnych i automatycznego sterowania. Kierunkowe wytyczne w tym zakresie można ująć w wymaganiach ograniczenia czasu i kosztów badań oraz uzyskania możliwie optymalnych zbiorów informacji.

3. Wybór programu badań

Bardzo często badacz staje przed problemem wyboru programu badań. Takich wyborów dokonują również zespoły eksperckie powołane do oceniania wniosków o granty naukowe (zamawiane, celowe, projekty badawcze) finansowane przez różnego rodzaju instytucje. Wiadomo, iż badania wymagają nakładów zarówno w zakresie czasu, jak i środków finansowych. Każde badania dostarczają również określonych informacji. Wszystko to trzeba uwzględnić przy wybieraniu programu badań.

Przykładowo, na rys. 2 zestawiono w układzie współrzędnych: K (koszt) i I (wymiar informacji prognozowanych do uzyskania w danym programie badawczym) pięć programów badań. Zaznaczono również linię odpowiadającą dolnemu limitowi informacji (I_L), które powinny być uzyskane w programie badań oraz punkt (K_L) wskazujący na limit górny kosztów, które można przeznaczyć na badania w celu osiągnięcia zamierzonego celu.



Rys. 2. Prezentacja programów badawczych pod kątem dokonania wyboru najkorzystniejszego

Możliwości wyboru programu będzie w tym przypadku kilka i zależeć będą od przyjętych kryteriów wybierania. I tak np.:

- wybrany zostanie program (5), gdyż prowadzi do uzyskania maksymalnego zbioru informacji, ale pod warunkiem, iż finansujący badania ma do dyspozycji nieograniczone środki finansowe;
- wybrany zostanie program (3), gdyż nie przekraczając limitu K_L, daje nie tylko informacje w poziomie I_L, a nawet ich więcej.

4. Badania doświadczalne w pracy naukowej

Badacz (autor pracy naukowej, publikacji itp.) zajmujący się badaniami doświadczalnymi powinien widzieć ich usytuowanie w późniejszym publikowanym opracowaniu. W szczególności, z tego usytuowania powinien zdawać sobie sprawę autor pracy doktorskiej.

W najogólniejszym ujęciu pracy, w której będzie występowała część związana z badaniami doświadczalnymi, można wyróżnić cztery „stałe" części. Będą to:

I. Wprowadzenie (cel uzasadniający wybór tematu i zakres realizacji).

II. Analiza tematu (opis wyników dotychczasowych prac z zakresu tematu, ocena krytyczna wyników dotychczasowych prac, wnioski z analizy dotychczasowych rozwiązań prowadzące do uzasadnienia tezy naukowej pracy).

III. Badania własne, teoretyczne i doświadczalne (cel i zakres badań doświadczalnych, koncepcja badań i w tym: postawienie hipotezy oraz analiza czynnikowa, metodyka badań i technika pomiarów, analiza wyników badań, wnioski poznawcze, utylitarne i rozwojowe).

IV. Podsumowanie.

W części III wyszczególniono te elementy, które powinny występować w pracy doktorskiej o charakterze doświadczalnym, co zaznaczono przez podkreślenie odpowiedniej informacji.

Na końcu rozprawy powinno znaleźć się zestawienie literatury rzeczywiście wykorzystanej przy wykonaniu pracy. Każda z zestawionych tu pozycji powinna znaleźć się w przywołaniach podanych w stosownym miejscu w treści rozprawy.

Już to zestawienie wyraźnie określa, iż sprawozdanie z działań badawczych autora znajduje się w częściach II i III, sprawozdanie zaś w formie streszczającej czytelnik powinien otrzymać w częściach I i IV.

5. Badania doświadczalne konstrukcji

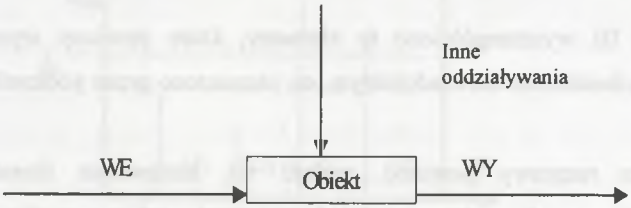
Rozróżnia się badania doświadczalne konstrukcji oraz ich modeli laboratoryjnych. W przypadku tych pierwszych badania przeprowadza się na zrealizowanym obiekcie, a ich wyniki dotyczą bezpośrednio tego obiektu. W przypadku badań przeprowadzonych na modelach laboratoryjnych wyniki badań odnoszą się bezpośrednio do modelu. W celu zaś odniesienia ich do obiektu rzeczywistego należy dokonać stosownych transformacji wyników,

uwzględniając w tym nie tylko różnice wymiarów i materiałów, ale również warunków, w jakich przeprowadzone były pomiary.

Wyniki badań doświadczalnych najczęściej wykorzystuje się do:

- weryfikacji teorii (hipotezy),
- określenia modelu matematycznego obiektu (identyfikacja),
- weryfikacji założeń i danych przyjętych w obliczeniach,
- oceny stanu konstrukcji (diagnostyka),
- opracowania wytycznych oraz propozycji do norm i instrukcji.

Rozważając przedmiot badań doświadczalnych ujęty w ogólnym schemacie przedstawionym na rys. 3, można wyróżnić w nim: główne oddziaływanie na obiekt (WE), inne oddziaływania (których nie można wyeliminować podczas badań) oraz reakcję obiektu (WY) na oddziaływania. Przy eksperymentach realizowanych na obiektach w skali naturalnej badając wpływ (WE) na obiekt najczęściej rejestruje się (WY) jako reakcję obiektu na wszystkie oddziaływania, również te, których nie można wyeliminować podczas pomiarów.



Rys. 3. Schemat ideowy obiektu badań wraz z otoczeniem

Dalsza część niniejszego rozdziału będzie odnosiła się przede wszystkim do badań doświadczalnych obiektów (budowli) w skali naturalnej i to całych konstrukcji. Tak więc wyniki tych badań będą bezpośrednio ujmowały współzależności specyficzne dla samych konstrukcji (ich elementów, materiałów, połączeń między nimi, a nawet obciążeń i eksploatacji). W badaniach tych będą jednak występować zawsze owe- wyróżnione wyżej- inne oddziaływania, których wpływ należy w czasie badań eliminować.

Jeśli badania doświadczalne mają doprowadzić do oczekiwanych rezultatów, to należy dobrze je przygotować. W przygotowaniu do badań pierwszym etapem jest zawsze dobre rozpoznanie literatury z zakresu eksperymentu. Chodzi tu przede wszystkim o sprawdzenie,

kto już wcześniej przeprowadził podobne badania, jakie zastosował metody badawcze i jakie uzyskał wyniki? Na tej podstawie badacz będzie mógł usytuować planowane przez siebie badania oraz rozpoznać, dlaczego wcześniej nie zostały one przeprowadzone itp?

W kolejnym etapie przygotowania badań doświadczalnych należy opracować ich program z uwzględnieniem technicznych, organizacyjnych i materialnych (finansowych) możliwości. Podstawowe pytania, na które badacz powinien w tym etapie odpowiedzieć, można zestawić w następującym szeregu:

- co będzie mierzone? (wielkości mierzone, ich zakres, wymagana dokładność itp.),
- czym będzie mierzone? (aparatura pomiarowa, sposób rejestracji wyników itp.),
- gdzie będą mierzone wielkości badane? (dobór punktów pomiarowych, ich liczby, sposób wzajemnego powiązania ze stanowiskiem pomiarowym),
- jak zorganizować badania? (eksperyment czynny czy bierny, sposób obciążenia konstrukcji w czasie eksperymentu czynnego, czas trwania badań itp.),
- ile będą kosztowały planowane badania? (dostępność środków finansowych i technicznych, źródła finansowania itp.).

Po opracowaniu odpowiedzi na podane wyżej zasadnicze pytania można przystąpić do realizacji badań doświadczalnych. Zespół wykonawców badań powinien konsekwentnie realizować założony program, a wszelkie zmiany muszą uzyskać akceptację kierującego badaniami. Bardzo ważna jest rola głównego twórcy badań, gdyż stoi on na straży dokładności realizacji programu badań.

Wyniki badań doświadczalnych powinny być zapisane w taki sposób, aby nie sprawiało trudności ich zinterpretowanie w dowolnym okresie po zakończeniu eksperymentu. Dostępnych jest już wiele programów komputerowych, umożliwiających pełną automatyczną rejestrację wyników badań (np. ESAM). Wraz z zapisem zmian rejestrowanych sytuacji pomiarowych następuje opisanie tych sytuacji przez badacza przed, w czasie albo po przeprowadzeniu danego pomiaru. Sposób oznaczenia wprowadzonych zapisów zależy jednak od inwencji badacza i musi być jednoznacznie interpretowany podczas późniejszego odczytywania wyników.

Zarejestrowane bezpośrednie wyniki badań poddawane są analizie, a jej rezultaty mogą już być bezpośrednio zastosowane w którymś z wymienionych na początku tego rozdziału obszarów wykorzystania wyników badań doświadczalnych.

Należy tu również podkreślić, iż eksperyment (jego warunki oraz wyniki) powinien być w każdym opracowaniu (raport z badań, publikacja, praca doktorska) tak przedstawiony, aby można było zapewnić jego odtwarzalność. Oznacza to, iż na podstawie opisu podanego

w opracowaniu każdy inny zespół badawczy może zrealizować podobny eksperyment i uzyskać te same wyniki. Publikacja nie zawierająca wszystkich informacji z tego zakresu nie spełnia warunków wiarygodności.

6. Eksperyment czynny czy bierny

Już wcześniej zwrócono uwagę na dwie możliwości przeprowadzenia badań doświadczalnych. Są to: eksperyment czynny albo eksperyment bierny. Zależą one od zastosowanego oddziaływania na konstrukcję (WE). W eksperymencie biernym rejestruje się realizację konstrukcji na oddziaływania eksploatacyjne, w eksperymencie czynnym zaś badacz działa na konstrukcję którymś z działań standardowych (np. w dynamice: wymuszenie impulsowe, skokowe, harmoniczne). W eksperymencie czynnym łatwiejsza jest eliminacja innych drugorzędnych oddziaływań na konstrukcję, a sam eksperyment trwa krócej od eksperymentu biernego, w którym konieczny jest dłuższy czas rejestracji czynników, trudniejsze wyeliminowanie (drugorzędnych) wpływów oddziaływań i w opracowaniu (analizie) wyników badań trzeba zastosować rozbudowane metody (np. metody statystyczne).

W badaniach doświadczalnych konstrukcji stosuje się badania doraźne (pomiar w wybranym, stosunkowo krótkim czasie) i ciągłe (monitorowanie (WE) i (WY) w czasie eksploatacji konstrukcji).

7. Uwagi o aparaturze pomiarowej

Bardzo ważnym elementem badań doświadczalnych jest dobór odpowiedniej aparatury pomiarowej. Po określeniu wielkości mierzonych i prognozowanego przedziału zmian ich wartości należy ukształtować tor pomiarowy. W torze występują trzy główne człony: wejściowy (czujnik), wzmacniający (wzmacniacz) i wyjściowy (rejestrator). Każdy z elementów toru pomiarowego wpływa na dokładność odwzorowania wielkości mierzonej (przejmowanej przez czujnik) w zapisywaną w rejestratorze.

Przy doborze czujnika powinno się uwzględnić takie np. informacje o nim, jak: zakres zmian wielkości mierzonej, dokładność, niezawodność, czułość poprzeczną, selektywność fizyczną, odporność na warunki otoczenia, odporność na nieprawidłową eksploatację. Wybierając wzmacniacz, badacz zwraca uwagę m.in. na zapewnienie liniowości, stałości

wzmocnienia, stabilności pracy, czułości na zmiany napięcia zasilania i wpływy zewnętrzne. Najczęściej producenci aparatury pomiarowej oferują zestawy czujników wraz ze wzmacniaczami.

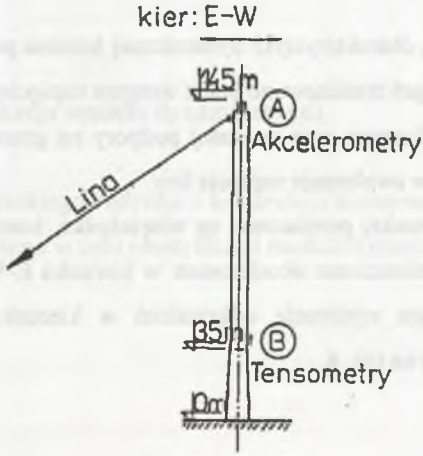
Wybór zastosowanego rejestratora powinien uwzględniać warunki jego współpracy z czujnikiem i wzmacniaczem w jednym torze pomiarowym.

Na rys. 5 zestawiono przykład różnych możliwości kształtowania torów pomiarowych w eksperymentach dynamicznych, w których występują trzy wymienione wcześniej elementy składowe oraz podobnie kształtowany tor do analizy wyników badań. Z różnych- podanych na rysunku- możliwości kształtowania torów pomiarowych najbardziej przydatny w praktyce jest taki, który umożliwia cyfrową rejestrację wyników. Możliwa jest wówczas stosunkowo prosta archiwizacja surowych wyników pomiarów oraz ułatwiona analiza tych wyników.

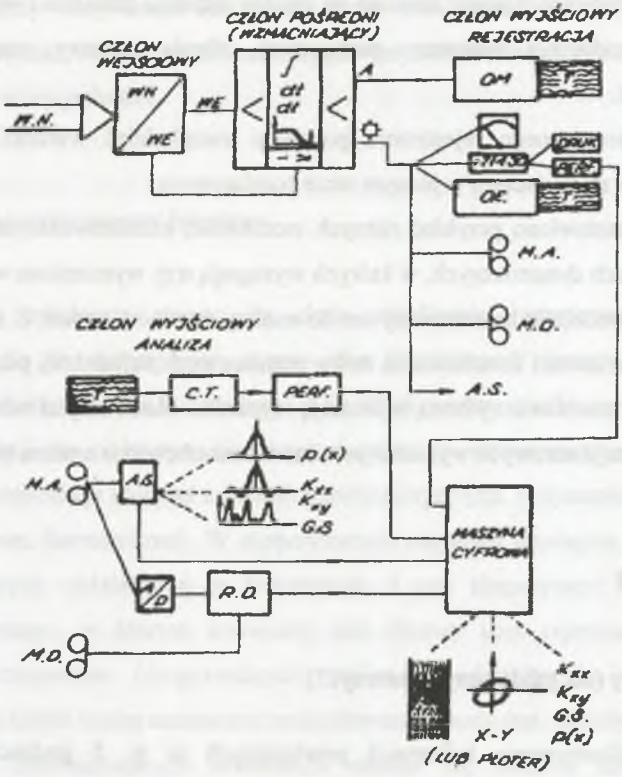
8. Przykłady

Komin stalowy (co, gdzie i czym mierzyć?)

W celu zilustrowania informacji przekazanych w p. 5 podano przykład badań doświadczalnych komina stalowego o wysokości 145 m. Szkic komina zamieszczono na rys 4.



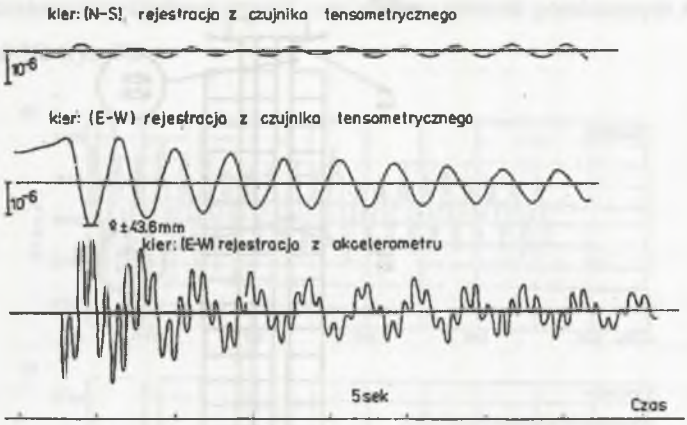
Rys. 4. Komin stalowy z punktami pomiarowymi



Rys. 5. Możliwości kształtowania toru do pomiaru i analizy

W celu wyznaczenia charakterystyki dynamicznej komina przeprowadzono eksperyment czynny. Wymuszenie drgań zrealizowano przez wstępne napięcie liny stalowej mocowanej do punktu na wierzchołku komina oraz do stałej podpory na gruncie w pewnej odległości od komina, a następnie nagłe zwolnienie napięcia liny.

Na kominie obrano punkty pomiarowe: na wierzchołku komina (A) i w poziomie h = 35 m (B). W punkcie A umieszczono akcelerometr w kierunku E-W, a w punkcie B naklejono tensometry umożliwiające rejestracje odkształceń w kierunku E-W oraz N-S. Wyniki rejestracji przedstawiono na rys. 6.

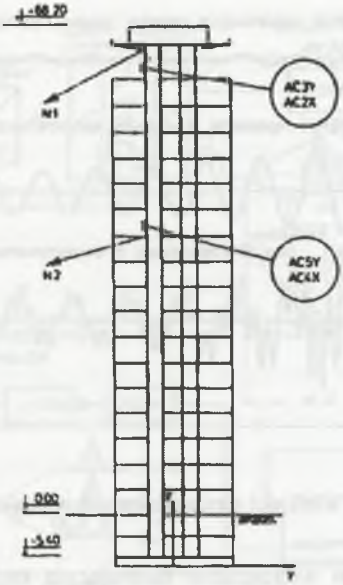


Rys. 6. Zmiany w czasie wielkości zarejestrowanych w punktach A i B

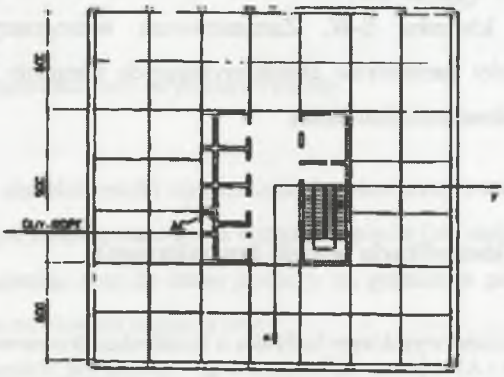
Widać wyraźnie, że w wibrogramie ilustrującym zmiany odkształceń (kierunek E-W) występuje jako jedyna znacząca składowa odpowiadająca pierwszej częstotliwości drgań własnych. W wibrogramie uzyskanym z pomiaru przyspieszeń w kierunku E-W występują wyraźnie widoczne dwie kolejne częstotliwości drgań własnych. Rejestracja drgań (odkształceń) w kierunku N-S dowodzi, że zastosowane wzbudzanie wywołało dominujący ruch komina w kierunku E-W. Zarejestrowane wibrogramy umożliwiają również wyznaczenie wartości parametrów charakteryzujących tłumienie konstrukcji (np. wartość logarytmicznego dekrementu tłumienia).

Budynek wysoki (identyfikacja modelu dynamicznego)

Badania dynamiczne wysokiego budynku o konstrukcji trzonowo-szkieletowej (por. rys. 7 i rys. 8) zostały przeprowadzone w celu identyfikacji modelu dynamicznego tego budynku.



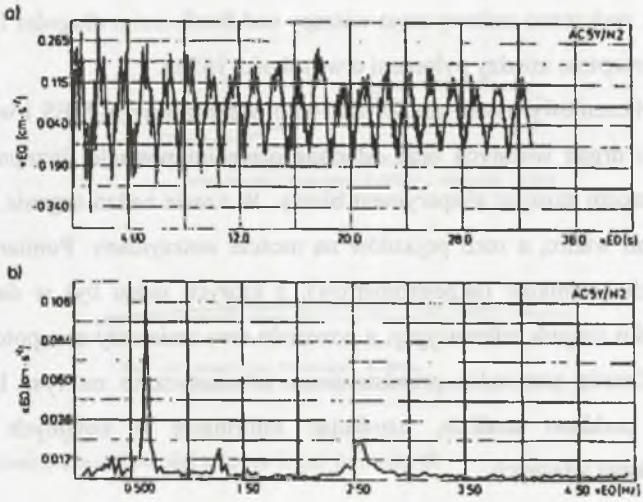
Rys. 7. Szkic przekroju pionowego budynku



Rys. 8. Rzut poziomy budynku

W badaniach zastosowano eksperyment czynny wymuszając drgania przez zwolnienie kolejno wstępnie napiętych lin (N1 i N2 na rys. 7). Usytuowanie punktów pomiarowych podano na rys. 7 i 8. Rejestrowano zmiany w czasie przyspieszenia w punktach pomiarowych.

Na rys. 9 przedstawiono przykładowe wyniki pomiarów w punkcie pomiarowym AC5Y przy wymuszeniu drgań N2 (rys. 7).



Rys. 9. Wibrogram (a) i jego struktura częstotliwościowa (b) uzyskane w punkcie AC5Y przy wymuszeniu N2

Te i pozostałe wyniki badań dynamicznych umożliwiły wyznaczenie zbioru kolejnych częstotliwości drgań własnych. W drugiej części procesu identyfikacji budowano różne modele fizyczne budynku i odpowiadające im modele matematyczne (od M1 do M8), uzyskując ich charakterystyki dynamiczne. Porównano wyniki pomiarów i obliczeń, uzyskując informacje o tym, który model najlepiej odpowiada obiektowi. W kryterium identyfikacji brano pod uwagę sześć początkowych częstotliwości własnych i odpowiadających im rzędnych postaci drgań w punktach pomiarowych. Porównanie wyników charakteryzujących obiekt (pomiary) i model M8 (obliczenia) w zakresie początkowych 4 częstotliwości własnych zestawiono w tablicy 1.

...Tablica 1

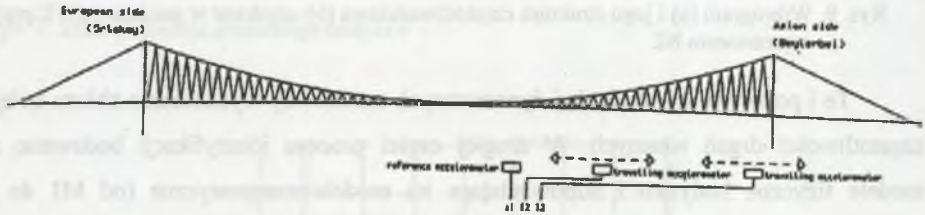
Charakterystyki dynamiczne budynku pomierzone i obliczone

Źródło informacji	Częstotliwość [Hz]	Porównawcze wartości rzędnych wykresów spektralnych w poziomie stropu piętra			
		XVII-y	XVII-x	XI-y	XI-x
Pomiar	0,64	1,00		0,55÷0,60	
M8	0,62		1,00		0,60
Pomiar	0,65		1,00		0,48÷0,52
M8	0,65	1,00		0,53	
Pomiar	1,27	0,22÷0,46	1,00	0,22÷0,30	0,67÷0,72
M8	1,35	0,22	1,00	0,22	0,72
Pomiar	2,57	1,00		0,61÷0,62	
M8	3,07	1,00		0,61	

9. Most wiszący nad Bosforem (weryfikacja modelu obliczeniowego)

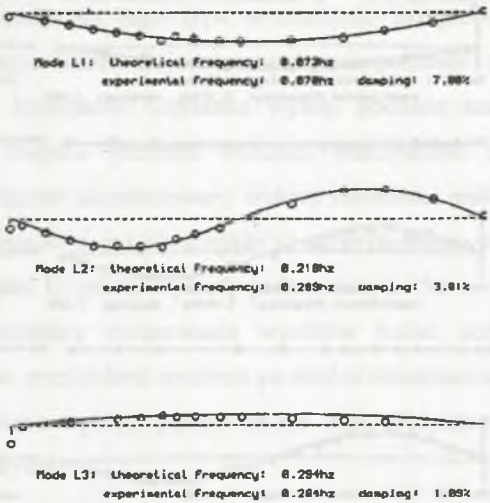
W 1973 r. wykonano stalowy most wiszący nad Bosforem o długości 1074 m i szerokości 33,4 m. Liny rozpięto między pylonami o wysokości 165 m.

Model obliczeniowy mostu zbudowano jako przestrzenny w MES i wyznaczono kolejne częstotliwości drgań własnych oraz odpowiadające im postacie. Przeprowadzono badania dynamiczne mostu stosując eksperyment bierny. W czasie badań drgania mostu wymuszone były porywami wiatru, a ruch pojazdów na moście wstrzymany. Pomiary wykonywano za pomocą trzech czujników (akcelerometrów), z których jeden był w danej serii ustawień traktowany jako czujnik referencyjny, a pozostałe dwa zmieniały swe położenia w kolejnych pomiarach. Zasadę pomiarów przedstawiono schematycznie na rys. 10. Zarejestrowane wibrogramy poddano analizie, uzyskując informacje o kolejnych częstotliwościach i postaciach drgań własnych.

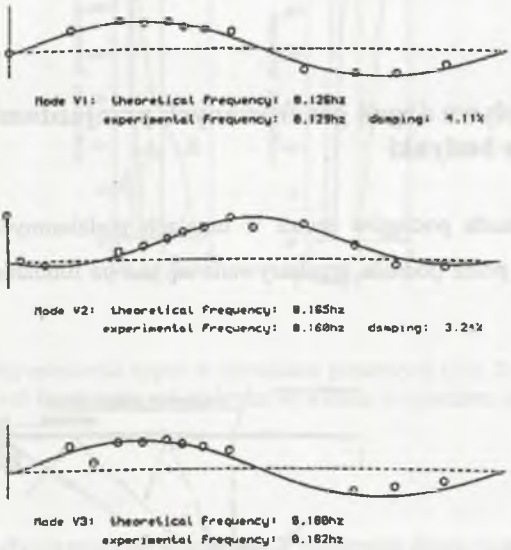


Rys. 10. Ilustracja zasady pomiarowej za pomocą trzech czujników

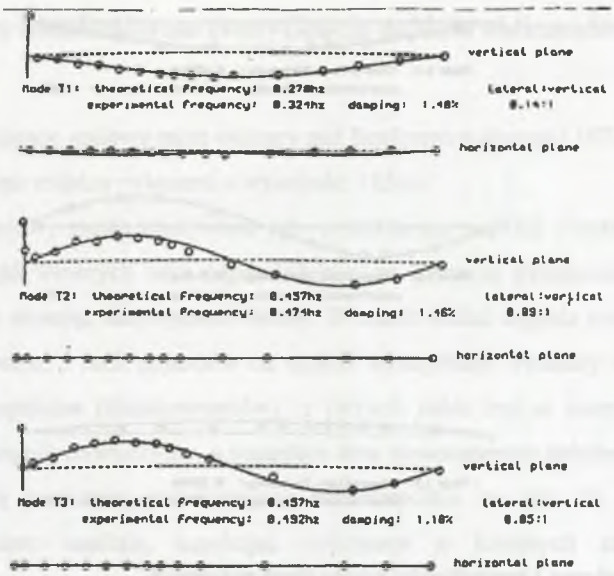
Niektóre z nich przedstawiono na wykresach i zestawieniach podanych na rys. 11, 12 i 13. Podano tam: kształty obliczeniowych postaci drgań (linie ciągłe) i wartości rzędnych postaci uzyskane z pomiarów (oznaczone kółkiem), częstotliwości obliczone (teoretyczne) i pomierzone oraz uzyskane w wyniku pomiarów wartości ułamka tłumienia krytycznego (wyrażone w procentach).



Rys. 11. Początkowe 3 częstotliwości własne drgań poziomych



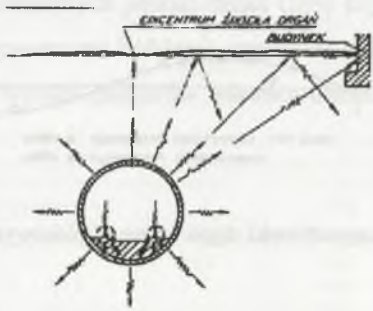
Rys. 12. Początkowe 3 częstotliwości drgań własnych pionowych



Rys. 13. Początkowe 3 częstotliwości drgań własnych skrętnych

10. Badania wpływu drgań generowanych przejazdami pociągów metra na pobliskie budynki

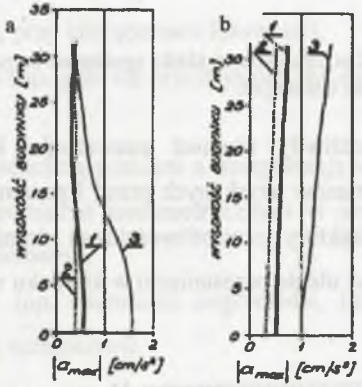
Podczas przejazdu pociągów metra w tunelach podziemnych generowane są drgania obudowy tunelu i przez podłoże przekazywane są one na fundamenty pobliskich budynków (rys. 14).



Rys. 14. Propagacja drgań generowanych przejazdami pociągów metra

Badania reakcji budynków na tego typu wymuszenia przeprowadzono w różnych warunkach przejazdu pociągów metra. Rejestrowano drgania poziome i pionowe na różnych kondygnacjach wysokich budynków. Uzyskane wyniki poddano analizie statystycznej, wybierając w każdym miejscu pomiaru wartości maksymalne z zarejestrowanych wibrogramów. Na tej podstawie skonstruowano wykres zależności maksymalnych wartości przyspieszeń drgań (poziomych- x, y i pionowych- z) od usytuowania punktu pomiarowego względem podstawy budynku. Uzyskane wykresy podano na rys. 15a.

Stosując tę samą procedurę opracowania wyników badań doświadczalnych przy wymuszeniu drgań budynku przejazdami autobusu po drodze zlokalizowanej w bezpośrednim sąsiedztwie budynku uzyskano wykresy podane na rys. 15b. Widoczne są wyraźne różnice w odbiorze drgań przez budynek.

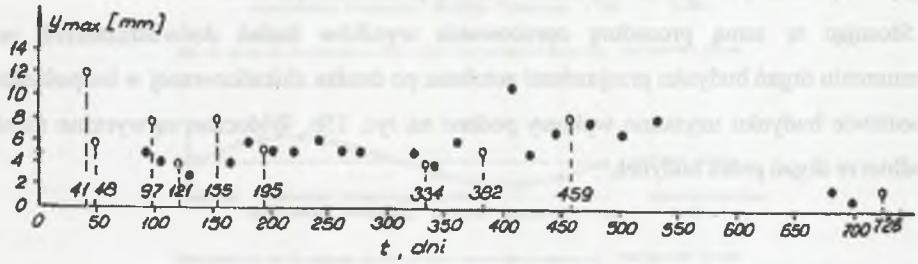


Rys. 15. Maksymalne przyspieszenia drgań w kierunkach poziomych (1-x, 2-y) i pionowym (3-z) na poszczególnych kondygnacjach budynku wywołane przejazdami pociągów metra (a) i autobusów (b)

11. Monitorowanie dynamiczne budowli a badania doraźne

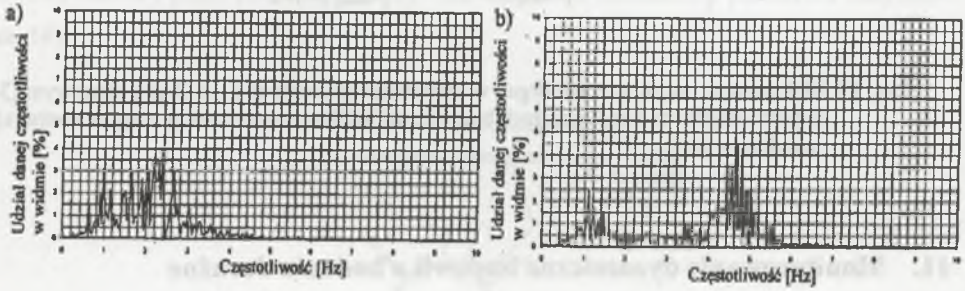
Klatka zgniatacza uległa uszkodzeniu. Podczas pracy wykazywała znaczne przemieszczenia. Obiekt wymagał przeprowadzenia kapitalnego remontu. Z powodu konieczności wykonania wcześniejszych zleceń zdecydowano się kontynuować produkcję po wykonaniu wstępnych prac naprawczych. Eksploatację prowadzono wykonując systematyczne pomiary geodezyjne przemieszczeń punktów ustalonych na konstrukcji klatki

zgniatacza. Pełne badania dynamiczne w tych samych punktach przeprowadzono doraźnie (przed pierwszą naprawą, po naprawie, po stwierdzeniu w wyniku pomiarów geodezyjnych wzrostu amplitud przemieszczeń, przed i po remoncie kapitalnym). Na rys. 16 zaznaczono wyniki pomiarów geodezyjnych (punkty czarne) oraz badań doraźnych (punkty białe) w kolejnych dniach licząc od stwierdzenia wystąpienia nadmiernych drgań klatki zgniatacza. Widoczne są wyraźne zmiany po przeprowadzeniu naprawy i remontu kapitalnego.



Rys. 16. Zmiany amplitud przemieszczeń klatki zgniatania na podstawie pomiarów systematycznych i doraźnych

Badania doraźne umożliwiły również zauważenie istotnej różnicy w strukturze częstotliwościowej wibrogramów uzyskanych przed i po remoncie. Pokazano to na rys. 17. Widoczna jest zmiana struktury częstotliwościowej drgań klatki po remoncie: pasmo dominujących częstotliwości uległo przesunięciu w kierunku większych wartości i zawężeniu.



Rys. 17. Struktura częstotliwościowa wibrogramów przed remontem (a) i po remoncie (b)

12. Typowe błędy

Podczas planowania i przeprowadzania badań doświadczalnych należy unikać takich działań, które mogą prowadzić do błędnych wyników albo nieprawidłowości ich interpretacji. Niektóre z przyczyn takich błędów zestawiono poniżej:

- w doborze metody pomiarowej (np. zastosowanie metody z badań statycznych w badaniach dynamicznych),
- w doborze techniki pomiarowej (np. usytuowanie czujnika w punkcie niereprezentatywnym, zbyt rzadkie odczyty),
- w doborze aparatury pomiarowej (np. zbyt wąski zakres mierzonych częstotliwości, zbyt mała dokładność pomiaru),
- zbyt mała ilość informacji lub otrzymanie informacji niereprezentatywnych (np. w eksperymencie biernym, przy obciążeniach losowych),
- zbyt duża ilość informacji (np. gubi się przejrzystość zbioru danych, którego nie zdoła się opracować),
- rozbieżność między dokładnością pomiaru a interpretacją wyników (np. uzyskiwanie dużej „dokładności" w pomiarze tensometrycznym w wyniku dzielenia wielkości odczytanej przez stałą tensometru),
- w interpretacji wyników (np. nadmierne uogólnienie, bezkrytyczne przyjmowanie wyników, chociaż przeczą rozsądkowi).

13. Podsumowanie

Badania doświadczalne są niezbędnym narzędziem w pracach naukowych. Nawet w pracach teoretycznych wykazanie prawidłowości ich wyników dokonuje się przez odniesienie do rezultatów badań doświadczalnych.

Badania doświadczalne wymagają, oprócz dobrego przygotowania merytorycznego, również dużego nakładu pracy organizacyjnej (tzw. logistyka). Ważnym elementem badań doświadczalnych jest ich dobre zaplanowanie. Od tego zależą również koszty badań.

LITERATURA

1. Abratański A., Kawecki J.: „Wykorzystanie wyników doraźnych badań dynamicznych w diagnostyce uszkodzonej konstrukcji przemysłowej", Mat. XXI Konf. Naukowo-Technicznej: Awarie Budowlane: badania, diagnostyka, naprawa, rekonstrukcje, Pol. Szczecińska, 2003, s. 303-310.
2. „Badania materiałów budowlanych i konstrukcji inżynierskich: (red. M. Kamińska, A. Kmita, A. Łodo, J. Michałek), Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław 2004.
3. Brownjohn J. M. W., Dumanoglu A. A., Severn R. T., Blakeborough A.: "Ambient vibration survey of the Bosforus suspension bridge", University of Bristol, Report No. UBCE-EE-88-1.
4. Hagel R., Zakrzewski J.: „Miernictwo dynamiczne", Wyd. Naukowo-Techniczne, Warszawa 1984.
5. Kawecki J.: „Perspektywy rozwoju diagnostyki budowli", Inżynieria i Budownictwo, 1998, nr 9, s. 477-481.
6. Kawecki J.: „Badania dynamiczne w rzeczoznawstwie budowlanym", Mat. VI Konf. Naukowo-Technicznej: Problemy Rzeczoznawstwa Budowlanego, Cedzyna 2000, s. 83 - 100.
7. Kawecki J.: „Metody i aparatura do diagnostyki obiektów budowlanych poddanych działaniom dynamicznym", Mat. VII Konf. Naukowo-Technicznej: Problemy Rzeczoznawstwa Budowlanego, Cedzyna 2002, s. 5-30.
8. Kawecki J.: „Wpływy dynamiczne na istniejące konstrukcje metalowe", Mat. XV Ogólnopolskiej Konferencji: Warsztat Pracy Projektanta Konstrukcji", Ustroń 2000.
9. Leszek W.: „Zasady eksperymentowania", Pol. Poznańska, Mat. dla studiów doktoranckich i podyplomowych, Nr 6, Poznań 1977.
10. Martinček G.: „Dynamicka diagnostika vozoviek", VEDA, Wyd. Słowackiej Akademii Nauk, Bratysława 1983.
11. Pieter J.: „Z zagadnień pracy naukowej", Wyd. Ossolineum, Wrocław 1974.
12. Runkiewicz L.: „Badania konstrukcji żelbetowych", Wyd. Biuro- Gamma, Warszawa 2002.
13. Stypuła K.: „Drgania mechaniczne wywołane eksploatacją metra płytkiego i ich wpływ na budynki", Zeszyty Naukowe Pol. Krakowskiej, Inżynieria Lądowa nr 12, Kraków 2001.