

**Opinia o pracy doktorskiej mgr. inż. Andrzeja Świercza  
pt. „Identyfikacja defektów w konstrukcjach prętowych na podstawie  
metody dystorsji wirtualnych w domenie częstości”**

W rozprawie doktorskiej podjęto trudne zadanie identyfikacji parametrów konstrukcji na podstawie znajomości sygnału pochodzącego od konstrukcji sprawnej, opisanej komputerowo, oraz sygnału uzyskanego przy odpowiednich wzbudzeniach próbnych konstrukcji uszkodzonej. Lokalizowano w ten sposób miejsce i rodzaj uszkodzenia elementów. Postawiono trudne zadanie i jednocześnie ważne z praktycznego punktu widzenia. Zaproponowana metoda pozwala śledzić eksploatowane obiekty inżynierskie poddane wpływom dynamicznym i odpowiednio wcześniej sygnalizować i lokalizować uszkodzenia i częściowe awarie. Ponadto można podejmować wiarygodne decyzje dotyczące dalszej eksploatacji bądź konieczności naprawy obiektu.

Celem pracy było rozwiązanie określonego problemu odwrotnego identyfikacji parametrów konstrukcji oraz zweryfikowanie opracowanej metody. Praca obejmuje analizę teoretyczną postawionego problemu oraz opis eksperymentów w skali laboratoryjnej i półrzeczywistej. Uzyskane wyniki dowodzą skuteczności zaproponowanego rozwiązania.

Opis pracy

Praca liczy 98 stron, podzielona jest na 6 rozdziałów. Zawiera 71 pozycji literaturowych. Umieszczono czterostronicowy wykaz używanych oznaczeń i symboli. Pracę podzielono na sześć rozdziałów, z których cztery opisują kolejno: podstawy metody dystorsji wirtualnych, opis metody dystorsji wirtualnych w dziedzinie częstości, zastosowanie jej do identyfikacji defektów oraz weryfikację doświadczalną.

Tematyka dotyczy rozwijającej się w ostatnich latach dziedziny nadzorowania stanu konstrukcji (ang. *health monitoring*). Problematyka jest trudna i z tego względu w kraju rozwijana jest w nielicznych ośrodkach. Metoda dystorsji wirtualnych, opracowana dwadzieścia lat temu, umożliwia łatwy opis statyki konstrukcji przy niewielkiej modyfikacji wybranych elementów bądź własności materiałowych. Dzięki temu niewielkim kosztem obliczeniowym można uzyskać rozwiązanie, a w szczególności określić siły wewnętrzne w wybranych elementach. Technika ta została przez doktoranta rozwinięta i dostosowana do zadań dynamiki konstrukcji. Dzięki niej przez wzbudzenie drgań w odpowiednio dobranych punktach siłami harmonicznymi o określonych częstościach można zarejestrowane amplitudy przemieszczeń porównać z wynikami uzyskanymi numerycznie. Celem obliczeń jest taki dobór parametrów modelu komputerowego, by możliwie wiernie dopasować jego własności do własności konstrukcji rzeczywistej. Wykorzystuje się rozwiązanie problemu minimalizacji funkcji celu, ustalającej kryterium dopasowania. Etap ten jest kosztowny, gdyż liczba zmiennych decyzyjnych jest duża. Tradycyjne metody obliczeń sprawdzają się jedynie w niewielkich zadaniach

testowych. Metoda dystorsji wirtualnych w dziedzinie częstości umożliwia przeprowadzenie procesu optymalizacji konstrukcji rzeczywistej w rozsądnym czasie. Do badań eksperymentalnych przedstawionych w pracy wykorzystano zbudowaną rzeczywistą kratownicę złożoną z 70 prętów.

### Uwagi ogólne

Zagadnienia przedstawione w rozprawie doktorskiej były prezentowane kilkakrotnie na seminariach w Instytucie Podstawowych Problemów Techniki PAN i spotkały się z uznaniem. Były też sygnalizowane w 14 publikacjach w czasopismach oraz materiałach konferencyjnych współautorstwa doktoranta. Na podkreślenie, poza wspomnianym wcześniej doбором tematu, zasługuje szeroki zakres umiejętności, jakimi doktorant wykazał się przy jego realizacji. Składa się na to znajomość metod numerycznych, modelowania konstrukcji metodą elementów skończonych i metodą dystorsji wirtualnych oraz opanowania trudnych technik pomiarowych drgań. Do tego należy dodać umiejętność programowania i zastosowań optymalizacji. Należy też podkreślić staranność edytorską maszynopisu.

Mimo tego pewne fragmenty pracy zostały potraktowane skrótowo, a niektóre ważne aspekty pominięte w dyskusji. Warto zwrócić na nie uwagę, gdyż tematyka, zgodnie z podanymi w pracy planami przyszłych badań, będzie rozwijana. W takim przypadku należy wziąć pod uwagę następujące kwestie.

1. Nie podano jasno założeń przyjętych w pracy. Rozważania dotyczą prętów o stałych przekrojach i stałej wartości danych materiałowych. Rozważa się zadania o małych przemieszczeniach, liniowo sprężyste. Powinno być to jasno przedstawione we wstępie.
2. W rozdziale 2.2 opisano zasady metody dystorsji wirtualnych w przypadku statyki. Pokazano je na przykładzie układu trzech współliniowych prętów. Opis dotyczył omawianego szczególnego przykładu. Zdecydowanie lepiej i przejrzystej można by przedstawić metodę stosując konwencję macierzową metody elementów skończonych. Wówczas podstawowa macierz wpływu  $\mathbf{D}_{\alpha\beta}$  byłaby opisana macierzami odkształceń jednostkowych  $\mathbf{B}$ , sztywności  $\mathbf{K}$  i sprężystości  $\mathbf{E}$ :  $\mathbf{D}_{\alpha\beta} = \mathbf{B} \mathbf{K}^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{E}$ . Zależność tą i jednocześnie podane w pracy związki definiujące metodę dystorsji wirtualnych, otrzymuje się jedynie w przypadku, gdy odpowiednie funkcje podcałkowe w macierzach sztywności są wielomianami co najwyżej pierwszego stopnia względem zmiennej całkowania. Tak jest np. w prętach jednorodnych. Warto w tym miejscu zwrócić uwagę na znane postępowanie przy rozwiązywaniu zadań statyki konstrukcji obciążonych początkowymi odkształceniami lub będących pod wpływem zmian temperatury.

Do wyznaczenia macierzy  $\mathbf{D}_{\alpha\beta}$  wymagane jest odwrócenie macierzy sztywności. Jest to czynność znacznie bardziej kosztowna, niż ponowne, wielokrotne nawet rozwiązanie układu równań algebraicznych. Jak w związku z tym przedstawia się koszt obliczeń prowadzonych metodą dystorsji wirtualnych w porównaniu z tradycyjnymi sposobami obliczeń? Jak w tym kontekście wygląda skuteczność metod rozwiązywania układów równań algebraicznych przy rzadkiej modyfikacji macierzy współczynników układu?

Z algebraicznych własności zdefiniowanej wcześniej macierzy wpływu  $\mathbf{D}_{\alpha\beta}$  płyną wnioski, że może ona być symetryczna jedynie gdy  $\mathbf{E}$  jest macierzą diagonalną, o jednokowych wyrazach diagonalnych. W związku z tym własność czwarta macierzy  $\mathbf{D}_{\alpha\beta}$  ze str. 23 jest za słabo postawiona.

Lokalny wpływ dystorsji, ograniczony do jednego lub kilku elementów, ma miejsce także w konstrukcji statycznie niewyznaczalnej. Dzieje się tak, kiedy macierz  $\mathbf{D}_{\alpha\beta}$  zbu-

dowana jest z rozseparowanych podmacierzy diagonalnych, z których można wydzielić podmacierz jednostkową, i gdy dystorsja dotyczy elementu opisanego m.in. stopniem swobody odpowiadającym odpowiednim diagonalnym wyrazom jednostkowym.

3. Do prawidłowego przeprowadzenia procesu identyfikacji należy stworzyć odpowiedni model obliczeniowy badanej konstrukcji. O ile stosunkowo łatwo można oszacować masę poszczególnych fragmentów konstrukcji, to prawidłowe określenie sztywności jest trudne. Nawet w stosunkowo prostych konstrukcjach, jakimi są kratownice, trudno jest określić sposób zamocowania prętów. Rzadko węzły zamocowania realizują swobodne obroty, jak w przegubach. Często, zwłaszcza w stalowych mostach kolejowych, węzły skratowania są nitowane. Jak należy sobie z tym radzić?
4. Następną wątpliwość budzi przeprowadzanie badań i analizy na przykładzie konstrukcji w zasadzie nieobciążonej. W rzeczywistości obciążenie własne i użytkowe zmieniają częstości własne drgań w stopniu nie mniejszym niż poszukiwane uszkodzenia. Czy w takim razie nie należałoby wprowadzić odpowiedniego stanu naprężenia w modelu numerycznym? Jak w takim przypadku wyglądałby aparat matematyczny, zwłaszcza macierze wpływu?
5. Badany model kratownicy (rys. 5.4), nie licząc sposobu podparcia, stanowi konstrukcję statycznie wyznaczalną. Czego należy się spodziewać w przypadku konstrukcji mocno przesztywnionej?
6. W rozdziale 3.5 przeprowadzono analizę wrażliwości. Nie przedstawiono wniosków z niej płynących.
7. Brak jest omówienia bogato opisanych w literaturze metod identyfikacji parametrów konstrukcji (choćby prace T. Szolca). Tło literaturowe zajmuje w pracy niespełna dwie strony i dotyczy metod wykrywania uszkodzeń w jednorodnych elementach konstrukcji. Z kolei szczegółowo przedstawiono podstawy macierzowego zapisu statyki konstrukcji prętowych oraz drgań układów o jednym stopniu swobody. Ta część zajmuje 32 strony, co stanowi znaczną część tekstu pracy.
8. Optymalizacja pozwalająca dobrać parametry konstrukcji, dopasowując zestaw amplitud drgań modelu konstrukcji modyfikowanej, nie jest wystarczająco omówiona i zbadana. Brak jest informacji o własnościach funkcji celu, choćby o jej wypukłości oraz odpowiedniej interpretacji fizycznej. Dlaczego przyjęto średniokwadratową postać funkcji celu zamiast np. normy maksimum?
9. W pracy wprowadzono ogromną liczbę oznaczeń, różniących się sposobami indeksowania, nadpisywania i nadkreślenia. Często symbole łączą jednocześnie wszystkie sposoby oznaczeń. Oznaczenia różnią się przy tym od tradycyjnie przyjętych. Czyni to pracę mało czytelną. Czemu gradient funkcji oznaczono symbolem  $\rho$  zamiast  $\rho$  (str. 6)?  $\rho$  Co oznacza w takim razie  $\rho$  (str. 57)? Tę samą rolę spełniają raz indeksy górne, raz dolne. Co oznacza  $\rho_{AZ}$  na str. 69? Czy jedynki opisane tym symbolem są różne?
10. Raporty instytutowe i materiały konferencyjne nie są publikacjami, do których można odsyłać czytelnika. Zwykle wydawane są w nakładzie kilku – kilkudziesięciu egzemplarzy i rozprowadzane w gronie autorów zamieszczonych tam opracowań. Nie są to materiały dostępne publicznie i jako takie są nieprzydatne przy lekturze pracy.

Zaskoczenie budzi umieszczenie w piśmiennictwie trzech adresów serwerów internetowych. Z taką samą skutecznością można by odesłać czytelnika np. do objazdowej biblioteki. Zawartość stron internetowych zmienia się lub całe serwisy są usuwane. Umieszczanie tego typu wskazań w rozprawie doktorskiej, będącej w gruncie rzeczy dokumentem prawnym podlegającym archiwizacji, nie może mieć miejsca.

#### Uwagi szczegółowe

1. Trzeci podpunkt na str. 28 określa ścinanie, a nie zginanie.
2. Rys. 2.4c pokazuje obrót elementu z przesunięciem, mimo że intencją autora było zapewne pokazanie obrotu, jako składowej ruchu. Na to wskazuje podpis.
3. Idea rys. 2.6 nie jest zrozumiała. Trzeci schemat powinien raczej przedstawiać deformacje wywołane jedynie przemieszczeniami węzłów prostopadłymi do osi elementu belki.
4. Str. 41, przykład 3.1. Niezrozumiałe jest stwierdzenie, że drgania wywołano wprowadzeniem zerowych warunków początkowych, mających charakter drgań swobodnych.
5. Drgania, określane w pracy w odpowiednim kontekście jako zależne od warunków początkowych (str. 41, 42), są nazywane w literaturze drganiami swobodnymi. Takiej też terminologii powinien autor używać.
6. Należy ujednoczyć nazewnictwo. Wskazane jest stosowanie polskich określeń, np. *dziedzina* zamiast *domena*. Autor używa obu wersji. Należy stosować słownictwo polskie w przypadku i innych terminów: *wzbudnik* zamiast *aktywator*, *zastosowanie* zamiast *aplikacja*, *czujnik* zamiast *sensor*.
7. Skrótów nazw metod powinny podlegać jednej ustalonej konwencji. W pracy w niektórych przypadkach podaje się skrótów polskich nazw (np. MES – metoda elementów skończonych), a w innych skrótów nazw angielskich (np. VDM-T – metoda impulsowych dystorsji wirtualnych). Czasem autor stosuje oba typy skrótów jednocześnie.
8. Zasady pisowni ściśle określają stosowanie wielkich i małych liter. Wielkich liter nie stosuje się do stopni i tytułów naukowych ani nazw metod. Dotyczy to również przymiotników.
9. Nie ma wskazanych równań (3.36a) i (3.36b) ( str. 49).
10. Rysunki 4.2, 4.3 i 4.4 nie są podpisane (zarówno rysunki jak i ich osie oraz wykreślone krzywe).

Uwagi krytyczne nie obniżają w istotnym zakresie wartości merytorycznej pracy. Rozprawa doktorska mgr. inż. Andrzeja Świercza pt. „Identyfikacja defektów w konstrukcjach prętowych na podstawie metody dystorsji wirtualnych w domenie częstości” spełnia wymagania stawiane przez Ustawę o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki, z dn. 14 marca 2003 r. (Dz. U. Nr 65, poz. 595) i może być dopuszczona do publicznej obrony.

Ozertowski Bojarski