

**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 próbnym 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-

