

dr inż. Michał Musiał*
dr inż. Jacek Groseł*

Identyfikacja schematu stanowiska badawczego z wykorzystaniem operacyjnej analizy modalnej

The identification of experimental set-up scheme using operational modal analysis

W ostatnich latach dużą popularnością cieszą się metody nieniszczącej diagnostyki konstrukcji. Wśród nich można wymienić analizę modalną. Jej wariantem jest metoda operacyjna (operating modal analysis – OMA) [1]. W przypadku dużych konstrukcji inżynierskich przeprowadzenie badań przeważnie wymaga wyłączenia obiektu z eksploatacji lub odizolowania go od wpływów zewnętrznych. Wyłączenie wiąże się ze stratami finansowymi wynikłymi z przestoju, natomiast odizolowanie nierzadko jest wręcz niemożliwe. W takich przypadkach warto zastosować analizę modalną w wariancie operacyjnym, gdyż klasyczna analiza modalna napotyka w budownictwie przeszkody związane z odpowiednio mocnym wzbudzeniem konstrukcji. I choć pojawiają się próby budowania odpowiednich wzbudników [2], to ich stosowanie jest mocno ograniczone. Najczęściej wzbudniki stosuje się w pomiarach laboratoryjnych na modelach konstrukcji rzeczywistych. W przypadku operacyjnej analizy modalnej rejestrowana jest jedynie odpowiedź konstrukcji na wymuszenia losowe. Na jej podstawie oblicza się podstawowe parametry dynamiczne konstrukcji (częstotliwości i formy własne oraz tłumienie). W artykule opisano badania przeprowadzone z wykorzystaniem OMA. Skoncentrowano się na identyfikacji schematu stanowiska badawczego w warunkach laboratoryjnych.

OGÓLNY OPIS METODY

Algorytmy stosowane w operacyjnej analizie modalnej można podzielić na dwa zasadnicze typy: operujące

w dziedzinie czasu i częstotliwości. Do pierwszej grupy zalicza się metody bazujące na równaniu stanu układu dynamicznego i jego dekompozycji (stochastic subspace identification) z użyciem filtracji Kalmana [3, 4]. Drugą grupę stanowią metody oparte na rozkładzie odpowiedzi w dziedzinie częstotliwości układu dyskretnego na sumę odpowiedzi układów o jednym stopniu swobody (frequency domain decomposition) [4]. Podstawowe założenia, które musi spełniać analizowany układ, to:

- liniowość i niezmienność w czasie parametrów układu;
- małe tłumienie;
- odseparowane częstości własne (rozważając konkretną częstotliwość, w odpowiedzi układu ujawnia się jedna lub dwie częstości własne);
- wymuszenie działające na układ, które można opisać procesem o parametrach białego szumu.

W takim układzie zależność pomiędzy pobudzeniem układu $x(t)$ a odpowiedzią $y(t)$ może być opisana zależnością:

$$\mathbf{G}_{yy}(j\omega) = \mathbf{H}(j\omega) * \mathbf{G}_{xx}(j\omega) \mathbf{H}(j\omega)^T$$

gdzie:

\mathbf{G} – macierze widmowej gęstości mocy wejścia ($_{xx}$) i wyjścia ($_{yy}$);
 \mathbf{H} – macierz transmitancji.

Można wykazać, że macierz odpowiedzi może być rozłożona przy użyciu macierzy wartości osobliwych (singular value decomposition).

$$\mathbf{G}_{yy}(j\omega_i) = \Phi_i \cdot \mathbf{S}_i \cdot \Phi_i^T,$$

gdzie:

\mathbf{S} – diagonalna macierz wartości osobliwych;
 Φ – unitarna macierz zawierająca wektory proporcjonalne do wektorów własnych.

Z elementów macierzy \mathbf{S} uzyskać można częstości własne.

Stosowanie operacyjnej analizy modalnej wymaga spełnienia kilku wymagań dotyczących pomiarów. Czas pomiaru musi być dostatecznie długi, a pomiary w poszczególnych punktach należy wykonać z dużą dokładnością amplitudową, zwłaszcza fazową. Jedyne czujniki w przypadku dużych konstrukcji, jakimi są obiekty budowlane, mogą być akcelerometry sejsmiczne o dużej czułości, niskich szumach i stosunkowo dużej masie (np. akcelerometr typu 8340 B&K o masie 770 g). Przykładowe akcelerometry pokazano na fotografii 1.



Fot. 1. Akcelerometr uniwersalny i sejsmiczny (z prawej) Fot. J. Groseł

Badania związane z operacyjną analizą modalną prowadzone są najczęściej w celu:

- określenia cech dynamicznych obiektu;
- weryfikacji cech statycznych obiektu, a zwłaszcza statycznego modelu obliczeniowego;
- monitoringu stanu konstrukcji.

Pierwszy cel jest oczywisty. Cechy statyczne obiektu weryfikuje się, gdy trudno jest przeprowadzić odpowiedni test statyczny (np. konieczne budowa-

* Politechnika Wroclawska

H+H



**H+H Thermostein - najlepsze rozwiązanie
dla budownictwa pasywnego**

- cegła ceramiczna grubości 25 cm, styropian „STANDARD fasada” grubości 15 cm ($U = 0,25 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$);

- cegła kratówka grubości 25 cm, styropian „STANDARD fasada” grubości 12 cm ($U = 0,29 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$).

W budownictwie energooszczędnym najczęściej stosowane rozwiązania ścian to:

- beton komórkowy PP 2/0,4 grubości 24 cm, wełna mineralna, np. FASROCK grubości 14 cm ($U = 0,18 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$);

- cegła silikatowa grubości 24 cm, wełna mineralna, np. FASROCK grubości 20 cm ($U = 0,20 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$);

- cegła ceramiczna grubości 25 cm, wełna mineralna, np. FASROCK grubości 22 cm ($U = 0,18 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$);

- beton komórkowy ze zintegrowaną warstwą izolacji cieplnej H+H Thermostein grubości 41 cm ($U = 0,16 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$).



Do budownictwa pasywnego zalecane są m.in. następujące rozwiązania ścian:

- beton komórkowy PP 2/04 grubości 36,5 cm, wełna mineralna, np. FASROCK grubości 15 cm ($U = 0,13 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$);

- beton komórkowy PP 2/0,4 grubości 30 cm, Ytong Multipor grubości 18 cm ($U = 0,14 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$);

- cegła silikatowa grubości 24 cm, styropian „STANDARD fasada” grubości 25 cm ($U = 0,15 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$);

Ściany poszczególnych typów różnią się przede wszystkim grubością materiału izolacyjnego. Tak jak w przypadku domu tradycyjnego wystarczy zwykle 10 – 15 cm styropianu lub wełny mineralnej, tak w domu energooszczędnym grubość ta wzrasta do 20 – 25 cm, a w domu pasywnym nawet do 30 cm. Różnice w wykonaniu dachu również najczęściej ograniczają się do grubości zastosowanej izolacji.

Budownictwo pasywne i energooszczędne nie bez powodu staje się obecnie popularne. Firmy oferujące materiały budowlane wyprzedzają się we wprowadzaniu rozwiązań do tego typu domów, czego przykładem może być bloczek ze zintegrowaną warstwą izolacji cieplnej H+H Thermostein.

Wykorzystajmy duńskie doświadczenia ze stosowania energii odnawialnej

Dania jest znana z nowoczesnych rozwiązań energetycznych, które są nie tylko energooszczędne, ale również ekologiczne. Polska mogłaby się na nich wzorować, tym bardziej że Ambasada Królestwa Danii i firmy z duńskim rodowodem działające na polskim rynku są chętne do dzielenia się długoletnimi doświadczeniami m.in. dotyczącymi jak najlepszego wykorzystania energii ze źródeł odnawialnych (OZE). *To pozwoli uniknąć błędów, które popełniła Dania na początku wprowadzania pionierskich rozwiązań. Był to okres kryzysu naftowego w latach siedemdziesiątych XX wieku, a obecnie energia odnawialna jest podstawą polityki energetycznej Danii* – powiedział **Steen Hommel** – ambasador Królestwa Danii podczas spotkania zorganizowanego wspólnie z firmą Danfoss Poland, oferującą urządzenia służące racjonalizacji zużycia energii cieplnej, które odbyło się 12 grudnia 2012 r. w Warszawie. Z duńskich danych wynika, że energia odnawialna nie musi być droższa od tradycyjnej. Zależy to od instrumentów wspierania jej rozwoju. W Danii środki na ten cel pochodzą z podatku, którym obłożono paliwa kopalne.

Podczas spotkania zwrócono uwagę na konieczność zmian w przygotowywanej obecnie w Polsce ustawie o odnawialnych źródłach energii. Jak twierdzi **Dennis Holte Albertsen** – ekspert Działu Energii i Środowiska Ambasady Danii – zbyt mało uwagi poświęca się w niej energii cieplnej pozyskiwanej z OZE, a nieproporcjonalnie dużo energii do produkcji prądu, mimo że w ogólnym bilansie zużycia stanowi ona zaledwie 15% (pozostała część to energia do wytwarzania ciepła i chłodu oraz produkcji ciepłej wody użytkowej). Ponadto projekt omawianej ustawy zawiera zróżnicowane stawki podatku VAT na różne źródła OZE. Świadczy to o nierównym ich traktowaniu i ograniczy rozwój wyższej opodatkowanych.

Ważną kwestią, której nie porusza ustawa, jest ogromny potencjał rynku energii rozproszonej, obejmującej OZE, stosowanej w gospodarstwach domowych. Dofinansowanie zakupu tego typu instalacji zwiększyłoby świadomość Polaków na temat rozwiązań z wy-

korzystaniem OZE, ułatwiło dostęp do tych rozwiązań, a także zwiększyło zainteresowanie wznoszeniem budynków energooszczędnych – stwierdził **Dennis Holte Albertsen**.

Podczas spotkania w duńskiej ambasadzie **Andrzej Ocoź** z firmy Danfoss Poland omówił możliwości i zagrożenia wynikające ze stosowania energii ze źródeł odnawialnych z uwzględnieniem pomp ciepła. W swoim wystąpieniu podkreślił, że rozwój rynku rozproszonej energii pozyskiwanej z OZE w Polsce będzie uzależniony od spełnienia trzech postulatów. Są to:

- system wsparcia rządowego dla osób fizycznych, jednostek gospodarczych i budżetowych, traktujący równo wszystkie OZE;
- zapewnienie odpowiedniego standardu instalacji przez szkolenie i certyfikowanie instalatorów;
- zbudowanie świadomości społecznej na temat OZE przez prowadzenie ogólnopolskich kampanii informacyjnych.

Nowoczesne rozwiązania wykorzystujące OZE umożliwiają znaczne zmniejszenie zużycia energii, co jest widoczne w rachunkach za ogrzewanie. Potwierdziły to wyniki raportu „Polacy a wydatki na ogrzewanie” przygotowanego w ramach kampanii firmy Danfoss Poland. Ponadto wykazały one, że w związku z rosnącymi opłatami 90% Polaków chce mieć wpływ na wysokość płatnych rachunków, a aż 34% respondentów stwierdziło, że nie ma żadnej kontroli nad wydatkami z tytułu ogrzewania. Dotyczy to przede wszystkim osób mieszkających w budynkach wielorodzinnych. Jednym z prostszych sposobów zmniejszenia zużycia ciepła są nowoczesne elektroniczne termostaty grzejnikowe. Jak twierdzi **Katarzyna Rączka** z Danfoss Poland Sp. z o.o., wymieniając stare termostaty na elektroniczne można zaoszczędzić do 23% energii, a w przypadku wymiany zaworów ręcznych nawet do 46%.

Wykorzystanie duńskich propozycji i doświadczeń może ułatwić Polsce realizację przyjętych zobowiązań wobec Unii Europejskiej do 2020 r.

Krystyna Wiśniewska