

05;11;12

## Интегральные датчики динамической деформации на основе тонких сегнетоэлектрических пленок для мониторинга сложных механических систем

© Ю.В. Есипов, В.М. Мухортов

Южный научный центр РАН,  
344006 Ростов-на-Дону, Россия  
e-mail: yu-yesipov5@yandex.ru

(Поступило в Редакцию 28 января 2008 г.)

На основе тонких пленок  $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.53}\text{Ti}_{0.47})\text{O}_3$  толщиной  $\sim 1.0 \mu\text{m}$  созданы сверхширокополосные  $10^{-3} - 10^8 \text{ Hz}$  датчики динамической деформации с контактной площадкой  $0.8 \text{ mm}^2$ . С помощью данных датчиков, закрепленных на элементах семиярусной сварной стержневой этажерки, после ее ударного возбуждения получены фурье-образы откликов конструкции. Установлено, что деформация прямоугольных стержневых конструкции в области частот от  $10^{-3}$  до  $10^2 \text{ Hz}$  имеет три вида колебательных процессов — собственные колебания стержней и различные моды конструкции с линейной зависимостью от степени возбуждения, колебания с аномально высокой диссипацией энергии и стохастические колебания. Проведенные исследования позволяют сделать выводы о возможности установления спектральных критериев для мониторинга сложных конструкций по виду деформации ее составляющих элементов.

PACS: 85.50.-n, 85.85.+j, 81.70.Bt

### Введение

Военные и сложные гражданские механические системы (корабли, самолеты, наземные транспортные средства, котлы, нефтепроводы, мосты и т.д.) находятся в эксплуатации в течение многих лет, а следовательно, происходит неизбежное их старение. Как ожидается, многие системы, которые были построены двадцать или тридцать лет тому назад, не будут заменены в ближайшем будущем системами нового поколения. Уменьшить издержки за счет необоснованного списывания оборудования (по причине истечения срока эксплуатации) можно лишь, используя данные мониторинга, объективно отображающего состояние конструкции. Кроме того, возрастает количество систем с длительным сроком эксплуатации (нефтепроводы, космические станции, гидроэлектростанции), которые невозможно остановить для проведения профилактического осмотра. Выход из строя таких систем приведет к техногенным катастрофам, ликвидация которых в денежном эквиваленте соизмерима с валовым продуктом отдельных отраслей.

Используемые в настоящее время в промышленности неразрушающие средства контроля и диагностики (акустическая тензометрия, многочастотная акустическая голография, акустическая эмиссия, ультразвуковая дефектоскопия, вихретоковая, магнито-акустическая тензометрия, рентгенографическая, использование длинноволновых ультразвуковых рэлеевских волн и волн Лэмба) хорошо зарекомендовали себя при контроле на стадии изготовления отдельных узлов и являются практически непригодными для осмотра и обслуживания больших систем, в состав которых входят такие объекты, как, например, мост или самолет. Более того, они не спо-

собны дать характеристику работоспособности системы в целом, оценивать ее техническое состояние и сигнализировать о необходимости вмешательства человека.

Все это стимулирует создание принципиально новых диагностических комплексов как составной части сложной системы, способных определять моменты возникновения и степень повреждения этой системы. Кроме того, необходимо решать задачи как установления степени влияния повреждений на надежность системы, так и расчета изменения срока службы, оценки степени риска при эксплуатации и выдачи рекомендаций оператору в простой форме для принятия решения по дальнейшей эксплуатации. Вполне очевидно, что при этих требованиях необходима разработка новых подходов для непрерывного мониторинга функционирования сложной системы, обладающей предсказательной возможностью ее безопасного срока эксплуатации.

Такие системы диагностики (Structural Health Monitoring — SHM) начали разрабатывать за рубежом в 2000 г. [1–4] (NASA Langley Research Center, Massachusetts Institute of Technology Cambridge, Los Alamos National Laboratory, Naval Research Laboratory). В связи с развитием компьютеров (ПЭВМ), систем усилителей, плат сбора данных и аналого-цифровых преобразователей на основе современных информационных технологий основная проблема контроля по SHM-технологии переместилась в область разработки широкополосных датчиков, которые могут послужить базовым средством для практической реализации этой технологии. Действительно, большинство датчиков, используемых в настоящее время для измерений в промышленности, имеет статический выходной сигнал. Если в случае измерения статических параметров, таких как, напри-

мер, температура, потеря информации не происходит, то при измерении динамических параметров (вибрация, ток, давление) может происходить потеря информации, заключенной в высокочастотной части спектра отклика.

При использовании динамических преобразователей, спектр выходного сигнала которых максимально приближен к спектру диагностируемой системы, расширяется пространство используемых диагностических признаков, что в свою очередь способствует как снижению ошибок, так и различению видов диагностируемых технических состояний без увеличения числа датчиков и кабельных сетей путем проведения оперативной обработки сигналов на ЭВМ.

В настоящей работе приводятся экспериментальные данные по использованию нового типа датчика для исследования динамической деформации сложной стержневой конструкции, возбуждаемой импульсом силы длительностью в пределах  $320 \mu\text{s}$ .

## Эксперимент

Тонкие пленки  $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.53}\text{Ti}_{0.47})\text{O}_3$  (используемые нами в датчиках динамической деформации) толщиной  $1 \mu\text{m}$  были получены реактивным высокочастотным распылением стехиометрической мишени. Более подробно технологические особенности изготовления этих образцов описаны в [5,6]. Здесь отметим, что синтез и кристаллизация исследуемых пленок осуществлялись непосредственно в процессе их осаждения. Это обеспечивалось применением высокого давления кислорода в камере (0.7 Torr) и плотности плазмы с концентрацией электронов  $n_e > 10^{12} \text{ см}^{-3}$ . Температура металлической подложки  $650^\circ\text{C}$  была достаточной для обеспечения кристаллизации пленки в поликристаллическом состоянии на подложке из нержавеющей стали (1X18H9T) толщиной  $30 \mu\text{m}$ . Верхние электроды площадью  $0.8 \text{ мм}^2$  были изготовлены из алюминия с подслоем ванадия. Данные рентгеноструктурного анализа свидетельствовали об отсутствии посторонних структурных фаз в пленках.

После нанесения на пленку верхнего алюминиевого электрода толщиной  $0.1 \mu\text{m}$  в пленке полевым и температурным воздействием создано устойчивое поляризованное состояние до величины пьезомодуля  $d_{33} = 7 \cdot 10^{-9} \text{ C} \cdot \text{N}^{-1}$ . Датчик имеет токовые выводы и герметизирован эпоксидным компаундом К-400. На элементы конструкции такие датчики закреплялись с помощью эпоксидного клея. Получены следующие оценки основных характеристик датчика: при минимальной величине сигнала  $10 \mu\text{V}$  чувствительность к относительной деформации  $\Delta l/l$  составляла  $5 \cdot 10^{-9}$ ; динамический диапазон деформации — 90 dB, емкость — 800 pF, диапазон частот  $10^{-3} - 10^8 \text{ Hz}$ , диапазон рабочих температур —  $190 - 200^\circ\text{C}$ , масса  $< 10^{-3} \text{ g}$ . В конструктивном исполнении такого тонкопленочного сегнетоэлектрического датчика динамической деформации заключены два

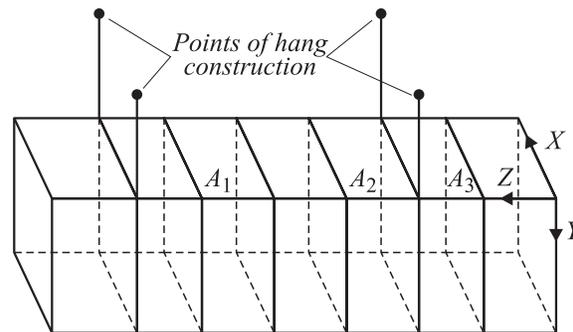


Рис. 1. Физическая модель исследуемой конструкции в виде семиярусной стержневой этажерки, где узлы  $A_1, A_2, A_3$  — места установки датчиков деформации.

достоинства: с точки зрения прочности и усталостных свойств он подобен металлу, а по возможностям преобразования динамической деформации — сегнетоэлектрической пьезокерамике, для которой характерны высокая диэлектрическая проницаемость и большие значения пьезомодуля.

Сигнал с датчика через вибростойкий кабель АВКТ-6 подавался на вход четырехканального усилителя заряда РШ2734Э, а с выхода усилителя — на два независимых аналого-цифровых канала платы сбора данных ЛА-н1.5PCI-14 с временем преобразования сигнала до 1 ns.

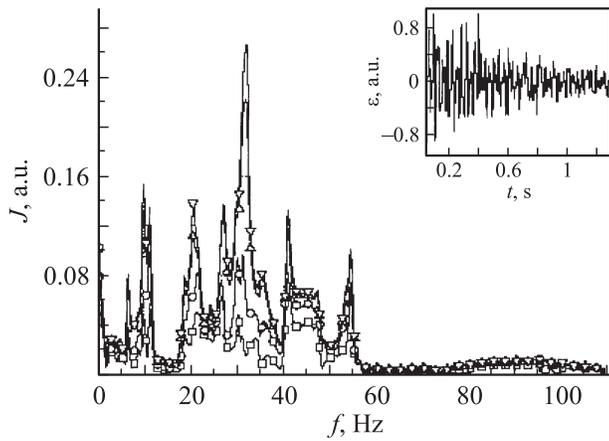
Физическая модель конструкции в виде семиярусной этажерки (рис. 1) сварена из 8 цельновырезанных квадратных рам сечением  $4 \times 8 \text{ мм}$  со стороной 250 mm и 28 стержней — стоек с таким же сечением и длиной 250 mm, при общей массе конструкции 3.6 kg. Конструкция подвешивалась на кевларовых нитях в горизонтальном положении. Датчики приклеивались на расстоянии 15 mm от узлов  $A_1, A_2, A_3$  на „широких“ (wide) и „узких“ (narrow) сторонах стержней этажерки. Вследствие этого были созданы две различающиеся системы датчиков (Sensor Systems):

$$\begin{aligned} SS_W &= \{A_1, A_2, A_3\}_W \\ &= \{(S-1; S-2; S-3)_1, (S-4; S-5; S-6)_2, (S-7; S-8; S-9)_3\}; \end{aligned} \quad (1)$$

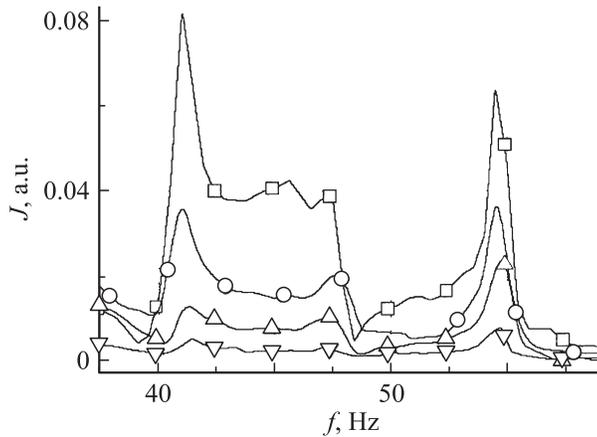
$$\begin{aligned} SS_N &= \{A_1, A_2, A_3\}_N \\ &= \{(S-11; S-12; S-13)_1, (S-14; S-15; S-16)_2, (S-17; S-18; S-19)_3\}. \end{aligned} \quad (2)$$

Возбуждение собственных колебаний конструкции осуществлялось однократным ударом стального шарика (радиус — 11 mm, масса — 34 g) по углу последней (восьмой) рамы этажерки в направлении Z. Варьирование степени возбуждения конструкции импульсом силы удара — 26; 96; 180; 235; 356; 520; 680 mN·s — производилось соответствующим отклонением подвески шарика.

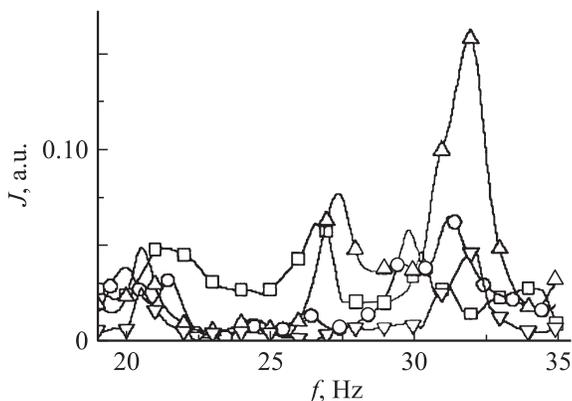
Пример нормированной временной формы деформации в узле  $A_1$  при возбуждении конструкции импульсом



**Рис. 2.** Нормированная временная форма  $\varepsilon(t)$ , снятая с помощью датчика S-2 в узле  $A_1$ , при импульсе  $26 \text{ mN} \cdot \text{s}$  силы удара (вставка) и фурье-образ  $J(f)$  деформации конструкции в диапазоне частот  $0\text{--}110 \text{ Hz}$  при ударном возбуждении с импульсами силы  $26$  ( $\nabla$ );  $180$  ( $\Delta$ );  $356$  ( $\circ$ );  $520$  ( $\square$ )  $\text{mN} \cdot \text{s}$ .



**Рис. 3.** Фурье-образ  $J(f)$  собственных колебаний конструкции в диапазоне частот  $42\text{--}58 \text{ Hz}$  при ее ударном возбуждении с импульсами силы  $26$  ( $\nabla$ );  $180$  ( $\Delta$ );  $356$  ( $\circ$ );  $520$  ( $\square$ )  $\text{mN} \cdot \text{s}$ .



**Рис. 4.** Фурье-образ  $J(f)$  стохастических колебаний конструкции в диапазоне частот  $21\text{--}35 \text{ Hz}$  при ее ударном возбуждении с импульсами силы  $26$  ( $\nabla$ );  $180$  ( $\Delta$ );  $356$  ( $\circ$ );  $520$  ( $\square$ )  $\text{mN} \cdot \text{s}$ .

$26 \text{ mN} \cdot \text{s}$ , снятой с помощью датчика S-2, приведен во вставку рис. 2. Время однократной регистрации временной формы сигнала колебания конструкции составляло  $4.3 \text{ s}$ . Интервал дискретизации  $\Delta t$  был равен  $33 \mu\text{s}$ . Временные формы деформационного возбуждения конструкции регистрировались соответственно в узлах  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$  конструкции следующими датчиками:

$$(S-1, S-2, S-3, S-12)_1; (S-6)_2; (S-7, S-8, S-9)_3. \quad (3)$$

На основании полученных временных форм возбуждений конструкции, полученных с помощью датчиков (3), построены фурье-образы ее деформации. В качестве примера в данной работе на рис. 2–4 представлены фурье-образы деформации конструкции, построенные на основе регистрации временной формы деформации с помощью датчика S-2.

### Краткий анализ результатов экспериментов

Обработанные результаты экспериментов с подвешенной конструкцией в виде фурье-образов деформации на области частот  $0\text{--}110 \text{ Hz}$  сведены в таблицу.

На основе анализа полученных фурье-образов деформации конструкции (см. таблицу) были выявлены и идентифицированы следующие три области.

1) Область собственных колебаний стержней с линейной зависимостью от степени возбуждения в диапазоне частот  $15.5\text{--}18.5$ ,  $36\text{--}39$ ,  $40\text{--}46$ ,  $53\text{--}56$ ,  $61\text{--}63.5$  и  $83.5\text{--}85.5 \text{ Hz}$ . Демонстрация одной из них (данные датчика S-2) представлены на рис. 3.

2) Область стохастических колебаний стержней конструкции в диапазоне частот  $18\text{--}35 \text{ Hz}$  (рис. 4), а также в диапазоне  $17\text{--}18$  и  $73\text{--}75 \text{ Hz}$  (регистрация с помощью датчика S-12).

3) Область собственных колебаний стержней конструкции с аномально высокой диссипацией энергии в диапазоне частот  $75\text{--}105 \text{ Hz}$  (рис. 2) (датчик S-2), а также, например, в диапазоне  $15\text{--}19 \text{ Hz}$  (регистрация с помощью датчика S-5).

В областях собственных колебаний конструкции установлена линейная зависимость модуля спектральной плотности колебаний от импульса силы удара. При этом в режиме подвески наблюдаются строгая повторяемость и неизменность частот при различных алгоритмах обработки в каждом узле (см. таблицу, колонки 3 и 4). Например, для узла  $A_3$  это частоты  $9.5$ ;  $17.8$ ;  $38.5$ ;  $61.5$ ;  $84.5$ ;  $95.5 \text{ Hz}$ . Таким образом, по „широкой“ стороне стержней с относительной погрешностью не более  $0.015$ , зарегистрирован ряд собственных частот модельной конструкции. На „узкой“ стороне стержней с помощью датчика S-12 зарегистрирован другой ряд собственных частот —  $9.2$ ;  $12$ ;  $21.7$ ;  $29$ ;  $45$ ;  $72 \text{ Hz}$ .

Полученные результаты указывают на возможность уменьшения количества датчиков для наблюдения [7]

Характеристика фурье-образов деформации конструкции в области частот 0–110 Hz

Номер датчика	Количество стохастических областей (их диапазон, Hz)	Количество областей „собственных“ колебаний	Частота „собственных“ колебаний, Hz	Примечание
S-1	1 (22.5–26.5)	4	38.5; 61.5; 84.5; 95	Узел A <sub>1</sub> , „широкая сторона“
S-2	1 (22.5–26.5)	4	40–46; 53–56; 84.5; 95	То же
S-3	1 (22.5–26.5)	5	9; 20; 39; 61.5; 84.5	» »
S-12	2 (17–18; 73–75)	6	9.2; 12; 21.7; 29; 45; 72	Узел A <sub>1</sub> , „узкая сторона“
S-7	1 (23–26)	4	9.5; 17.8; 38.5; 84.5	Узел A <sub>3</sub> , „широкая сторона“
S-8	1 (23–26)	7	9.5; 18; 38.5; 61.5; 66; 84.5; 95.5	То же
S-9	1 (23–26)	6	9.5; 18; 38.5; 66; 84.5; 95.5	» »
S-6	1 (22.5–26.5)	6	9.5; 17.8; 38.5; 61.5; 84.5; 95.5	Узел A <sub>2</sub> , „широкая сторона“

до 2–3. В сравнении со способом регистрации собственных частот конструкции по вынужденным колебаниям рассматриваемый способ более оперативен и требует меньше затрат.

Область стохастических колебаний стержней конструкции зарегистрирована датчиками S-1, S-2, S-3, S-6, S-7, S-8, S-9 в диапазоне частот спектра 22.5–26.5 Hz, тогда как датчиком S-12 (узкая сторона) — в области частот 17–18 и 73–75 Hz. Тем самым, наблюдается повторяемость эффекта во всех трех узлах конструкции.

При обработке ненормированных деформационных откликов, снятых с помощью датчиков (3), установлено, что модуль спектральной плотности колебаний конструкции в области 3 примерно на порядок меньше значения модуля в области 1. На наш взгляд, появление стохастических колебаний связано с наличием в сложной конструкции „бифуркаций“ и (или) областей неустойчивости.

## Заключение

Способом ударного возбуждения получены фурье-образы деформационных откликов физической модели конструкции, выполненной в виде семиярусной сварной стержневой этажерки. В части спектра 0–110 Hz установлены области собственных колебаний, диссипации колебаний, а также стохастических колебаний конструкции. На основании повторяемости и неизменности частот при разных алгоритмах обработки откликов можно сделать вывод о регистрации ряда собственных резонансных частот модельной конструкции. Во всех трех узлах конструкции наблюдалась повторяемость стохастических колебаний конструкции в диапазонах частот спектра 18–35, 22.5–26.5, 17–18 и 73–75 Hz.

Модуль спектральной плотности стохастических колебаний конструкции (область 3) примерно на порядок меньше значения модуля собственных колебаний конструкции (область 1). Проведенные на физической модели конструкции исследования позволяют сделать выводы о возможности как установления спектральных

критериев для выявления показателей потери устойчивости конструкции, так и разработки информационной измерительной системы для диагностирования и последующего мониторинга критических систем на основе сегнетоэлектрических датчиков деформации.

Данная статья выполнена в рамках грантов РФФИ № 06-08-01259, 07-08-12193.

## Список литературы

- [1] Chang P.C., Flatau A., and Liu S.C. // Structural Health Monitoring. 2003. Vol. 2. N 3. P. 257–267.
- [2] Mooney M.A., Gorman P.B., and Gonzalez J.N. // Structural Health Monitoring. 2005. Vol. 4. N 2. P. 137–153.
- [3] Farhey D.N. // Structural Health Monitoring. 2005. Vol. 4. N 4. P. 301–312.
- [4] Adams D.E., Farrar Ch.R. // Structural Health Monitoring. 2002. Vol. 1. N 2. P. 185–201.
- [5] Мухортов В.М., Маматов А.А., Зеленчук П.А., Головки Ю.И., Бирюков С.В., Масычев С.И. // Нанотехника. 2007. Т. 3. Вып. 11. С. 59–72.
- [6] Мухортов В.М., Головки Ю.И., Толмачев Г.Н., Мащенко А.И. // ЖТФ. 1998. Т. 68. Вып. 9. С. 99–103.
- [7] Есипов Ю.В., Мухортов В.М., Толмачев Г.Н. // Тр. Междунар. науч. шк. „Моделирование и анализ безопасности и риска в сложных системах“. (МА БР–2005). 28 июня–1 июля 2005. СПб.: ГОУ ВПО „СПбГУАП“ 2005. С. 178–183.