УДК 620.1.08:53.08:629.12

О ВОЗМОЖНОСТИ РАННЕГО ДИАГНОЗА СОСТОЯНИЯ СТЕРЖНЕВЫХ КОНСТРУКЦИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ ДИНАМИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ[1]

Есипов Ю. В.[2]***, Мухортов В. М.***[3]***, Калинчук В. В.***[4]***, Анджикович И. Е.***[5]

EARLY DIAGNOSIS TECHNOLOGY OF ROD CONSTRUCTIONS DIAGNOSIS WITH USE OF DEFORMATION FERROELECTRIC SENSORS

Esipov Yu. V., Muhortov V. M., Kalinchuk V. V., Andjikovich I. E.

The state determination features for an intact and a damaged vertically set periodic welded frame construction model (with or without defect) were established through Fourier image development of linear and nonlinear deformation responses to the serial impact effects and phase diagram comparison of deformation behavior. Received results confirmed the possibility of sophisticated structures diagnosis through the series of impact testing and detection of nonlinear fields and natural oscillations fields of dynamic deformation, which time forms are filed by three thin-film ferroelectric sensors mounted in various points of the construction model.

Keywords: Complex construction, shock testing, stability, deformation fluctuations, nonlinear dynamics, ferroelectrics sensors, Structural Health Monitoring

Введение

Одним из бурно развивающихся направлений неразрушающего контроля и технической диагностики сооружений и конструкций является технология Structural Health Monitoring (SHM) (дословно — Мониторинг Здоровья (Ресурса) Конструкций), (Farrar C. R., Sohn H., Dyke S. J., Ventura C., Virgin L. N., Nichols J. M., Todd M. D. и др.). В обзоре по SHM-технологии [1] как наиболее актуальному вопросу ранней диагностики конструкций уделяется внимание возможности изучения такого типа нелинейных повреждений, при котором изменение собственной частоты конструкции за счет усталости материала (например, в её сопряжениях) не чувствительно к зарождающимся дефектам, особенно в низкочастотной области напряжений. В отличие от диагностирования поврежденных конструкций и их элементов по формам спектров собственных колебаний (основное направление исследований в рамках неразрушающего контроля и SHM-технологии), при анализе цельной неповрежденной и (или) стареющей конструкции [2–5] возникают неясности при ответе на следующие вопросы:

1) каково поведение совместно связанных элементов?

2) до каких пределов сохраняется «коллективная устойчивость» или устойчивость за счет конструкционных связей?

3) как сопрячь (учесть) результаты оценки прочности и (или) ресурса отдельно взятых разнородных элементов для принятия решений об устойчивости (ресурсе) конструкции в целом?

При этом отмечается, что решение как указанных, так и ряда других задач тензометрии и виброметрии сдерживается из-за отсутствия миниатюрных и высокочув-

[1]Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (09-08-00437а, 08-08-00917-а и проекта 2010-1.3.1-222-007-015).

[2]Есипов Юрий Вениаминович, д-р техн. наук, заведующий лабораторией динамики неоднородных структур Южного научного центра РАН; e-mail: yu-yesipov5@yandex.ru

[3]Мухортов Владимир Михайлович, д-р физ.-мат. наук, заведующий лабораторией динамики неоднородных структур Южного научного центра РАН; e-mail: muhortov@rambler.ru

[4]Калинчук Валерий Владимирович, д-р физ.-мат. наук, заведующий лабораторией динамики неоднородных структур Южного научного центра РАН; e-mail: kalin@ssc-ras.ru

[5]Анджикович Игорь Евгеньевич, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник НИИ механики и прикладной математики им. И. И. Воровича Южного федерального университета ; e-mail: ocean_8@mail.ru

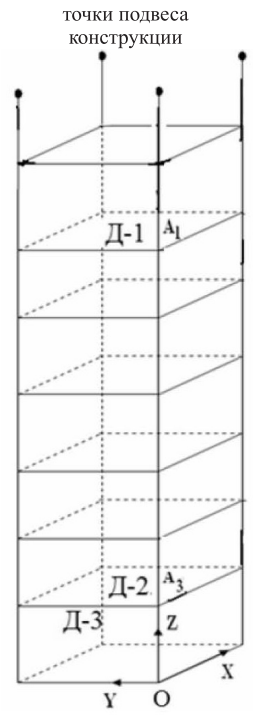

Рис. 1. Модель периодической семиярусной стержневой конструкции в вертикальном расположении, где A_1, A_3 — узлы, относительно которых по широкой стороне седьмой и второй рам модели соответственно установлены сегнетоэлектрические датчики Д-1 и (Д-2, Д-3)

ствительных датчиков деформации. Теоретические и экспериментальные исследования задач хаотической динамики и нелинейных эффектов в конструкциях в рамках SHM–технологии посвящены [1, 6, 7]: а) анализу временных рядов; б) построению аттракторов; в) оценке их размерности; а также г) теоретической проверке нелинейности, например, путем вычисления ляпуновских показателей по реализации. Причем известно, что теоретические исследования динамической деформации сложных конструкций связаны с вычислительной сложностью и неизбежными упрощениями условий задачи [8,9].

Целью данной работы является экспериментальное обоснование признаков идентификации состояний внешне неповрежденных стареющих конструкций на основе изучения высокодобротных и нелинейных областей деформационных откликов стержневой модельной конструкции, наблюдаемых с помощью тонкопленочных сегнетоэлектрических датчиков. Для этого на экспериментальной установке в составе информационно-измерительного тракта и периодической семиярусной стержневой конструкции [10, 11] (в режиме её вертикальной подвески) проводились серийное ударное тестирование и сравнительный анализ поведения линейной (высокодобротной) и нелинейной областей Фурье-образа деформационного процесса при увеличении импульса силы удара по конструкции. В результате дополнительно были построены фазовые диаграммы деформационных откликов, выявлены отличительные признаки для идентификации состояний неповрежденной и заданно поврежденной конструкции.

1. Модель конструкции и условия её применения

Модель стержневой периодической конструкции [10–12] в вертикальном расположении (рис. 1) сварена из восьми цельно вырезанных квадратных рам сечением 4×8 (мм) со стороной 250 мм и 28 стержней — стоек с таким же сечением и длиной 250 мм, с образованием семи пролётов, пронумерованных снизу вверх. Общая масса конструкции составляет 3,6 кг. Причем при показанной на рис. 1 вертикальной подвеске этажерки торцевые стороны рам являются «узкими» (4 мм), а их «широкие» стороны перпендикулярны оси OZ. Стержни приварены к рамам так, что их «широкие» стороны перпендикулярны оси OY. Созданное соотношение сторон сечения 1:2 (узкая и ши-

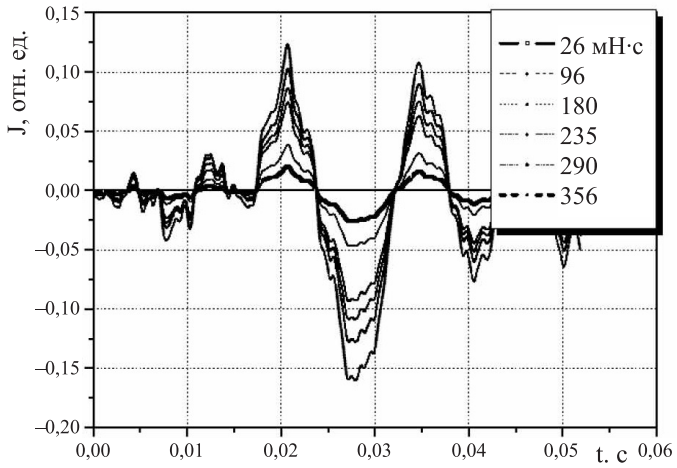

Рис. 2. Временная регистрация сегнетоэлектрическим датчиком Д-1 деформационных колебаний неповрежденной конструкции при увеличении импульса удара от 26 до 356 мН·с

рокая стороны) обусловливает различия в формировании в узлах сопряжения модели конструкции, в первую очередь, поперечных и изгибных деформационных волн, которые наиболее эффективно регистрируются с помощью установленных на эти стороны конструкции разработанными авторами тонкопленочными сегнетоэлектрическими датчиками.

Модель подвешивалась на кевларовых нитях. Конструкция и физико-технические характеристики сегнетоэлектрического датчика динамической деформации описаны в [12–14]. На основании результатов испытаний стержневой конструкции в горизонтальном расположении, полученных от 12 сегнетоэлектрических датчиков [10, 11], при анализе деформации конструкции в вертикальном расположении было принято решение ограничиться использованием трёх таких датчиков. Сегнетоэлектрические датчики Д-1, Д-2, Д-3 наклеивались посередине широкой ближней стороны седьмой (Д-1) и второй (Д-2, Д-3) рам модели (нумерация рам снизу, стороны рам исходят из узлов A_1 и A_3 по направлению, параллельному оси OY) (рис. 1). Причем датчик Д-2 был наклеен сверху, а датчик Д-3 — снизу стороны второй рамы.

2. Методика эксперимента

Серийные тестовые возбуждения модельной конструкции производились путем однократного удара стального шарика (радиус 11 мм, масса 34 г) по углу третьей рамы конструкции (в выбранной системе координат $OXYZ$ это точка $\{X_y = 0, Y_y = 0, Z_y$=50 см$\}$ (рис. 1)) в направлении OY с отклонением от вертикальной оси в интервале от 5 до 30° градусов с дискретностью 5°. Колебания маятника выполнялись в плоскости $\{X_1 = 0, Y, Z\}$. При этом импульс силы, сообщаемый конструкции в каждой серии удара, дискретно изменяли в следующих пределах: 26; 96; 180; 235; 290; 356 (мН·с) (полная «штатная» серия ударных возбуждений). Датчиками Д-1, Д-2, Д-3 регистрировались временные формы (Т-формы) деформационного возбуждения конструкции (одна из временных форм представлена на рис. 2). При регистрации и обработке деформации в реальном масштабе времени режим работы цифрового осциллографа ОЦЗС-02 устанавливался с помощью инсталляционной программы ADCLab на частоте дискретизации АЦП 30,52 кГц. При этом длительность τ_v времени наблюдения сигнала выбиралась из двух значений τ_{v1}=4,29462 или τ_{v2}=17,17848 с, при которых объем буфера ОЗУ устанавливался соответственно на 131 072 и 524 289 бит и обеспечивалось Фурье-преобразование (2^{17}+1 или 2^{19}+1) с дискретностью по частоте $df_1=1/\tau_v$=0,23283 или df_2=0,05821 Гц. Коэффициент усиления при проведении временной записи варьировался от 1 до 50 и выбирался индивидуально для каждого датчика с учетом предварительной регистрации им деформации. Для обеспечения устойчивой синхронизации и достоверной записи временных зависимостей деформации при возбуждении конструкции второй канал цифрового осциллографа ОЦЗС-02 использовался для записи временной формы однократного удара шарика. Режим синхронизации запи-

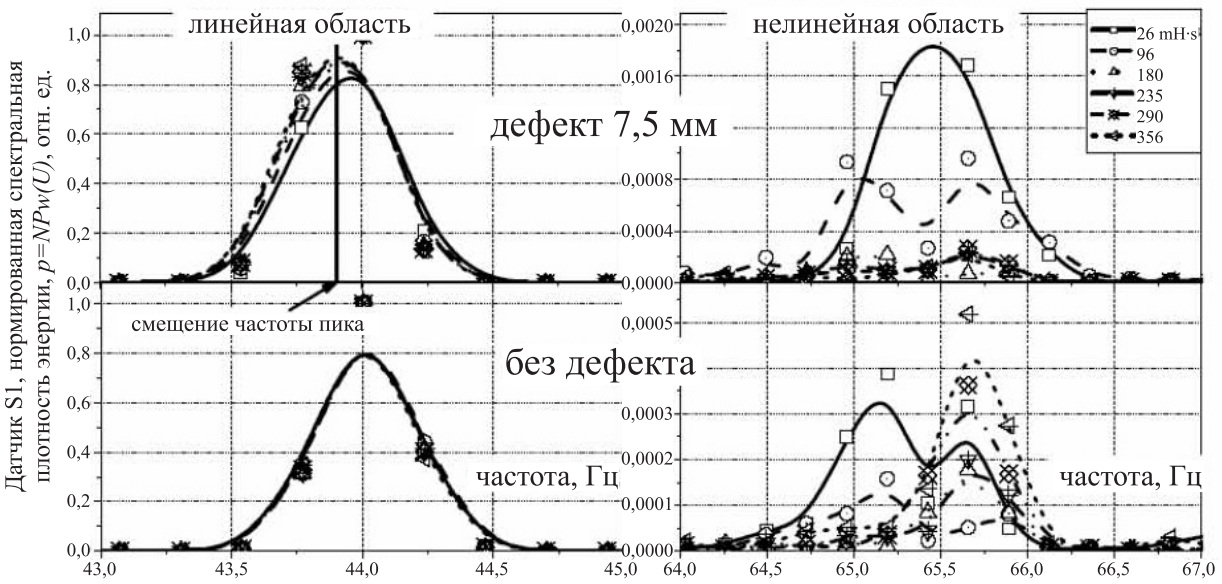

Рис. 3. Фурье образы линейных и нелинейных деформационных откликов на серийные удары с импульсами от 26 до 356 мН·с неповрежденной (внизу) и дефектной (вверху) конструкции при её вертикальной подвеске на кевларовых нитях

си сигналов с датчиков применялся «внешний» — от электрического перепада (переднего фронта) напряжения при прикосновении шарика к физической модели. Синхронно измеренная длительность удара на всем диапазоне воздействия находилась в интервале от 0,2 до 0,4 мс. Оказалось, что вследствие неизбежного варьирования координат точки и длительности удара в системе «шар – конструкция» в ходе эксперимента импульс силы, сообщаемый конструкции, не являлся постоянной величиной. Оценка относительной погрешности величины импульса удара находилась в пределах 10 %, что учитывалось в ходе последующей обработки и сравнительного анализа линейной и нелинейной областей деформационного отклика конструкции. Для дополнительного ослабления влияния помех применялись также программные процедуры усредненного сглаживания и нормировки по амплитуде временных зависимостей деформации.

Количество реализаций как серий удара, так и наблюдений естественных колебаний моделей, снимаемых каждым датчиком, равнялось пяти. При этом осуществлялась проверка повторяемости и (или) воспроизведения исследуемых эффектов.

Поврежденное состояние (конструкция «с дефектом») вводилось путем упругого и неупругого сжатия в пределах до 7,5 мм стержней второго лицевого пролета семиярусной конструкции (рис. 1), нумерация пролетов, как и рам, снизу.

3. Результаты и их анализ

При проведении штатных серий ударных возбуждений (п. 2) получены временные зависимости, одна из которых приведена на рис. 2. Построены Фурье-образы деформационного возбуждения неповрежденной и «дефектной» конструкции, пример которых представлен на рис. 3. Результаты анализа Фурье-образов деформации конструкции и выявленных областей высокой добротности (о.в.д.) и нелинейности (н.л.о.) приведены в таблице.

При ударном возбуждении периодической стержневой конструкции, как и в горизонтальном расположении [10,12], при вертикальной её подвеске были выявлены следующие области деформационных колебаний: а) высокой добротности (о.в.д.) (рис. 3, левая часть) (диапазон 27,5–29,5 Гц), пп. таблицы кроме п. 3, 5, 11; б) нелинейная область (н.л.о.) (рис. 3, правая часть), а также п. 3, 5, 11 таблицы; в) диссипации энергии (диапазон 68–69 Гц). В областях высокой добротности установлена линейная зависимость максимума (пика) спектральной плотности энергии (спектра) колебаний конструкции от импульса силы удара. При этом в режиме свободной подвески наблюдалась строгая повто-

Данные Фурье анализа зарегистрированных датчиком Д-1 областей высокодобротных (о.в.д.) и нелинейных (н.л.о.) колебаний поврежденной (7,5 мм сжатия между вертикальными стойками второго пролета с лицевой стороны) и неповрежденной стержневой семи ярусной конструкции при серии ударных возбуждений 26; 96; 180; 235; 290; 356 (мН·с) в режиме вертикальной подвески. Диапазон регистрации 0,4...100 Гц. Дискретность преобразования по частоте — df_2 = 0,058 Гц

№ п/п	Тип области	Датчик №1 поврежденная конструкция		Датчик №1 неповрежденная конструкция		Критерий различения
		Частота пика / диапазон частот, Гц	Амплитуда пика (энергии спектр. составляющей), отн. ед.	Частота пика / диапазон частот, Гц	Амплитуда пика (энергии спектр. составляющей), отн. ед.	
1	о.в.д.	3,35	2,6E−10	3,47	3E−10	
2	о.в.д.	7,38	5E−10	7,58	6,6E−10	
3	н.л.о.	17,4	4E−12	17,57	7,4E−12	Критерий №3
4	о.в.д.	22	8,5E−9	22,3	1,4E−8	
5	н.л.о.	24,7	8E−12	24,63	6E−12	Критерий №2
6	о.в.д.	28,3	3E−8	28,3	1,9E−8	
7	о.в.д.	33,5	1,3E−9	33,7	1,2E−9	
8	о.в.д.	40,6	1,5E−12	40,7	2E−12	
9	о.в.д.	44	4,5E−8	44	4,5E−8	
10	о.в.д.	53,8	1,7E−9	53,8	2,6E−9	
11	н.л.о. о.д.э	64,5...66,5 68,4	1E−10 3,1E−12	64,5...66 68...69	2,4E−11 3,6E−12	Критерий №1
12	о.в.д.	70,5...71,5	5E−9	71,2	1,1E−10	
13	срыв н.л.о.	72,5	9E−11	72,4	6,3E−12	
14	о.в.д.	81,8	1,5E−9	81,9	1,3E−9	
15	о.в.д.	95,5	5,5E−10	95,5	1,4E−10	

ряемость и неизменность частот при разных алгоритмах обработки в каждом узле. Кроме того, в поврежденной конструкции было зарегистрировано смещение частоты пика спектра на 0,1 Гц относительно неповрежденной конструкции (рис. 3, левая часть).

Было установлено, что в нелинейной области деформационных колебаний имеет место более высокая чувствительность конструкции к потере формы. Это следует из сравнительного анализа Фурье-образа нелинейных колебаний неповрежденной и дефектной конструкции (рис. 3, правая часть) (диапазон 64–66 Гц), что может быть использовано для построения критериев различения напряженных состояний как неповрежденной, так и дефектной конструкции.

В области упругой деформации материала более информативными оказываются малые возмущения редварительно напряженного состояния конструкции. При ударах с импульсами 26, 96, 180 (мН·с) происходит уменьшение амплитуд нелинейных составляющих (рис. 3, правая часть) и линейный рост амплитуд собственно высокодобротных составляющих Фурье-образа деформационных откликов конструкции (рис. 3, левая часть) (диапазон частот 27–29,5 Гц). В нелинейной области колебаний смещение частоты пика составило $7 \cdot df_2$=0,4 Гц. Возможно, такое поведение сварной стержневой конструкции связано с динамическим изменением её коллективных связей и элементов (стержней и узлов сопряжения) и проявлением бифуркаций.

На основе анализа повторяемости откликов (до пяти реализаций в каждой серии ударов при одинаковых условиях) в отдельных областях высокой добротности исходной и дефектной конструкции зафиксировано смещение максимумов спектра (резонансов) от четырёх до десяти интервалов дискретности по частоте, $(4–10) \cdot df_2$=0,24–0,58 Гц.

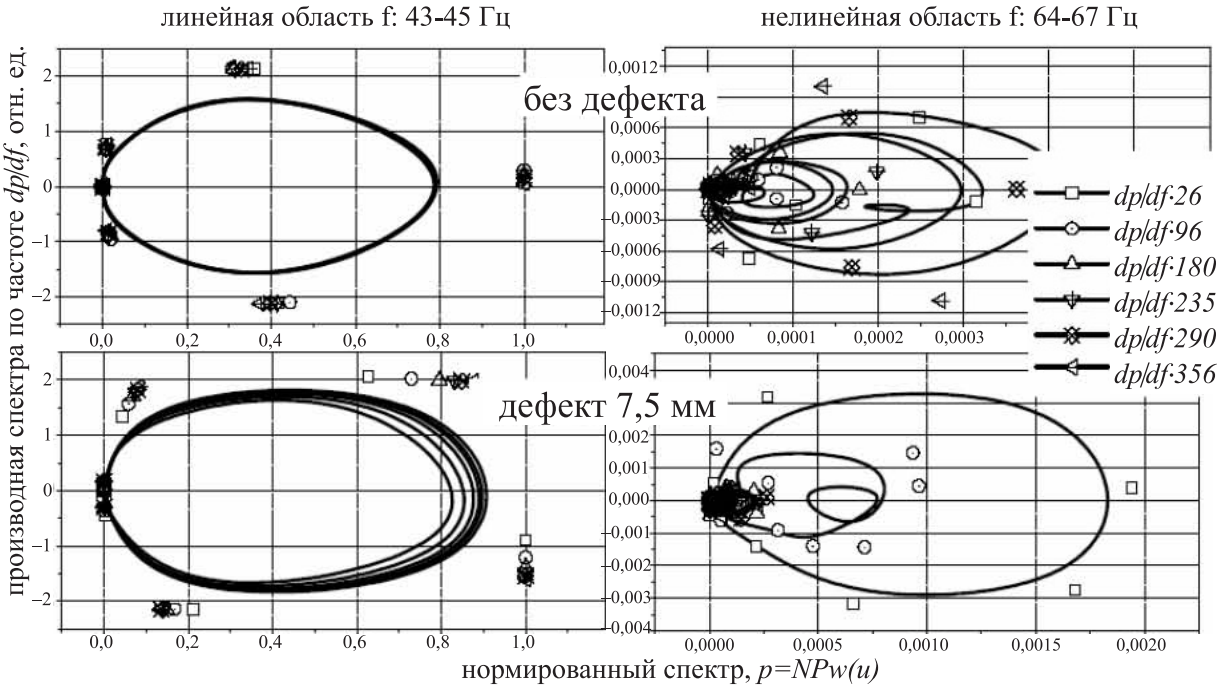

Рис. 4. Фазовые диаграммы линейных и нелинейных деформационных откликов на серийные удары с импульсами от 26 до 356 мН·с неповрежденной (вверху) и дефектной (внизу) конструкции при её вертикальной подвеске на кевларовых нитях

4. Результаты построения фазовых диаграмм деформационных откликов конструкции

Известно [1, 2, 5], что фазовые диаграммы являются более тонким инструментом, позволяющим описывать поведение нелинейных процессов в объектах. Покажем это. По Фурье-образам (рис. 3) были построены нормированные фазовые диаграммы линейной и нелинейной областей деформационных откликов конструкции (рис. 4). Как видно из левой части рис. 4, при наличии дефекта фазовая диаграмма линейной области «расширилась» примерно на 10 %. Если учесть возможные инструментальные и методические погрешности, см. п. 2, то этот результат не может быть однозначно отнесен к диагностическому признаку. Сдвиг пика (максимума спектральной плотности энергии в линейной области) наблюдался по Фурье-образу (рис. 3, левая часть), тогда как по фазовой диаграмме (рис. 4, левая часть) этого сдвига мы не наблюдаем. Более наглядным признаком различения дефектного состояния конструкции является результат сравнения фазовых диаграмм нелинейной области, правая часть рис. 4. Видно, что при сравнительно слабых ударах «дефектная» конструкция может быть однозначно опознана по площади нормированной фазовой диаграммы.

Следовательно, построенные фазовые диаграммы неповрежденной и дефектной конструкции подтверждают вывод о регистрации нами линейных и нелинейных деформационных откликов с помощью сегнетоэлектрических датчиков динамической деформации и содержат признаки, которые могут быть использованы для различения состояний конструкции в практически важных режимах крепления и подвески.

Таким образом, на основании анализа Фурье-образов деформационных откликов конструкции при её свободной подвеске и построения фазовых диаграмм получены следующие диагностические признаки дефектной конструкции: а) сдвиг максимума спектральной плотности энергии в линейной области Фурье-образа; б) расширение площади нормированной фазовой диаграммы нелинейных деформационных откликов при слабых тестовых возбуждениях. По-видимому, идентификация дефектов формы и потери устойчивости, а также напряженных и поврежденных состояний конструкции основана на комплексном применении этих диагностических признаков.

Заключение

В развитие результатов по исследованию деформационного поведения периодической стержневой конструкции как при горизонтальной подвеске, так и в режиме её укладки на кронштейны, при тестовых ударных возбуждениях модельной сварной металлической конструкции в режиме вертикальной подвески в Фурье-образе её деформационных откликов было подтверждено наличие трех областей: линейности, нелинейности и диссипации энергии. Применительно к сложной конструкции в качестве комплексного диагностического признака различения её напряженных и (или) дефектных состояний могут быть использованы такие полученные нами количественные показатели: а) сдвиг максимума спектральной плотности энергии в линейной области Фурье-образа; б) расширение площади нормированной фазовой диаграммы нелинейных деформационных откликов при слабых тестовых возбуждениях.

Литература

1. Nonlinear System Identification for Damage Detection. Charles R. Farrar a.o. / Los Alamos National Lab. Contract DE-AC52-06NA25396. Nov. 2007.
2. *Nichols J. M., Todd M. D., Seaver M., Virgin L. N.* Use of chaotic excitation and attractor property analysis in structural health monitoring // Phys. Rev. E. 2003. Vol. 67. P. 16–29.
3. *Virgin L. N., Plaut R. H.* Use of frequency data to predict secondary bifurcation // Journal of Sound and Vibration. 2002. Vol. 51. P. 919–926.
4. *Есипов Ю. В., Мухортов В. М.* Экспериментальное исследование критериев устойчивости сложной конструкции // Современные проблемы механики сплошной среды: Труды 11 междунар. конф. (Ростов-на-Дону, 1–3 декабря 2007 г.) Ростов-н/Д: ЮФУ. НИИ ПиПМ им. И. И. Воровича, 2007. Вып. 11, Ч. 1. С. 23–27.
5. *Томпсон Дж. М. Т.* Неустойчивости и катастрофы в науке и технике: Пер. с англ. М.: Мир, 1985. 254 с.
6. *Nichols J. M., Todd M. D., Virgin L. N.* Structural health monitoring through chaotic interrogation // Mechanica. 2003. Vol. 38. P. 239–250.
7. *Кузнецов С. П.* Динамический хаос. М.: Физматлит, 2001. 296 с.
8. *Бондарь В. Д.* Метод независимых напряжений в нелинейной антиплоской деформации // Прикладная механика и техническая физика. 2003. №2. С. 152–165.
9. *Вассерман И. Н., Шардаков И. Н.* Постановка и решение упругих динамических задач для стержневых систем с граничными условиями, описываемыми многозначными соотношениями // Прикладная механика и техническая физика. 2003. №3. С. 124–135.
10. *Есипов Ю. В., Мухортов В. М., Калинчук В. В.* Испытательная установка для анализа деформации моделей трехмерных конструкций // Измерительная техника. 2008. №10. С. 15–24.
11. *Есипов Ю. В., Мухортов В. М., Калинчук В. В.* Мониторинг напряженного состояния стержневых конструкций с использованием сегнетоэлектрических наноразмерных датчиков // Проблемы нелинейной механики деформируемого твердого тела: Труды Всеросс. конф. (Пермь, 12–16 октября 2008). г. Пермь.: Институт механики сплошных сред УрО РАН, 2008. Вып. 11. С. 43.
12. *Есипов Ю. В., Мухортов В. М.* Интегральные датчики динамической деформации на основе тонких сегнетоэлектрических пленок для мониторинга сложных механических систем // ЖТФ. 2009. Т. 51. №1. С. 78–81.
13. *Головко Ю. И., Бирюков С. В., Масычев С. И., Мухортов В. М., Маматов А. А., Зеленчук П. А.* Гетероструктуры на основе наноразмерных сегнетоэлектрических пленок: получение, свойства и применение // Нанотехника. 2007. Т. 3. №11. С. 59–72.
14. *Бирюков С. В., Мухортов В. М., Мухортов В. М.* Новый датчик динамической деформации на основе тонких пьезоэлектрических пленок, полученных ионно-плазменным напылением // Мир измерений. 2007. №7. С. 45–61.

Ключевые слова: сложные конструкции, ударное тестирование, устойчивость, деформационные колебания, нелинейная динамика, сегнетоэлектрические датчики, структурный мониторинг «жизнестойкости»

Статья поступила 20 декабря 2010 г.
Южный научный центр РАН, г. Ростов-на-Дону
НИИ механики и прикладной математики им. И. И. Воровича Южного федерального университета, г. Ростов-на-Дону
© Есипов Ю. В., Мухортов В. М., Калинчук В. В., Анджикович И. Е., 2010