

УДК 620.1.08:53.08:629.12

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ СПЕКТРАЛЬНОГО КРИТЕРИЯ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ СТЕРЖНЕВОЙ КОНСТРУКЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ ДЕФОРМАЦИИ

Ю. В. Есипов

Южный научный центр РАН, 344010 Ростов-на-Дону

E-mail: yu-yesipov5@yandex.ru

Путем серийного ударного возбуждения и построения фурье-образа линейных и нелинейных деформационных откликов и фазовых портретов неповрежденного или поврежденного вертикально подвешенного макета периодической сварной стержневой конструкции установлена зависимость отношения площадей фазовых портретов нелинейной и линейной областей деформационного отклика, характеризующего напряженность (поврежденность) макета, от импульса силы удара. Динамические деформационные отклики регистрировались с помощью наклеенных на макет сверхширокополосных ( $10^{-2} \div 10^8$  Гц) сегнетоэлектрических микродатчиков на основе тонких пленок  $Pb(Zr_{0,53}Ti_{0,47})O_3$  толщиной около 2 мкм с площадью зоны контакта 0,8 мм<sup>2</sup>.

**Ключевые слова:** сложные конструкции, показатели напряженности, деформационные колебания, фурье-образ, нелинейная динамика, сегнетоэлектрические датчики.

В настоящее время представляет интерес исследование задачи нахождения информативных величин для диагностики состояния конструкций по нелинейным колебаниям. Следует отметить, что развитие методов тензометрии и виброметрии, используемых при анализе конструкции в целом, осложнено вследствие отсутствия миниатюрных высокочувствительных датчиков деформации. Кроме того, при проведении теоретических [1–3] и экспериментальных [4, 5] исследований динамической деформации сложных конструкций вычисления существенно затруднены, поэтому неизбежны упрощения условий задачи.

Целью работы является экспериментальное определение и обоснование показателей, используемых при идентификации состояний стареющих конструкций без видимых повреждений, на основе серии ударов с увеличивающимся импульсом силы и изучения высокочастотных (линейных) и нелинейных областей фурье-образа деформационных откликов стержневой конструкции.

**1. Макет сложной конструкции и условия его нагружения.** Стальной макет (сталь марки Ст.10) стержневой периодической конструкции [6, 7] сварен из восьми цельных квадратных рам с длиной стороны 250 мм и 28 стержней-стоек длиной 250 мм, образующих семь ярусов. Конструкция была вертикально подвешена на кевларовых нитях. Поперечное сечение стержней и элементов рам имело размеры 4 × 8 мм. При общей массе

---

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 09-08-00437а) и в рамках Федеральной целевой программы (код проекта 2010-1.3.1-222-007).

Таблица 1

Расчетные абсолютные  $u_1$  и нормированные  $u_n$  значения импульса удара при различных углах отклонения маятника

$\alpha$ , град	$u_1$ , мН·с	$u_n$	$\alpha$ , град	$u_1$ , мН·с	$u_n$
5	6,2	1	20	24,5	4
10	12,2	2	25	30,6	5
15	18,4	3	30	36,6	6

макета 3,6 кг его высота составляла 1760 мм. Соотношение сторон сечения элементов 1 : 2 обуславливало различия в формировании поперечных и изгибных деформационных волн в узлах сопряжения макета. Динамические деформационные отклики регистрировались с помощью наклеенных на макет сверхширокополосных ( $10^{-2} \div 10^8$  Гц) сегнетоэлектрических микродатчиков на основе тонких пленок  $\text{Pb}(\text{Zr}_{0,53}\text{Ti}_{0,47})\text{O}_3$  (цирконийтитанат свинца) толщиной приблизительно 2 мкм с площадью зоны контакта  $0,8 \text{ мм}^2$  [8, 9].

Для анализа деформационных откликов макета в целом были выбраны три датчика, которые устанавливались соответственно в середине стороны (длиной 8 мм) элемента рамы шестого пролета (один датчик) и рамы второго пролета (два датчика на противоположных сторонах рамы). Пролеты нумеровались в направлении снизу вверх. Поврежденное состояние макета (макет с дефектом) моделировалось упругим и неупругим сжатием (перемещение не превышало 7,5 мм) стержней третьего пролета макета. Датчики располагались в зонах их наибольшей чувствительности к изгибным деформационным волнам [7].

**2. Методика эксперимента.** Серийные тестовые возбуждения колебаний макета осуществлялись путем однократного удара стальным шариком (радиус 11 мм, масса  $m = 34$  г, длина кевларовой нити  $h = 40$  см) по углу третьей рамы в лицевой плоскости с отклонением от вертикальной оси на угол  $\alpha$  в интервале от  $5^\circ$  до  $30^\circ$  и с дискретностью  $5^\circ$ . При этом импульс силы удара  $U(\alpha) = F\Delta t$  оценивался из условия полного преобразования потенциальной энергии “падения” шарика с высоты  $\Delta h$  в кинетическую энергию при его столкновении с макетом:  $\Delta h mg = 0,5mV^2$ . С учетом скорости шарика в момент удара  $V = (2g\Delta h)^{0,5}$  и параметров маятника приближенная зависимость импульса силы удара от угла  $\alpha$  имела вид

$$U(\alpha) \approx 0,1(1 - \cos \alpha)^{0,5}.$$

Расчетные значения импульсов силы, дискретно передаваемых макету в каждой серии удара, приведены в табл. 1 ( $u_n(\alpha) = u(\alpha)/u(\alpha_0)$  ( $\alpha_0 = 5^\circ$ ) — нормированные значения импульса силы). Для обеспечения устойчивой синхронизации и достоверной регистрации зависимостей деформации от времени применялся “внешний” режим синхронизации записи сигналов с датчиков с момента изменения напряжения вследствие прикосновения шарика.

**3. Результаты экспериментов и их анализ.** В каждой серии ударов получены зависимости деформации от времени и построены фурье-образы деформационных откликов макета для двух его состояний: исходного и поврежденного. На рис. 1 показаны амплитудно-временные зависимости деформации макета при ударах по нему шарика с различными импульсами (см. табл. 1).

Результаты регистрации линейных и нелинейной областей фурье-образа деформационных откликов макета представлены в табл. 2 (диапазон регистрации частот  $f = 0,4 \div 100,0$  Гц, дискретность преобразования по частоте  $df = 0,058$  Гц). Признаками линейной области в каждом выбранном частотном диапазоне являлись линейная зависимость амплитуды отклика от величины импульса удара и ее повторяемость в различных сериях

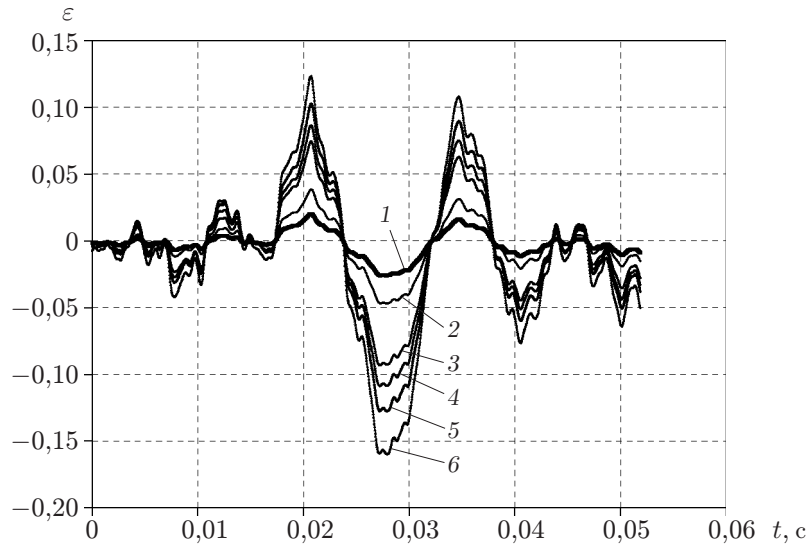


Рис. 1. Зависимость деформации макета от времени при регистрации сегнето-электрическим датчиком серии ударов с различными нормированными значениями импульса  $u_n$ :

1 —  $u_n = 1$ ; 2 —  $u_n = 2$ ; 3 —  $u_n = 3$ ; 4 —  $u_n = 4$ ; 5 —  $u_n = 5$ ; 6 —  $u_n = 6$

Таблица 2

Результаты регистрации линейных (ЛО) и нелинейной (НО) областей деформационных откликов в исходном (неповрежденном) и поврежденном состояниях вертикально подвешенного макета и выявленные диапазоны частот

Номер эксперимента	Тип области	Исходное состояние макета		Поврежденное состояние макета		$\Delta f$ , Гц
		$f_*^и$ , Гц	$J_0^и$	$f_*^п$ , Гц	$J_0^п$	
1	ЛО	28,3	0,42	28,3	0,67	0
2	ЛО	33,7	0,028	33,5	0,026	0,20
3	ЛО	40,7	$4 \cdot 10^{-5}$	40,6	$3 \cdot 10^{-5}$	0,10
4	ЛО	44,0	1	43,75	1	0,25
5	ЛО	53,8	0,057	53,9	0,04	-0,10
6	НО	64,5 ÷ 66,0	$5 \cdot 10^{-3}$	64,5 ÷ 66,5	$2 \cdot 10^{-3}$	0,40

Примечание.  $f_*$  — частота, соответствующая максимуму амплитуды колебаний;  $J_0$  — относительная амплитуда колебаний;  $\Delta f = f_*^и - f_*^п$ .

ударов. Признаком нелинейной области являлась повторяемость нелинейного по амплитуде отклика в выбранном частотном диапазоне при варьировании величины импульса удара.

На рис. 2 представлены нормированные в серии ударов ( $u_n = 1 \div 6$ ) фурье-образы линейной и нелинейной областей деформационных откликов поврежденного и неповрежденного макетов. В дополнение к результатам [9], полученным для рамных элементов, на рис. 2 показано, что в нелинейной области деформационных откликов имеет место более высокая чувствительность конструкции к потере формы. При этом более информативными оказывались малые возмущения макета. В случае ударов при  $\alpha = 5 \div 15^\circ$  ( $u_n = 1 \div 3$ ) происходило уменьшение амплитуд нелинейных составляющих и линейный рост амплитуд (пиков) в линейных областях. При этом в нелинейной области  $\Delta f \leq 0,4$  Гц.

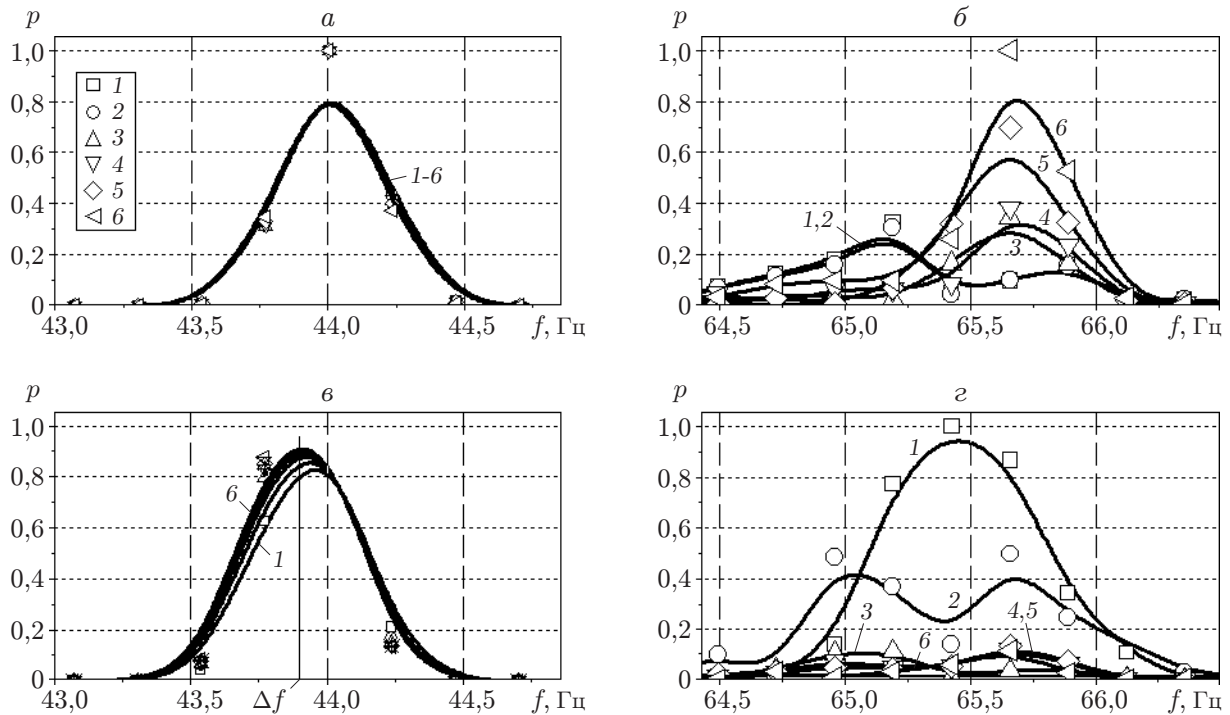


Рис. 2. Фурье-образы линейной (а, в) и нелинейной (б, г) областей деформационных откликов на серию ударов с различными нормированными значениями импульса: а, б — неповрежденный макет, в, г — макет с дефектом (перемещение равно 7,5 мм); остальные обозначения те же, что на рис. 1

С использованием алгоритма [10] построены нормированные фазовые портреты  $p_{df}(u) = Np(f, u)/df$  ( $p_{df}(u)$  — производная по частоте нормированного в каждой серии модуля  $p$  спектральной плотности деформации, зависящего от импульса  $u$  силы удара) для неповрежденного макета и макета с дефектом (рис. 3). Линейной области соответствовали частоты  $f = 43 \div 45$  Гц, нелинейной —  $f = 64 \div 67$  Гц. Из рис. 3 следует, что по фазовым портретам (особенно для нелинейной области) можно определить состояние макета. Несмотря на то что модуль спектра линейной области почти на три порядка выше модуля спектра нелинейной области (см. табл. 2), нормированный фазовый портрет нелинейной области может служить индикатором перераспределения напряженного состояния в макете в целом.

На рис. 3, в видно, что при наличии дефекта фазовый портрет линейной области расширяется приблизительно на 10 %. С учетом возможных измерительных и расчетных погрешностей этот результат нельзя однозначно считать достоверным.

Более информативным показателем различия напряженного и ненапряженного состояний макета является результат сравнения площадей нормированных фазовых портретов линейной  $S_{ЛО}(u)$  и нелинейной  $S_{НО}(u)$  областей (см. рис. 3, в, г). Видно, что при сравнительно слабых ударах конструкция с дефектом может быть однозначно выявлена по площади нормированного фазового портрета. Следовательно, в качестве информативного параметра поврежденности макета в целом можно использовать отношение площадей нелинейной и линейной областей фазового портрета:

$$\eta_i(u) = (S_{НО}(u)/S_{ЛО}(u))_i.$$

Здесь индекс  $i = 0$  соответствует исходному состоянию макета,  $i = 1$  — поврежденному состоянию (рис. 4). Из рис. 4 следует, что различие состояний макета можно выявить

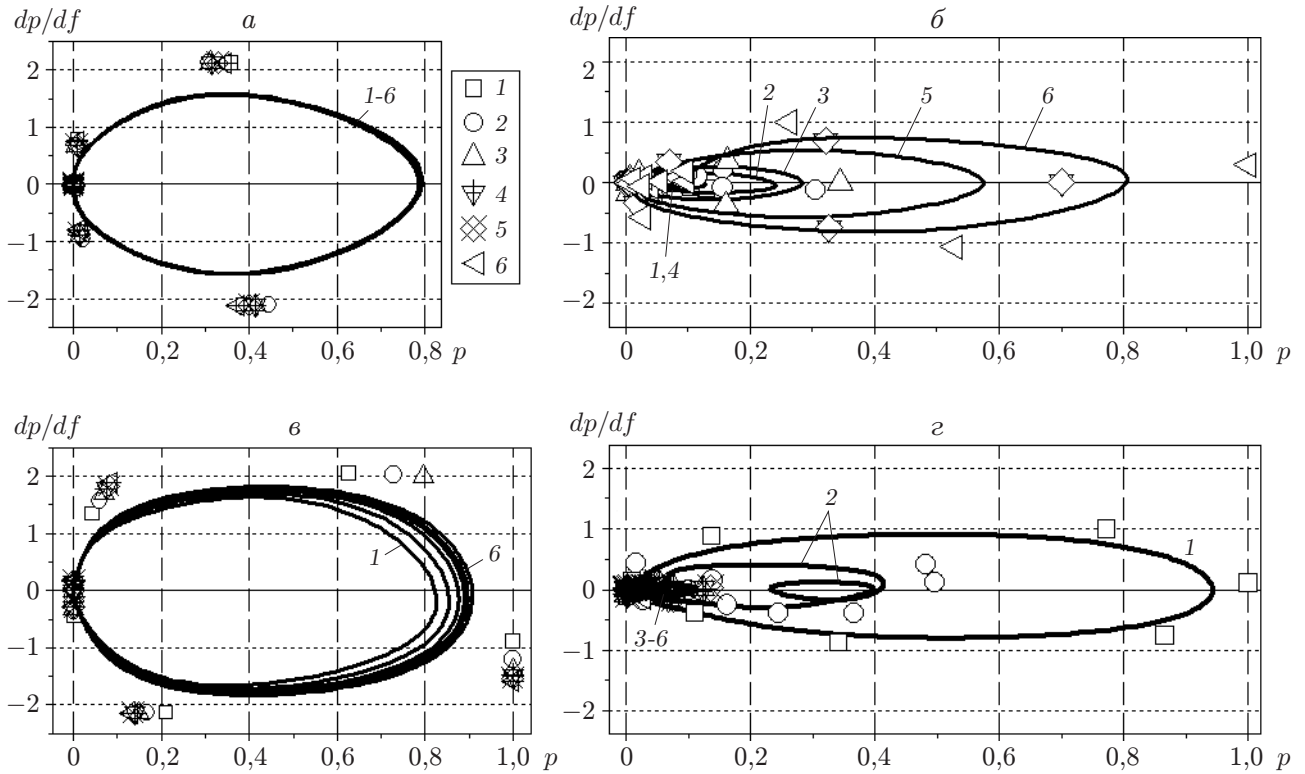


Рис. 3. Нормированные фазовые портреты линейной (а, в) и нелинейной (б, г) областей деформационных откликов макета:  
 а, б — неповрежденный макет, в, г — макет с дефектом (перемещение равно 7,5 мм);  
 остальные обозначения те же, что на рис. 1

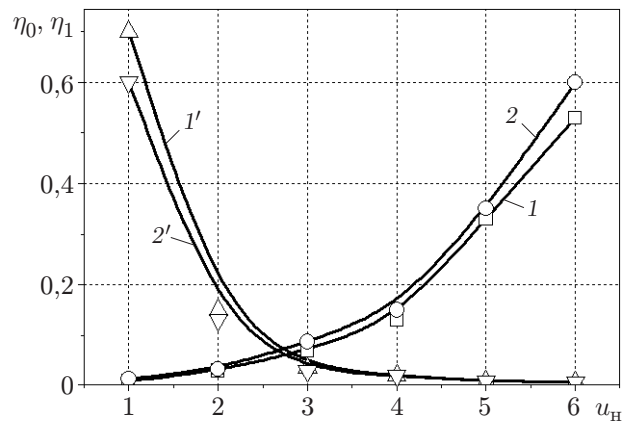


Рис. 4. Информативные параметры для оценки напряженности путем серийного ударного тестирования макета:  
 1, 2 —  $\eta_0(u_n)$  (неповрежденное состояние макета), 1', 2' —  $\eta_1(u_n)$  (поврежденное состояние); 1, 1' — первая серия ударов, 2, 2' — вторая серия ударов

путем сравнения значений параметров  $\eta_1(u)$  и  $\eta_0(u)$  или установления факта превышения порогового значения  $\eta_1(u) = 0,1$  при значениях нормированного импульса удара  $u_H(\alpha) = 1,0 \div 2,5$ .

Установлено, что в поврежденном состоянии макета с увеличением силы удара зависимость  $\eta_1(u)$  убывает до нуля. По-видимому, это обусловлено диссипацией энергии деформации.

Таким образом, можно предположить, что в сложной конструкции с жесткими связями перераспределение ее напряженного состояния происходит вплоть до момента начала текучести материала (см. рис. 4).

**Заключение.** В результате ударного тестирования, анализа и выбора линейных и нелинейных областей деформационных откликов и построения фазовых портретов макета свободно подвешенной стержневой конструкции установлено, что показателями различия состояний конструкции являются наличие хотя бы одной нелинейной области и значение отношения площадей нелинейной и линейной областей фазового портрета.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **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. V. 67. P. 16–29.
2. **Virgin L. N., Plaut R. H.** Use of frequency data to predict secondary bifurcation // *J. Sound Vibrat.* 2002. V. 51. P. 919–926.
3. **Вассерман И. Н., Шардаков И. Н.** Постановка и решение упругих динамических задач для стержневых систем с граничными условиями, описываемыми многозначными соотношениями // *ПМТФ*. 2003. Т. 44, № 3. С. 124–135.
4. **Nichols J. M., Todd M. D., Virgin L. N.** Structural health monitoring through chaotic interrogation // *Mechanica*. 2003. V. 38. P. 239–250.
5. **Казаков В. В.** Ультразвуковые фазовые и модуляционные средства измерения для неразрушающего контроля материалов и конструкций: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Н. Новгород: Нижегород. гос. техн. ун-т, 2008.
6. **Есипов Ю. В., Мухортов В. М., Калинин В. В.** Испытательная установка для анализа деформации моделей трехмерных конструкций // *Измер. техника*. 2008. № 10. С. 15–24.
7. **Есипов Ю. В., Мухортов В. М.** Интегральные датчики динамической деформации на основе тонких сегнетоэлектрических пленок для мониторинга сложных механических систем // *Журн. техн. физики*. 2009. Т. 51, № 1. С. 78–81.
8. **Мухортов В. М., Бирюков С. В., Масычев С. И. и др.** Гетероструктуры на основе наноразмерных сегнетоэлектрических пленок: получение, свойства и применение // *Нанотехника*. 2007. Т. 3, № 11. С. 59–72.
9. **Есипов Ю. В., Мухортов В. М., Пойда И. И.** Оценка вида состояния стержневых элементов конструкций на основе регистрации деформационных откликов на серийные ударные возбуждения // *Дефектоскопия*. 2010. Т. 46, вып. 7. С. 76–81.
10. **Есипов Ю. В., Сазанов С. Н., Калиенко С. В., Узунян А. М.** Экспериментальная идентификация напряженного состояния элементов стержневых конструкций // *Измер. техника*. 2010. № 12. С. 32–35.

*Поступила в редакцию 18/II 2009 г.,  
в окончательном варианте — 20/IV 2012 г.*