

## Методы измерений, контроля, диагностики

УДК 629.7

### МЕТОД ВИБРОДИАГНОСТИКИ ДЕФЕКТОВ УПРУГИХ КОНСТРУКЦИЙ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА СОБСТВЕННЫХ ФОРМ КОЛЕБАНИЙ

Косицын А.В.

Военная академия Республики Беларусь, г. Минск, Республика Беларусь

*Работа посвящена аналитическим методам вибродиагностики зарождающихся дефектов в среде ANSYS. Предложен критерий оценки технического состояния упругих конструкций. В качестве диагностического признака обнаружения дефектов в материале упругого тела предлагается использовать собственные формы колебаний с различными параметрами наблюдения. Для проверки эффективности данного способа проведен численный эксперимент на примере плоской пластины. (E-mail: liepa4@mail.ru)*

**Ключевые слова:** собственные формы колебаний, амплитудные функции, собственные частоты колебаний.

#### Введение

Основными характеристиками собственных колебаний конструкций (модальными параметрами) являются собственные частоты колебаний, собственные формы колебаний и коэффициенты демпфирования. Собственные формы колебаний упругого тела определяются с точностью до постоянного множителя. При определении собственной формы колебаний можно условно принять, что значение этой формы (т. е. значение параметра наблюдения при колебаниях конструкции по заданной форме) в некоторой базовой точке  $B_i$  конструкции равно единице. Тогда значение собственной формы колебаний конструкции в любой другой точке  $B_j$  равно отношению значения параметра наблюдения в точке  $B_j$  при колебаниях конструкции по данной форме к значению параметра наблюдения в точке  $B_i$ .

Известен способ обнаружения дефектов в материале упругой конструкции, при котором возбуждают колебания эталонной и исследуемой конструкций, выбирают несколько форм колебаний, измеряют для этих форм резонансные частоты колебаний конструкций, а о возникновении дефекта судят по разности значений резонансных частот эталонной и исследуемой конструкций [1].

Недостатком данного способа является то, что резонансная частота колебаний является интегральной характеристикой упругой конструкции, т. е. характеризует конструкцию в целом, а не отдельные ее точки, и по измене-

нию резонансной частоты можно судить о возникновении дефекта, но невозможно определить место его возникновения. Кроме того, с развитием дефекта резонансная частота изменяется медленно. Все это ведет к низкой надежности обнаружения дефекта в материале упругой конструкции.

Также известен способ обнаружения дефектов в материале упругой конструкции, при котором возбуждают колебания эталонной и исследуемой конструкции, выбирают несколько собственных форм колебаний, на выбранных формах колебаний определяют один из параметров наблюдения для эталонной и исследуемой конструкции в точке наблюдения. В качестве диагностического признака используют эквивалентные массы [2].

Согласно этому способу измеряют коэффициенты внутреннего трения, действительную часть динамической податливости на частотах возбуждения, статическую податливость и определяют эквивалентные массы.

К недостаткам способа можно отнести то, что для определения эквивалентных масс необходимо измерение динамической податливости конструкции. Процедура таких измерений включает в себя измерение не только величины амплитуды изменения параметра наблюдения (виброперемещения, виброскорости, виброускорения, вибронапряжения), но и величины возбуждающего воздействия, что часто является невозможным по различным причинам, в частности из-за недоступности необходимых мест установки датчиков.

В данной статье решается задача использования при обнаружении дефектов в материале упругого тела в качестве диагностического признака параметра, для вычисления которого не требуется измерения динамической податливости детали, а следовательно, и величины возбуждающего воздействия.

### Выбор параметров метода вибродиагностики

Эффективность использования собственных форм колебаний детали в качестве диагностического признака метода вибродиагностики возникновения и развития дефекта в материале зависит от нескольких факторов. В качестве критерия этой эффективности можно принять величины относительных изменений собственных форм колебаний детали в процессе зарождения дефекта. Величина относительного изменения собственных форм колебаний, как и самих собственных форм (амплитудных функций)  $\bar{X}_k = \frac{X_k(B_j)}{X_k(B_i)}$ , зависит от следующих

параметров:

- номера формы колебаний  $k$ ;
- параметра наблюдения  $X$ ;
- мест расположения точек наблюдения  $B_i$  и  $B_j$ .

Максимальная эффективность использования собственных форм колебаний детали в качестве диагностического признака метода вибродиагностики достигается нужным сочетанием указанных выше параметров. Выбор этих параметров производится индивидуально для каждой детали, исходя не только из ее геометрических характеристик и упругих свойств, но также из условий ее функционирования в составе изделия.

Процедуру выбора каждого из трех параметров для обеспечения максимальной эффективности предлагаемого метода вибродиагностики продемонстрируем на примере плоской пластины. При выборе необходимых параметров следует придерживаться следующих рекомендаций.

Номер  $k$ -й формы колебаний выбирается таким образом, чтобы одна из узловых линий формы была расположена вблизи дефекта. Для получения большого числа возможных мест расположения узловых линий число рассматриваемых форм колебаний следует выбирать максимально большим. Однако необходимо иметь в виду, что выбор числа возбуждаемых форм

колебаний ограничивается мощностью вибростенда, а также возможностью виброизмерительной аппаратуры. Если при использовании данного метода вибродиагностики узловая линия выбранной формы колебаний будет удалена от места расположения дефекта, то эффективность метода несколько снижается. Однако даже в этом случае использование метода дает удовлетворительные результаты. В приведенном здесь примере использование двух форм колебаний позволяет надежно распознать дефект на стадии его зарождения.

Выбор параметра наблюдения ограничивается возможностью имеющейся виброизмерительной аппаратуры. Желательно, чтобы при диагностировании детали использовались различные параметры наблюдения. Это увеличивает число мест расположения узловых линий собственных форм колебаний, так как с изменением параметра наблюдения положение узловых линий также меняется.

Для наибольшей эффективности использования метода одна из точек наблюдения  $B_j$  выбирается вблизи узловой линии детали.

### Определение собственных частот конструкции

Простая форма образца позволяет не только рассмотреть большое число вариантов, но и сравнить некоторые результаты расчетов в компьютерном комплексе ANSYS с результатами упрощенных расчетов на основе теории поперечных колебаний стержней. В упрощенных расчетах принимаем, что колебаниям подвергается прямоугольная пластина длиной 192 мм, шириной 22 мм и толщиной 2,9 мм. Образец выполнен из алюминиевого сплава, модуль Юнга  $E = 6,9 \cdot 10^{10}$  Па, плотность  $\rho = 2700$  кг/м<sup>3</sup>, коэффициент Пуассона  $\mu = 0,33$ . За широкую часть образец закрепляется на вибростенде.

Из теории поперечных колебаний стержней следует, что собственные частоты колебаний консольно-закрепленного стержня определяются выражениями [3]:

$$\omega_k = \frac{\sigma^2 p_k^2}{l^2}, \quad \sigma^4 = \frac{EI}{cS},$$

$$p_1 = 1,875; \quad p_2 = 4,694,$$

где  $I$  – момент инерции поперечного сечения;  $S$  – площадь поперечного сечения.

Частоты колебаний стержня определяются по формуле:

$$n_k = \frac{\pi k}{2p}, \text{ Гц.}$$

В нашем случае  $I = 4,47132 \cdot 10^{-11} \text{ м}^4$ ;  
 $S = 6,38 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$ .

После вычислений получаем:

$$\omega_1 = 403,595 \text{ с}^{-1}, \nu_1 = 64,267 \text{ Гц};$$

$$\omega_2 = 2529,469 \text{ с}^{-1}, \nu_2 = 402,782 \text{ Гц.}$$

На основе комплекса ANSYS была построена конечно-элементная модель пластины (рисунок 1). В качестве параметров наблюдения использовались виброперемещения и вибронпряжения для узлов, расположенных вдоль рабочей части. Узлы расположены по длине образца равномерно, на расстоянии 4,5 мм друг от друга, количество выбранных узлов (точек наблюдения) – 39.

По результатам модального анализа рассчитаны частоты (таблица 1) и первые две формы собственных колебаний (рисунок 2).

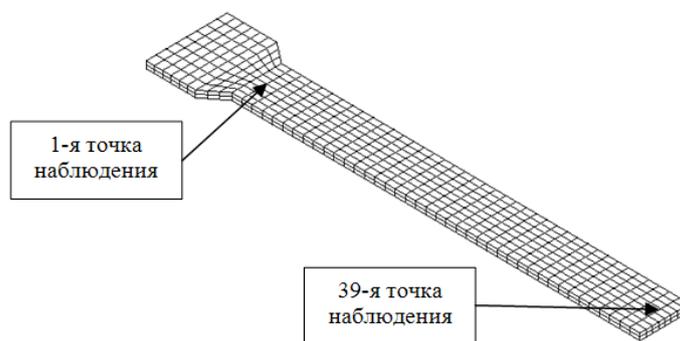


Рисунок 1 – Конечно-элементная модель образца (модель 1)

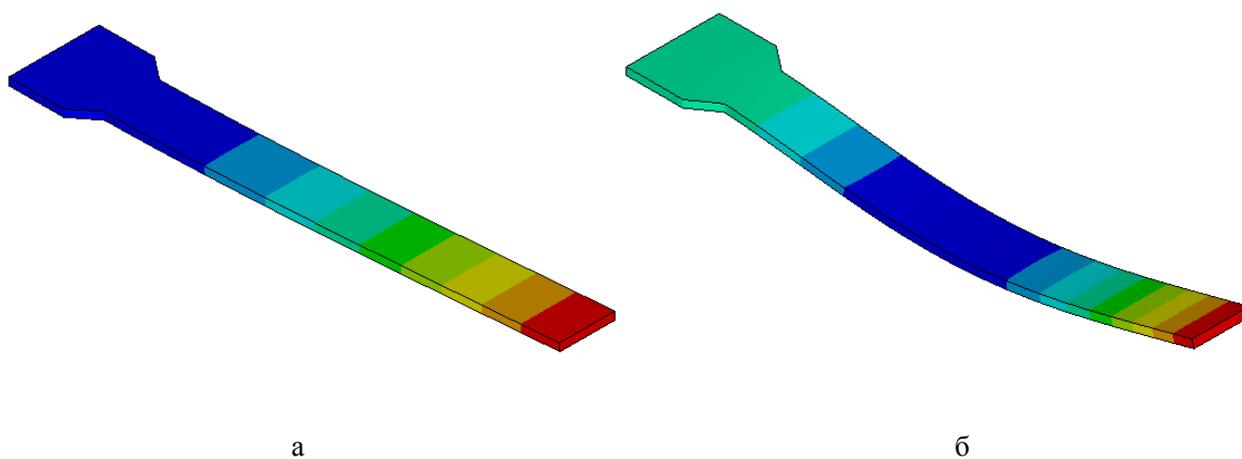


Рисунок 2 – Первая (а) и вторая (б) формы собственных колебаний пластины

Таблица 1 – Собственные частоты колебаний образца (Гц), полученные различными способами

Номер формы колебаний	Модель ANSYS	Теория колебаний стержней	
		Частоты	Отличие, %
1	65,42	64,27	1,76
2	408,96	402,78	1,51

Из таблицы 1 видно, что точность вычислений собственных частот колебаний образца является вполне удовлетворительной.

### Моделирование в среде ANSYS

В данной работе исследуются возможности предлагаемого метода вибродиагностики при обнаружении дефекта на стадиях его зарождения. Зарождение дефекта различной природы (усталость материала, фреттинг-износ, истирание) сопровождается уменьшением модуля упругости материала в локальной области зарождения дефекта [4, 5]. Уменьшение модуля упругости на 30 % в некотором объеме упругого тела влечет за собой возникновение трещины в данной области. Моделирование дефекта упругого тела на разных стадиях его развития можно осуществить при помощи вычислительного комплекса ANSYS путем создания конечно-элементной модели тела, в которой модуль упругости материала уменьшен в зоне возникновения предполагаемого дефекта. В статье рассмотрены 4 модели образца с предполагаемым дефектом на разных стадиях его развития и расположенным в разных местах тела. На рисунке 3 показаны конечно-элементные модели образца (модели 2–4), в которых все элементы имеют одинаковый модуль упругости  $E_0$ , за исключением нескольких слоев. Ширина каждого слоя составляет около 4,5 мм.

Черным цветом показаны слои с модулем упругости  $0,7E_0$ , серым цветом выделены слои с модулем  $0,85E_0$ . В моделях 2–4 зоны наиболее вероятного возникновения дефекта с модулем упругости  $0,7E_0$  составляют соответственно 2,4 %, 12 % и 14 %. В моделях 2, 3 зарождающийся дефект расположен вблизи заделки, в модели 4 – на конце образца.

Эффективность предложенного метода будем сравнивать с эффективностью широко используемого в настоящее время метода вибродиагностики возникновения дефекта, в котором в качестве диагностического признака рассматриваются собственные частоты колебаний диагностируемого упругого тела. Собственные частоты также изменяются с возникновением дефекта в материале. Однако собственные частоты колебаний являются характеристикой упругого тела в целом, в то время как собственные формы колебаний зависят от положения точек, в которых они определяются. Это обстоятельство обеспечивает преимущество использования диагностического признака «собственные формы колебаний» по сравнению с признаком «собственные частоты колебаний тела». В таблице 2 показано изменение собственных частот колебаний образца с различным расположением дефектов, которые отражены на рисунке 3. Изменение представлено в процентах по отношению к собственным частотам колебаний образца без дефекта.

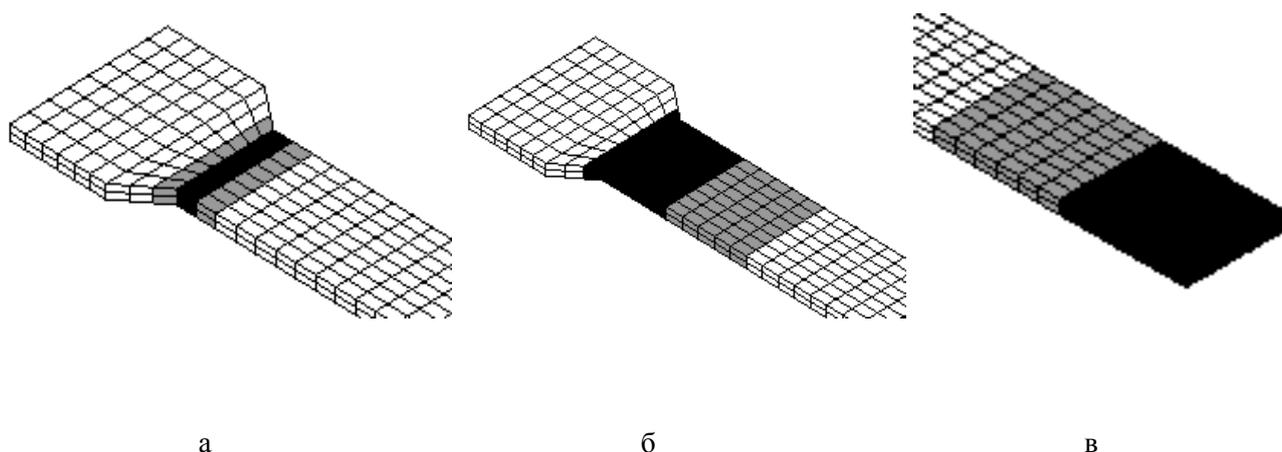


Рисунок 3 – Конечно-элементные модели образца с различными дефектами: а – модель 2; б – модель 3; в – модель 4

Таблица 2 – Собственные частоты колебаний образца при наличии и отсутствии дефекта

Номер модели	Первая частота		Вторая частота	
	Значение, Гц	Изменение, %	Значение, Гц	Изменение, %
1 (дефект отсутствует)	65,42	–	408,96	–
2	63,71	2,61	402,96	1,47
3	60,07	8,18	397,53	2,79
4	65,40	0,03	406,14	0,69

Из таблицы 2 видно, что собственные частоты колебаний образца уменьшаются при появлении дефектов. Поскольку здесь рассматривается дефект на ранней стадии своего развития, то это изменение не является значительным, что подтверждает недостаточную информативность модального параметра «собственная частота» колебаний для диагностики повреждаемости данного образца. При использовании метода вибродиагностики для обнаружения возникающего дефекта упругого тела можно считать дефект обнаруженным, если величина, рассматриваемая в качестве диагностического признака данного метода, существенно изменяет свое значение. Величины изменений диагностического признака, при которых можно утверждать, что деталь имеет дефект, зависит, очевидно, от тяжести последствий возможной ошибки при принятии решения о наличии дефекта. Для каждой детали эти величины необходимо назначать отдельно. Будем считать, например, что величины указанных изменений диагностического признака должны быть большими или равными 15 %. Результаты расчетов, представленные в таблице 2, показывают, что использование собственных частот колебаний упругого тела в качестве диагностического признака метода вибродиагностики не позволяют обнаружить дефект на ранней стадии его развития. Ни один из дефектов, представленных на рисунке 3, не изменяет собственные частоты колебаний более чем на 8,2 %.

Далее было определено изменение значений амплитудных функций в процентах по отношению к исходному состоянию:

$$\Delta \bar{X}_k(B_{j1}) = \left| \frac{\bar{X}_{k0}(B_{j1}) - \bar{X}_k(B_{j1})}{\bar{X}_{k0}(B_{j1})} \right| \cdot 100\%, \quad (1)$$

где  $\bar{X}_{k0}(B_{j1})$ ,  $\bar{X}_k(B_{j1})$  – амплитудные функции  $j$ -й точки наблюдения образца без дефекта и с дефектом соответственно по отношению к первой точке при параметрах наблюдения виброперемещение и вибронапряжение,  $k = 1, 2$ .

На рисунках 4–7 показаны графики зависимости изменения собственных форм колебаний по длине образца.

Анализ рисунков 4–7 при учете принятых критериев, согласно которых признается факт наличия дефекта (15-процентное изменение собственной формы колебаний объекта контроля) позволяет ответить на вопрос о возможности надежного распознавания каждого из развивающихся дефектов, описываемых моделями 2–4. Такой анализ позволяет также указать номер собственной формы колебаний и места расположения точек наблюдения, использование которых наиболее эффективно при вибродиагностике дефектов предложенным методом.

Результаты расчетов показывают, что предложенный метод вибродиагностики позволяет надежно распознавать дефекты, представленные на рисунке 3. Использование предлагаемого метода вибродиагностики является наиболее эффективным в том случае, если одна из точек наблюдения упругого тела выбрана вблизи узловых линий формы колебаний детали (амплитуда в этих точках колеблется около нуля). У рассматриваемого образца без дефекта (модель 1) амплитудные функции  $\bar{X}_2^y$  и  $\bar{X}_2^y$  обращаются в нуль в точках  $x = 0,17$  и  $x = 0,06$  м соответственно. Заметим также, что эффективность предлагаемого метода повышается, если параметр наблюдения выбирается вблизи возникающего дефекта.

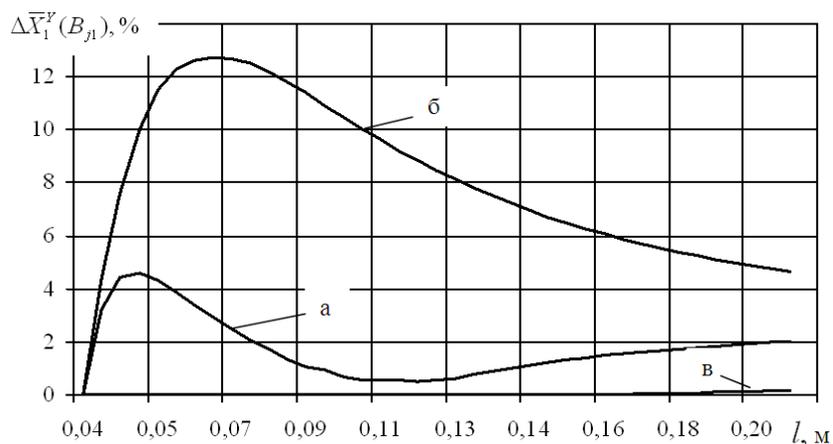


Рисунок 4 – Изменение первой формы колебаний образца при параметре наблюдения – виброперемещение: а – модель 2; б – модель 3; в – модель 4

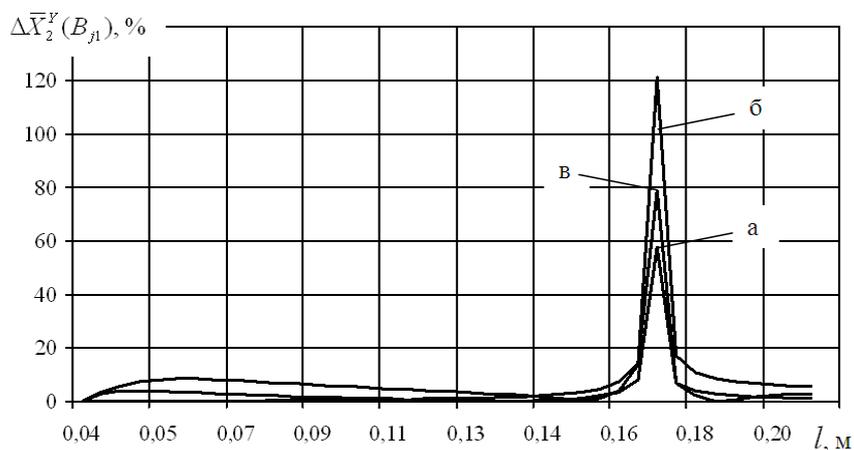


Рисунок 5 – Изменение второй формы колебаний образца при параметре наблюдения – виброперемещение: а – модель 2; б – модель 3; в – модель 4

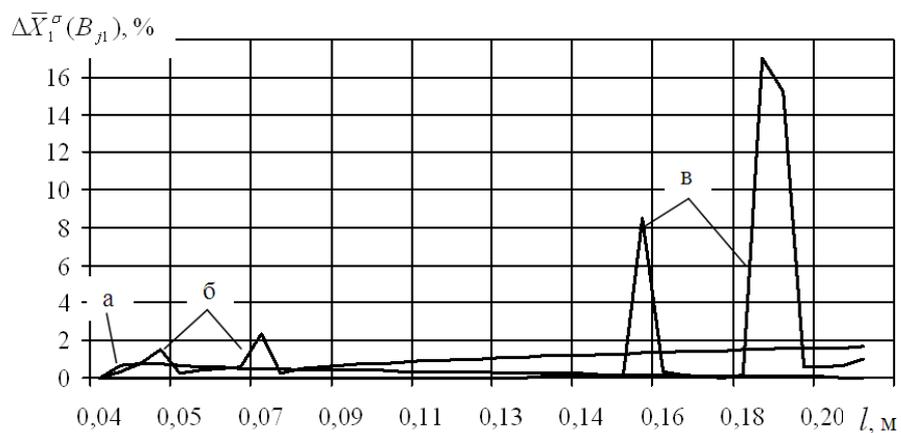


Рисунок 6 – Изменение первой формы колебаний образца при параметре наблюдения – вибронапряжение: а – модель 2; б – модель 3; в – модель 4

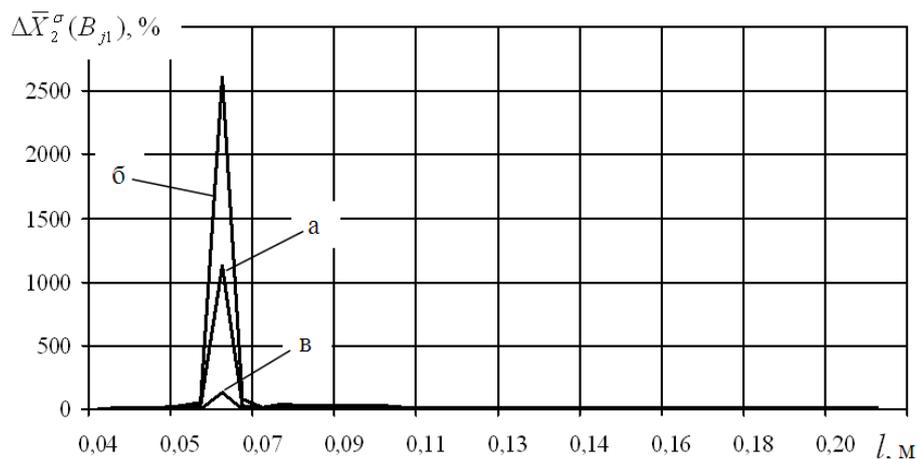


Рисунок 7 – Изменение второй формы колебаний образца при параметре наблюдения – вибронпряжении: а – модель 2; б – модель 3; в – модель 4

### Заключение

На основе математического моделирования возникновения и развития дефектов в плоском образце разработан критерий оценки его технического состояния по результатам вычисления собственных форм колебаний.

На конкретном примере подробно описана компьютерная технология выбора точек наблюдения, параметров наблюдения, при которых использование собственных форм колебаний, как диагностического признака метода вибродиагностики, является наиболее эффективным.

Предложена технология оценки эффективности применения собственных форм колебаний в качестве диагностического признака при вибродиагностике рассматриваемой детали в зависимости от места расположения дефекта. Технология позволяет исключить дорогостоящие натурные эксперименты по выполнению таких оценок.

### Список использованных источников

1. Алешин, Н.П. Методы акустического контроля металлов / Н. П. Алешин [и др.]. – М. : Машиностроение, 1989. – 455 с.
2. Вернигор, В.Н. Модальный анализ механических колебаний упругих систем / В.Н. Вернигор, А.Л. Михайлов. – Рыбинск : НПО «Сатурн» ; РГАТА, 2001. – 288 с.
3. Бидерман, В.Л. Теория механических колебаний / В.Л. Бидерман. – М. : Высшая школа, 1980. – 408 с.
4. Драпкин, Б.М. О некоторых физических проблемах упрочнения металлических материалов / Б.М. Драпкин, В.К. Кононенко, Б.Н. Леонов // Инженерный журнал. – 1999. – № 9. – С. 10.
5. Драпкин, Б.М. Оценка повреждаемости материалов в процессе усталостного нагружения по изменению их упругих и релаксационных характеристик / Б.М. Драпкин, Н.В. Осадчий // Новые технологические процессы и надежность ГТД. – М. : ЦИАМ, 2001. – Вып. 4. – С.159–165.

Kositsyn A.V.

### Method of the vibrating diagnostics of defects of elastic designs on the basis of the analysis own forms of fluctuations

Work is devoted analytical methods of the vibrating diagnostics arising defects in the environment of ANSYS. The criterion of an estimation of a technical condition of elastic designs is offered. As a diagnostic sign of detection of defects in a material of an elastic body it is offered to use own forms of fluctuations with various parameters of supervision. For check of efficiency of the given way numerical experiment on an example of a flat plate is made. (E-mail: liepa4@mail.ru)

**Key Words:** own forms of fluctuations, peak functions, own frequencies of fluctuations.

Поступила в редакцию 26.10.2011.