

Ю. В. Ваньков, Р. Б. Казаков, Э. Р. Яковлева

Россия, 420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51, КГЭУ

e-mail: [vankov@mi.ru](mailto:vankov@mi.ru)

## Собственные частоты изделия как информативный признак наличия дефектов

Получена 03.01.2003, опубликована 17.02.2003

В статье рассматривается возможность применения акустического метода свободных колебаний к диагностике стержней. Обсуждаются результаты расчетов методом конечных элементов частот колебаний дефектных и бездефектных стержней. Предложен способ определения дефекта в стержне по анализу его спектра собственных частот.

### ВВЕДЕНИЕ

В последние годы на предприятиях промышленности наблюдается интенсивное старение оборудования. Закупка новых образцов техники проводится редко из-за высокой их стоимости и недостатка денежных средств. Для обеспечения надежности функционирования оборудования производится поиск новых технологий неразрушающего контроля в целях перехода к эксплуатации техники по техническому состоянию.

Известны различные методы неразрушающего контроля (НК): магнитные, капиллярные, вихретоковые, акустические, радиационные, оптические. Различные методы НК не заменяют, а лишь дополняют друг друга. Каждый из них имеет свою, характерную для данного метода, область применения. Возможность их использования зависит от ряда требований, одним из основных является обеспечение свободного доступа к контролируемому месту изделия.

Методы контроля, основанные на измерении частот собственных колебаний, имеют достаточно широкое распространение для определения физико-механических свойств различного рода материалов и изделий. В их основу положено наличие зависимостей между упругими константами материала изделия и такими его свойствами как твердость, пористость, прочность и т. п. [1–4].

На практике большой интерес представляют колебания стержней при различной их заделке. Такие системы широко используются в технике (различные валы, оси колесных пар железнодорожных вагонов и т. п.). При развитии в них дефектов частоты колебаний изменяются, что можно использовать как информативный признак наличия дефекта.

## 1. АНАЛИЗ ПРОБЛЕМЫ

В теории колебаний стержни описываются дифференциальным уравнением четвертой степени. Частоты колебаний определяются по этим уравнениям с удовлетворительной точностью только для низших форм колебаний. Физико-механические свойства материала стержня обычно характеризуются константами  $E$  и  $G$ . Появление и накопление усталостных повреждений стержня делает эти величины переменными во времени. При введении переменных во времени коэффициентов аналитическое решение известных уравнений становится невозможным. Таким образом, традиционные методы, предполагающие строгое теоретическое обоснование, с успехом применяются лишь для ограниченного класса задач и особых условий нагрузки.

В большинстве конкретных случаев ситуация бывает далеко не такой простой и очевидной. Во время эксплуатации дефект может появиться в разных местах стержня, следовательно, с целью определения технического состояния изделия важно уметь рассчитывать его частоты колебаний при разном закреплении, а так же размерах и местоположении трещины.

Для решения поставленной задачи нами был выбран метод конечных элементов (МКЭ), являющийся мощным современным средством решения задач математической физики, ориентированным на эффективное использование ПЭВМ. МКЭ позволяет исследователю успешно решать задачи расчета сложных деталей путем разбиения их на более мелкие части — конечные элементы, жесткостные свойства каждого из которых рассматриваются независимо от остальных. На границах между конечными элементами выбираются некоторые точки — узлы; перемещения узлов в направлении координатных осей принимаются в качестве неизвестных. Таким образом, исследуемое тело можно рассматривать как дискретную систему, т. е. совокупность элементов, соединенных между собой в узловых точках.

Расчеты проводились при помощи полностью оригинального программного обеспечения, созданного в Казанском государственном университете, на компьютерах класса Pentium III [5].

Объектом исследований являлись цилиндрические стержни, установленные на специальные опоры. Задача состояла в определении сдвига частот и изменений форм колебаний при наличии трещин в стержне в поперечном направлении. Дефекты имитировались как разрезы различной формы со свободными краями, плоскости которых совпадают с плоскостями конечных элементов. Варьируя размерами сетки, удается моделировать с различной степенью точности протяженность и глубину трещин при заданных их положениях.

В качестве примера в таблице 1 приведены некоторые формы и частоты колебаний стержня с дефектом, полученные на одной из используемых сеток конечных элементов.


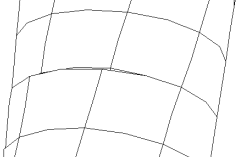
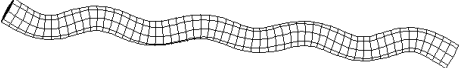
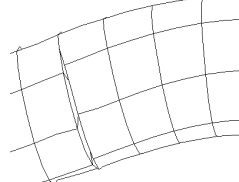

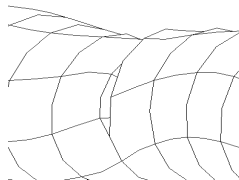
В результате математического моделирования установлено:

1. Наличие дефектов в детали приводит к изменению спектра частот колебаний.
2. Величина «сдвига» частот зависит от размера и местоположения дефекта в детали.

3. Если дефект находится в «пучности» колебаний, то соответствующая частота сдвигается на «максимальную» для данного размера дефекта величину.
4. Нахождение дефекта в «узле» колебаний не приводит к сдвигу соответствующей частоты.
5. Имеется зависимость изменения частотного спектра изделия в зависимости от ориентации дефекта относительно опоры.

Использование для определения спектра собственных частот изделия численных методов позволяет моделировать дефекты различного местоположения и протяженности.

Таблица 1. Формы 24, 26, 49 колебаний цилиндрического стержня с дефектом

№ формы колебаний	Внешний вид	«Поведение» дефекта
24		
26		
49		

## 2. СПОСОБ ОБНАРУЖЕНИЯ ДЕФЕКТОВ ПО АНАЛИЗУ СПЕКТРА КОЛЕБАНИЙ

Так как характер изменения спектра собственных частот контролируемого изделия зависит не только от размера дефекта, но и от его местоположения, то для принятия решения о состоянии контролируемого объекта необходимо проанализировать весь спектр собственных частот, что невозможно оперативно сделать без применения компьютера.

В качестве критерия сравнения может служить, например коэффициент корреляции спектров, для определения которого используется следующая зависимость:

$$r = \frac{\sum a_i a_{si} - (\sum a_i \sum a_{si})/n}{\sqrt{(\sum a_i^2 - (\sum a_i)^2/n) \cdot (\sum a_{si}^2 - (\sum a_{si})^2/n)}},$$

где  $a_i$  — значения амплитуд текущего спектра;  $a_{si}$  — значения амплитуд эталонного спектра (спектра бездефектного изделия);  $n$  — количество частот в спектре. Эта зависимость упрощает вычисления (при этом суммирование выполняется для значений индекса  $i$ , изменяющихся в диапазоне от 1 до  $n$ ).

В целях проверки работоспособности выбранного критерия сравнения спектров были программно сгенерированы амплитудно-временные сигналы по разработанным математическим моделям колебаний стержней. На рис. 1–3 показаны амплитудно-временной сигнал стержня, спектры бездефектного и дефектного стержней, результаты сравнения спектров бездефектного и дефектных стержней по коэффициенту корреляции.

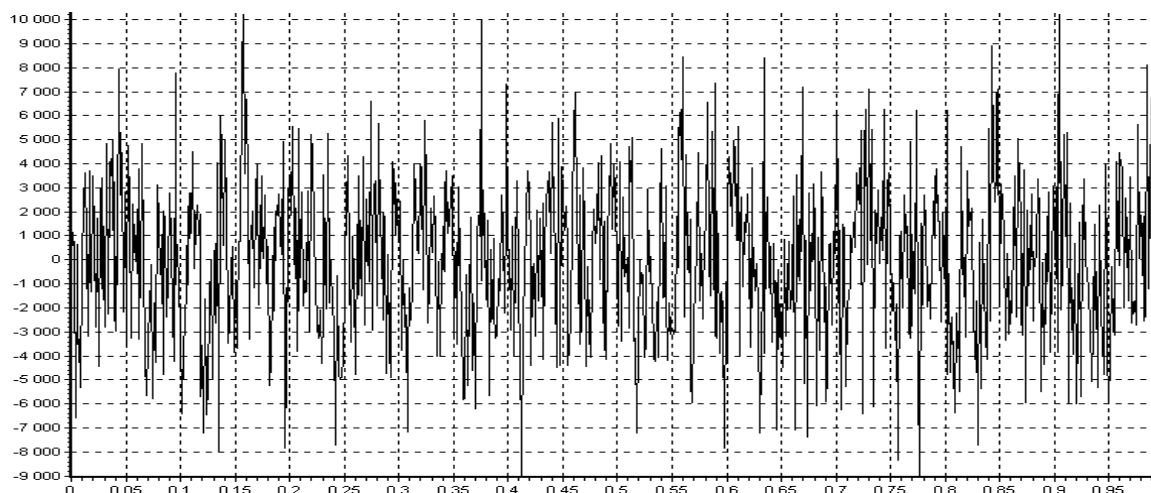


Рис. 1. Сгенерированный сигнал колебаний стержня

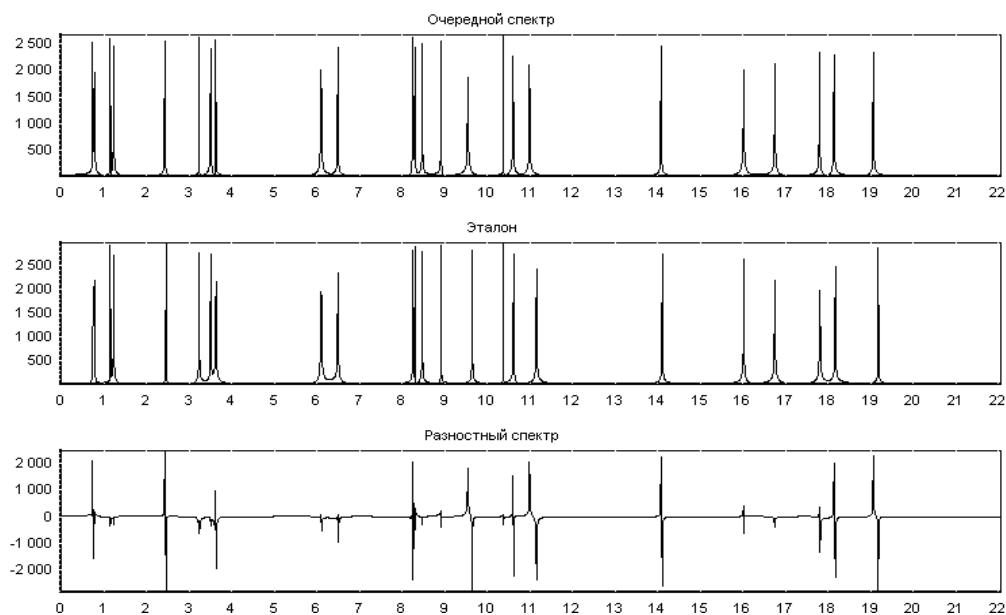


Рис. 2. Сверху вниз: спектр стержня с дефектом глубиной 3,7 мм; спектр бездефектного стержня; разностный спектр (бездефектный – дефектный). По оси абсцисс отложена частота в кГц, по оси ординат — амплитуда в единицах АЦП

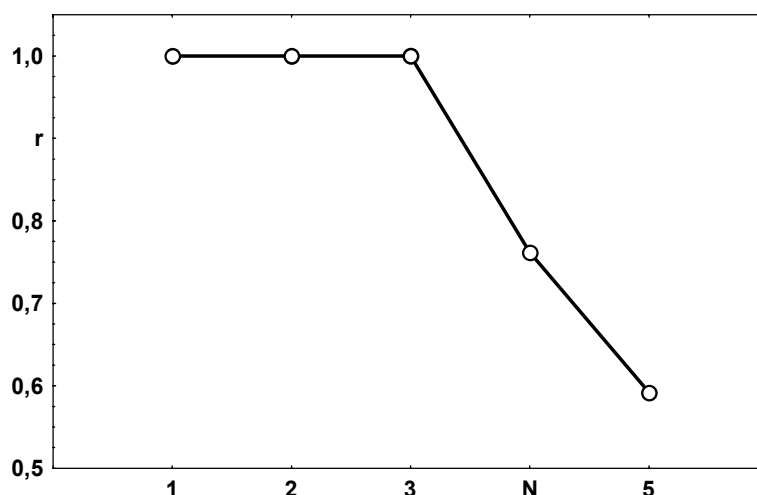


Рис. 3. Результаты обработки смоделированных сигналов:

- 1–3 — характеристики сгенерированных сигналов бездефектного стержня с уровнями гармоник 29, 30, 31 дБ,  
 4–5 — характеристики сигналов дефектных стержней: 4 — дефект стержня 3,7 мм,  
 5 — дефект стержня 4,5 мм (амплитуда составляющих 30 дБ)

### 3. ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРА ДЕФЕКТА НА ИЗМЕНЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА КОРРЕЛЯЦИИ СПЕКТРОВ

Высокие требования к достоверности проведения экспериментальных измерений накладывают жесткие требования к условиям проведения эксперимента, таким как

- необходимость однообразной укладки исследуемого изделия на измерительный стенд,
- постоянство силы и точки приложения возбуждающей силы.

Соблюдение этих требований реализовано в конструктивных особенностях экспериментальных установок. Свободные колебания в исследуемых стержнях возбуждались путем нанесения нормированного удара по центру стержня. При проведении экспериментов контроль постоянства параметров проводился путем многократного повторения измерений акустических характеристик одного и того же изделия с неизменными условиями измерений.

Измерения проводились следующим образом.

1. Исследуемый стержень однотипно укладывается на опоры.
2. По стержню наносится нормированный удар электромеханическим ударником.
3. Микрофон фиксирует колебания изделия, которые передаются посредством 16 разрядного АЦП в ПЭВМ.
4. Из записанного сигнала алгоритмом БПФ формируется спектр, который сравнивается с эталонным спектром, сформированным по результатам экспериментов с бездефектными стержнями.

Результаты обработки измерений бездефектных стержней приведены на рис. 4.

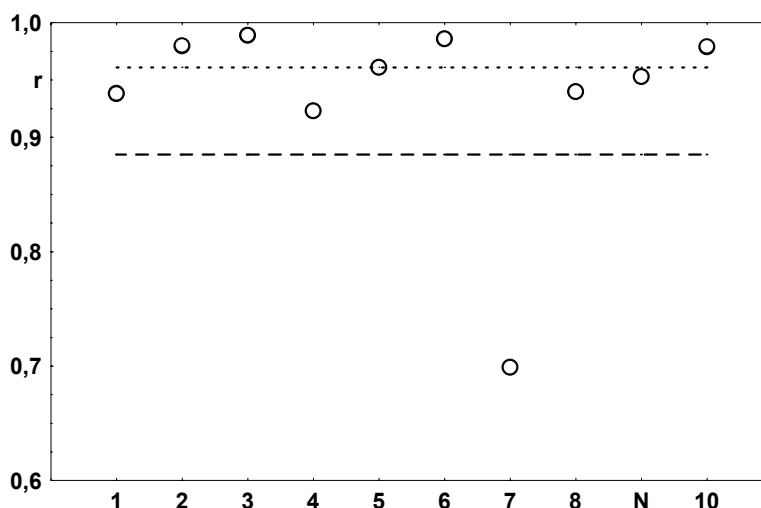


Рис. 4. Изменение коэффициента корреляции спектров бездефектных стержней.  $r$  — значение коэффициента корреляции, при сравнении каждого текущего спектра с эталоном, сформированным по 10 спектрам;  $N$  — номер эксперимента. Мелкий пунктир — оценка положения коэффициента корреляции спектров (0,961); крупный пунктир — нижняя граница доверительного интервала (0,885), при уровне значимости  $P=0,95$

С целью определения изменения коэффициента корреляции спектров при увеличении дефекта в изделии проводились исследования стержней с дефектами в виде пропила глубиной 1, 3, 4, 5 мм в средней части стержня, что составляет соответственно 2,6; 12,9; 19,6; 26,9 процентов от поперечного сечения стержня. С каждым видом дефекта проводилось по десять измерений акустических характеристик.

Сравнение спектров проводилось следующим образом:

1. Формировался эталонный спектр по десяти спектрам бездефектного стержня.
2. По результатам сравнения параметров эталонного спектра и спектров бездефектного стержня определялись доверительные интервалы с уровнем значимости  $P=0,95$ .
3. С полученным эталоном сравнивались усредненные спектры стержней с разной глубиной пропила.

Данные, полученные в результате обработки экспериментов, приведены на рис. 5 (по оси абсцисс отмечены номера экспериментов, а по оси ординат — значения коэффициента корреляции спектров).

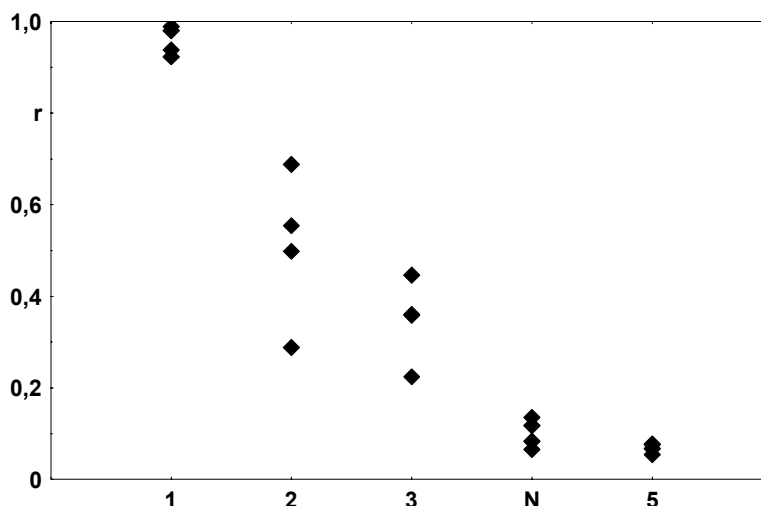


Рис. 5. Изменение коэффициента корреляции спектров.

1 — бездефектный стержень, 2 — глубина пропила 1 мм, 3 — глубина пропила 3 мм, 4 — глубина пропила 4 мм, 5 — глубина пропила 5 мм

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Из анализа графиков, приведенных на рис. 3 и рис. 5, следует, что теоретические результаты моделирования колебаний изделий с дефектами позволяют определить информативные параметры наличия дефектов в изделиях по анализу частотного спектра колебаний.
2. Из графика на рис. 5 следует, что, сравнивая спектры колебаний по коэффициенту корреляции, можно обнаруживать дефекты типа трещина площадью 1–1,5% от поперечного сечения стержня.
3. Результаты проведенной работы показали, что использование современных ПЭВМ для математического моделирования колебаний изделий сложной формы и последующего анализа спектра колебаний могут сделать метод свободных колебаний перспективным для проведения «экспресс» контроля материалов и изделий.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий: Справочник в 2 кн. под ред. В. В. Клюева. М.: Машиностроение, 1985, 326 с.
2. Алешин Н. П., Белый В. Е., Вopilкин А. Х. и др. Методы акустического контроля металлов. М.: Машиностроение, 1989, 456 с.
3. Глаговский Б. А., Москобенко И. Б. Низкочастотные акустические методы контроля в машиностроении. Л.: Машиностроение, 1977, 208 с.
4. Ланге Ю. В. Акустические низкочастотные методы неразрушающего контроля многослойных конструкций. М.: Машиностроение, 1991, 272 с.
5. Голованов А. И., Бережной Д. В. Метод конечных элементов в механике деформируемых твердых тел. Казань: Издательство «ДАС», 2001, 300 с.