

УДК 620.178.3.5:624.042.7

СПЕКТРАЛЬНЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДЕКРЕМЕНТОВ МЕХАНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ДИНАМИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ

© Г. В. Встовский, П. С. Казновский, А. П. Казновский¹

Статья поступила 6 ноября 2007 г.

Показано, что при резонансных колебаниях высокий уровень деформаций приводит либо к разрушению конструкции, либо к усталостному повреждению материалов. Для оценки сейсмостойкости необходимо знание частот собственных колебаний конструкций и их коэффициентов демпфирования (декрементов). Приведен анализ возможностей и ограничений спектрального метода определения декрементов колебаний. Для надежного определения декрементов, помимо Фурье спектра мощности, предложено использовать релаксационное сглаживание рядов с последующим прямым определением декрементов по отношению последовательных максимумов, отсчитываемых от среднего значения. Описанный подход обеспечивает надежное определение декрементов колебаний элементов всех типов реальных конструкций и оборудования по экспериментальным акселерограммам.

Фактическое знание частот и декрементов собственных (резонансных) колебаний элементов конструкций и оборудования является основой анализа сейсмостойкости зданий и сооружений [1]. Объективная реальность увеличения сейсмической активности земной коры за последние 30 – 50 лет диктует необходимость совершенствования методов проверки и обеспечения сейсмостойкости как промышленных и гражданских объектов в целом, так и отдельных конструкций, единиц оборудования и их узлов.

Сейсмические нагрузки носят резонансный характер, чем обусловлена их исключительная потенциальная опасность. Относительно высокий уровень деформаций при резонансных колебаниях приводит либо к непосредственному разрушению элементов конструкций и оборудования, либо вызывает проявление эффектов усталостного повреждения материалов, которые трудно выявить без использования специальных методов. В атомном машиностроении накоплен огромный положительный опыт [1] обеспечения сейсмостойкости конструкций и оборудования АЭС различного назначения и разработаны соответствующие методы обследования и аттестации.

Согласно современным нормам [2 – 6], принятым для АЭС, первым этапом процедуры оценки сейсмостойкости является определение частот собственных (резонансных) колебаний конструкций (единиц оборудования) и их коэффициентов демпфирования (декрементов). Дополнительные нагрузки, обусловленные сейсмическим воздействием, определяются по декрементам на основе так называемых спектров ответа — зависимостей эффективного ускорения элемента оборудования от частоты колебаний при определенных

декрементах на соответствующей высотной отметке (рис. 1). Значения ускорений используются для вычисления дополнительных нагрузок на элементы оборудования и их сочленения на основе методов теоретической механики, например, с использованием стержневых схем с распределенными и сосредоточенными массами. Экспериментально определенные характеристики собственных колебаний являются критериями правильности расчетов.

Таким образом, знание действительных собственных частот колебаний и их декрементов в реальных условиях монтажа, раскрепления и обвязки элементов конструкций и оборудования является принципиальным для корректной оценки сейсмостойкости оборудования.

Основные методы определения собственных частот колебаний и их декрементов традиционно делятся на расчетные и экспериментальные. Первые применимы только на стадии проектирования, поскольку в принципе не могут учесть все особенности реального состояния элементов оборудования и конструкций после их монтажа. Экспериментальные методы можно

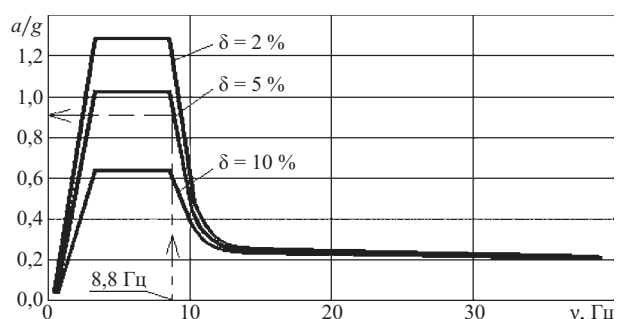


Рис. 1. Схема определения ускорения (в единицах g), обусловленного сейсмическим воздействием, для оборудования с наименьшей собственной частотой 8,8 Гц и декрементом $\delta = 5\%$

¹ Всероссийский научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт атомного энергетического машиностроения (ВНИИАМ), Москва, Россия.

разделить на несколько категорий. Лабораторные методы с использованием вибростендов не позволяют учитывать реальные условия раскрепления и обвязки испытываемых элементов. При модельных испытаниях на уменьшенных копиях оборудования и технологических систем, помимо сложных проблем выбора и обоснования надежных критериев масштабного и динамического моделирования, возникают объективные погрешности и отклонения от реальных условий. Они вызваны невозможностью строго воспроизвести и смоделировать все элементы, узлы и динамические связи сложных многокомпонентных систем, а также учесть все технологические допуски, которыми сопровождаются изготовление, сборка и монтаж реального оборудования и технологических систем. Динамические исследования при имитации сейсмических воздействий с помощью грунтовых взрывов, имея существенные преимущества перед лабораторными исследованиями, большие перспективы и широкое внедрение, обладают одним ограничением. Как по техническим возможностям, так и из условия неповреждаемости испытываемого оборудования они проводятся при слабых силовых воздействиях, на порядок и более меньших, чем реальные сейсмические воздействия при землетрясениях на уровне проектных (ПЗ), а поэтому не могут рассматриваться как метод натурной проверки сейсмостойкости оборудования. Полномасштабные испытания технологических сборок на реальные сейсмозодействия на специальных сейсмозрывных полигонах являются длительными, трудоемкими и дорогостоящими.

Оптимальными по затратам и оперативности на сегодняшний день представляются динамические неразрушающие исследования конструкций и оборудования непосредственно на пусковых и действующих объектах в реальных условиях монтажа, раскрепления и обвязки. В ходе таких испытаний записываются акселерограммы колебаний элементов в трех (и более) направлениях, соответствующих возможным модам собственных колебаний, с последующей цифровой обработкой — расчетом Фурье спектров мощности. По резонансным пикам спектров мощности определяются собственные частоты колебаний и их декременты [7, 8]. Акселерограммы снимаются и записываются с помощью уникального портативного комплекса на базе современных электронных компонентов. Такой метод будем называть спектральным. Далее проводится расчет сейсмических нагрузок и определение сейсмостойкости оборудования, а также его основных элементов на базе экспериментально определенных значений собственных динамических характеристик и поэтажных спектров ответа [1, 7 – 9]. Метод расчетно-экспериментальной проверки сейсмостойкости оборудования и технологических систем на пусковых и действующих блоках АЭС разработан и освоен во ВНИИАМ и внедрен его специалистами на многочисленных блоках АЭС в России и ряде других стран

[1, 7, 8]. Необходимо отметить, что при реальных землетрясениях имеют место сложные сочетания дополнительных повторных сейсмических воздействий и реакций зданий и сооружений, так что свободные колебания с затуханием являются упрощенной моделью, хотя и оправданной в подавляющем большинстве случаев.

Данная работа посвящена анализу возможностей и ограничений спектрального метода определения декрементов (СМОД) колебаний. Полученные результаты применимы ко всем типам оборудования и конструкций. Метод является неразрушающим, а потому не требует дополнительных технических приемов, использования образцов-свидетелей.

Как указывалось выше, СМОД состоит в получении акселерограмм и их Фурье спектров мощности. На рис. 2 приведены реальная акселерограмма и ее спектр мощности на примере приточного вентилятора тепловой защиты бетона.

В основе СМОД лежит известная теоретическая формула, связывающая относительный декремент δ_w с отношением ширины w пика квадрата модуля спектра $|F(v)|^2$ на половине высоты $\frac{1}{2}|F(v)|_{\max}^2$, или ширины пика модуля спектра $|F(v)|$ на высоте $\frac{1}{\sqrt{2}}|F(v)|_{\max}$, к удвоенной резонансной частоте v_{\max} (см. рис. 2):

$$\delta_w = \frac{w}{2v_{\max}}. \quad (1)$$

Связь ширины спектральной линии с декрементом колебаний обсуждалась в литературе (например [10, С. 330 – 348]), но в общем виде не выводилась. Ввиду ключевой значимости формулы (1) для СМОД, приведем ее вывод. Примем для затухающих колебаний синусоидальную форму

$$A(t) = A_0 \exp(-t/t_0) \exp(i2\pi v_0 t), \\ t \geq 0 \quad [A(t) = 0, t < 0]. \quad (2)$$

Преобразование Фурье функции (2) имеет вид

$$F(v) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} A(t) \exp(-i2\pi vt) dt = \\ = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{\infty} A(t) \exp(-i2\pi vt) dt = \\ = \frac{A_0}{\sqrt{2\pi}} \frac{\frac{1}{t_0} + i2\pi(v_0 - v)}{\left(\frac{1}{t_0}\right)^2 + [2\pi(v_0 - v)]^2}. \quad (3)$$

Для квадрата модуля Фурье спектра мощности получим

$$|F(\nu)|^2 = \frac{A_0^2/2\pi}{\left(\frac{1}{t_0}\right)^2 + [2\pi(\nu_0 - \nu)]^2} = \frac{t_0^2 A_0^2/2\pi}{1 + (2\pi)^2(t_0\nu_0)^2 \left(1 - \frac{\nu}{\nu_0}\right)^2}. \quad (4a)$$

Эта функция имеет вид лоренцевой линии с максимумом при $\nu = \nu_0$. Используя определение относительного декремента $\delta = \frac{\Lambda}{2\pi} = \frac{1}{2\pi t_0 \nu_0}$ и выражение максимальной величины пика квадрата Фурье спектра мощности $|F(\nu)|_{\max}^2 = |F(\nu = \nu_0)|^2 = \frac{t_0^2 A_0^2}{2\pi}$, перепишем выражение (4a) в виде

$$|F(\nu)|^2 = \frac{|F(\nu)|_{\max}^2}{1 + \frac{1}{\delta^2} \left(1 - \frac{\nu}{\nu_0}\right)^2}, \quad (46)$$

откуда получим относительный декремент

$$\delta = \frac{1}{\nu_0} \frac{|\nu_0 - \nu|}{\sqrt{\frac{|F(\nu)|_{\max}^2}{|F(\nu)|^2} - 1}}. \quad (5)$$

Для частоты ν_1 , при которой выполняется соотношение $\frac{|F(\nu)|_{\max}^2}{|F(\nu_1)|^2} = 2$, выражение (5) упростится:

$$\delta = \frac{|\nu_0 - \nu_1|}{\nu_0}. \quad (6)$$

Поскольку лоренцевский пик (4) имеет два таких значения частоты (по обе стороны резонанса), в качестве оценки относительного декремента следует взять среднее арифметическое соответствующих значений относительного декремента, что позволяет получить уравнение (1) (частота ν_0 соответствует резонансной частоте максимума пика ν_{\max}).

На практике приходится иметь дело с конечными акселерограммами длительностью 1 – 10 с, содержащими до 10 000 точек. Конечность длины таких рядов, их дискретность, наличие шумов и другие факторы влияют на ширину резонансных пиков. Кроме того, резонансные пики расчетных спектров имеют конечную ширину даже при отсутствии заглухания. Поэтому целесообразно проверить теоретические формулы на модельных рядах с целью выяснения пределов их применимости. Следует отметить, что эксперименталь-

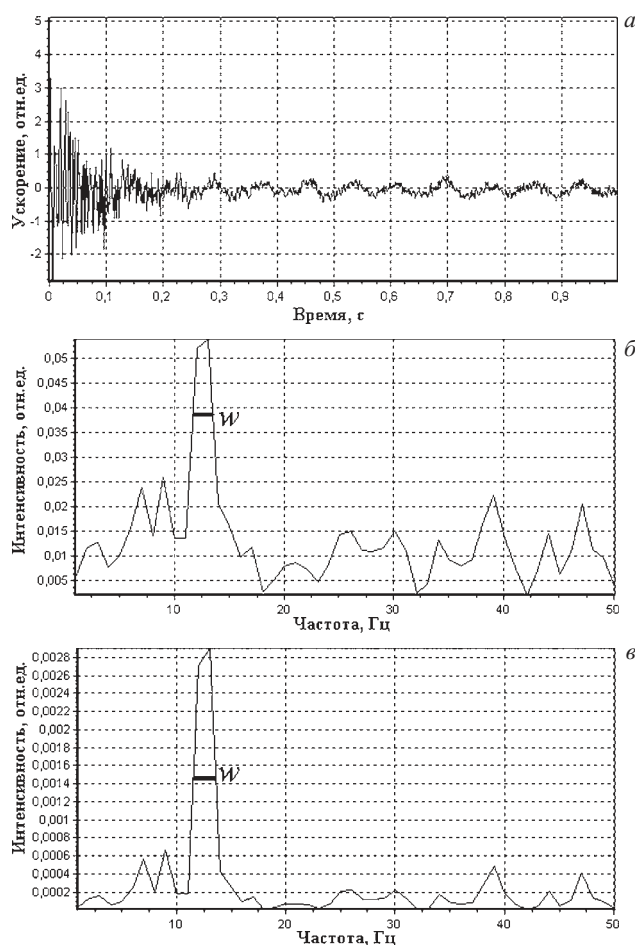


Рис. 2. Акселерограмма (1000 точек через 0,001 с) (а), Фурье спектр мощности (б) и квадрат Фурье спектра мощности (в) колебаний приточного вентилятора тепловой защиты бетона, полученные при обследовании Ленинградской АЭС

ные акселерограммы получают в виде дискретных цифровых рядов с заданными частотой точек и длиной. Хотя точное их моделирование невозможно, раздельное влияние перечисленных факторов на правильность определения декрементов можно исследовать только с помощью модельных дискретных рядов.

Для определения декрементов спектральным методом была разработана специальная программа *VST Decrements 07*. Эта программа позволяет просматривать экспериментальные акселерограммы, в том числе в режиме скользящего окна, вычислять Фурье спектры мощности (и их квадраты), автоматически определять местоположение резонансных пиков и их ширину на высоте $1/\sqrt{2} = 0,707$ (0,5) максимума, сохранять на диске кривые, рисунки, таблицы рассчитанных декрементов, а также обрабатывать ряды списками. Расчет декрементов по СМОД осуществляется по следующему алгоритму (в квадратных скобках — действия, которые можно опустить):

- [сглаживание исходного ряда];
- вычисление исходного спектра или его квадрата;
- [сглаживание спектра];
- [отсев малых (“шумовых”) пиков];

определение резонансных частот по [сглаженному] спектру;

поправка резонансных частот по исходному спектру;

решение о достаточном разрешении пиков [наличие верхней части пика высотой более 0,707 (0,5) максимума];

вычисление (относительных) декрементов по пикам исходного спектра согласно уравнению (1);

генерация таблицы результатов анализа спектра.

Следует отметить, что такая многошаговая процедура и операции со сглаженными спектрами необходимы при обработке реальных спектров, чтобы выделить существенные пики на фоне шумов и нерегулярностей. Сглаживание проводится тремя способами: простой заменой каждой точки средним арифметическим по заданному окну, например из 10 точек; заменой каждой точки взвешенным средним с гауссовой плотностью вероятности (с центром распределения на заменяемой точке); релаксационным сглаживанием на основе простейшей явной разностной схемы численного решения уравнения теплопроводности (диффузии) [11]. Степень сглаживания определяется шириной окна или числом итераций в третьем способе, которые задаются пользователем. Третий способ сглаживания спектров по ряду причин оказался оптимальным для целей их обработки.

Корректность работы алгоритма определения собственных частот и ширин спектральных линий была проверена графическим анализом Фурье спектров мощности, полученных с помощью разработанной программы и программы Mathcad.

Приведем описание процедуры релаксационного сглаживания ввиду ее ключевой важности для описываемых приложений. Процедура сглаживания ряда (сигнала) $\{V(t_k), k = 1, \dots, M\}$ использует “релаксационную” схему, построенную по аналогии с решением уравнения диффузии (теплопроводности)

$$\frac{\partial V}{\partial \tau} = \chi \frac{\partial^2 V}{\partial t^2}, \quad (7)$$

представленного в виде разностного уравнения

$$\frac{V_k^{j+1} - V_k^j}{\Delta \tau} = \chi \frac{V_{k+1}^j + V_{k-1}^j - 2V_k^j}{(\Delta t)^2}, \quad (8)$$

где j — номер “слоя” или шага итераций. Из уравнения (8), соответствующего простейшей явной разностной схеме численного решения уравнения диффузии (теплопроводности), получим

$$V_k^{j+1} = V_k^j + \frac{\chi \Delta \tau}{(\Delta t)^2} (V_{k+1}^j + V_{k-1}^j - 2V_k^j). \quad (9a)$$

Обозначив $\omega = \frac{\chi \Delta \tau}{(\Delta t)^2}$, перепишем последнее уравнение в виде

$$V_k^{j+1} = \omega V_{k+1}^j + \omega V_{k-1}^j + (1 - 2\omega) V_k^j. \quad (9б)$$

Из теории устойчивости разностных схем известно, что данная схема будет абсолютно устойчива при $\omega < 1/2$. Для использования последнего уравнения в качестве сглаживающей процедуры необходимо задать граничные условия. В данном случае они задаются следующим образом. Пусть сглаживание проводится для серии длиной M точек. Тогда на каждом шаге итераций сглаживания крайние значения при $k = 1$ и $k = M$ вычисляются по формулам

$$\begin{aligned} V_1^{j+1} &= (1 - 2\omega) V_1^j + 2\omega V_2^j, \\ V_M^{j+1} &= (1 - 2\omega) V_M^j + 2\omega V_{M-1}^j. \end{aligned} \quad (9в)$$

Итерируя эти уравнения, т.е. вычисляя новые значения сигнала V_k^{j+1} на $j + 1$ -м “релаксационном” шаге через значения V_k^j на j -м шаге заданное число раз, задав в качестве исходных значений для этой процедуры ($j = 0$) сам сигнал, получим “низкочастотную” составляющую V_R . Основное достоинство такой процедуры состоит в том, что для вычисления “тренда” V_R не требуется априорное знание аналитической формы низкочастотной составляющей.

Рассмотрим спектральный метод применительно к модельным рядам. Для исследования корректности определения декрементов модельных рядов была разработана специальная программа, позволяющая генерировать ряды в виде сумм гармоник по заданным параметрам каждой гармоники (частоте колебаний ν_0^k , шагу дискретизации Δt , начальной амплитуде A_0^k и относительному декременту колебаний δ^k). Декремент каждой k -й модельной гармоники

$$A^k(t) = A_0^k \exp\left(-\frac{t}{t_0^k}\right) \sin(2\pi \nu_0^k t) \quad (10)$$

связан с ее параметрами соотношением

$$\Lambda^k = \ln \frac{A_i^k}{A_{i+1}^k} = \frac{1}{\nu_0^k t_0^k}, \quad \delta^k = \frac{1}{2\pi} \Lambda^k. \quad (11)$$

Здесь $t = j\Delta t$; $\frac{A_i^k}{A_{i+1}^k}$ — отношение двух последовательных амплитуд затухающих колебаний; Λ^k — декремент колебаний; t_0^k — временная постоянная, рассчитываемая по заданным декременту δ^k и частоте ν_0^k . Правильности генерации рядов по заданному декременту проверялась с помощью функции δ_{SD} (stupid

decrement) прямым вычислением среднего логарифма отношения двух последовательных амплитуд затухающих колебаний при наличии одной гармоники:

$$\delta_{SD} = \frac{1}{2\pi} \Lambda^k = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N-1} \ln \frac{A_i^k}{A_{i+1}^k}, \quad (12)$$

где N — число последовательных максимумов. Функция δ_{SD} (12) будет также использоваться далее при решении проблемы малых декрементов колебаний на малых частотах.

Некоторые результаты определения декрементов модельных рядов с одной собственной частотой (гармоникой) по СМОД приведены на рис. 3 в виде зависимостей истинного (относительного) декремента от вычисленного (относительного) декремента для различных собственных частот и длин рядов. Поскольку, как отмечалось выше, даже для рядов без затухания ширина спектральной линии должна быть конечной, все кривые (см. рис. 3) берут начало из точки $(\delta_0, 0)$. Обработка результатов расчетов для многих собственных частот ν_0^k , длин рядов и шагов дискретизации, в том числе для моделей $A^k(t) = A_0^k \exp\left(-\frac{t}{t_0^k}\right) \cos(2\pi\nu_0^k t)$, позволила установить, что величина δ_0 в среднем обратно пропорциональна собственной частоте ν_0 и общей длине ряда T :

$$\delta_0 \approx \frac{0,5-0,9}{\nu_0 T} \quad (13a)$$

и

$$\delta_0 \approx \frac{0,2-0,7}{\nu_0 T} \quad (13b)$$

для расчетов по квадрату модуля спектра и по модулю спектра соответственно. Таким образом, расчеты по модулю спектра дают более точные значения декрементов. С увеличением частоты и длины ряда все зависимости стремятся к прямой

$$\delta_{\text{ист}} = \delta_w, \quad (14)$$

где δ_w — величина (относительного) декремента, вычисленного по СМОД на основе ширины спектральной линии. Формула (14) дает хорошее приближение для рядов длиной более 10 с при относительных декрементах δ_w более 1%, вычисленных для собственных частот более 10 Гц, с точностью около $\pm 0,002$. Определение малых декрементов на малых частотах будет рассмотрено ниже.

Несмотря на отмеченные ограничения, проведенные расчеты позволили выявить явные достоинства СМОД. Например, обработка модельных рядов с двумя и большим числом гармоник показывает, что наличие различных частот слабо влияет на результат опре-

деления δ_w даже при перекрывании линий вплоть до пределов разрешения вершин отдельных пиков, т.е. до слияния верхних частей пиков высотой более 0,707 (0,5) максимума.

Наложение случайного (белого) шума не влияет на определение δ_w вплоть до величины амплитуды шума 40–50% от амплитуды минимальной гармоники, что является еще одним достоинством метода.

Увеличение длины модельных рядов без шума повышает точность определения декрементов. При наличии шумов эта точность при увеличении длины рядов ухудшается, поскольку больший вклад в ширину линий вносят шумовые «хвосты», где амплитуды гармоник становятся равными или меньше амплитуды шума. Этот эффект следует иметь в виду при выборе оптимальной длины экспериментальных рядов, в которых всегда присутствует шумовая составляющая.

Для определения декрементов на малых частотах можно использовать релаксационное сглаживание акселерограмм [11], описанное выше. На рис. 4 приведены акселерограмма и ее спектры до и после сглаживания.

В данном случае легко определить декремент нижней частоты колебаний (4 Гц) на основе сглаженной акселерограммы непосредственно, используя функцию δ_{SD} (12), но при условии определения амплитуд относительно среднего уровня акселерограммы, который полагается нулевым в уравнении (12). Это вычисление позволяет получить $\delta_{SD} = 9,19\%$. Применение функции δ_{SD} к исходному ряду дает, как и следовало ожидать, неадекватное значение 0,8%, чем и обусловлено название функции. При вычислении по спектрам исходной и сглаженной акселерограмм получим явно завышенные значения δ_w , равные 21,5 и 21,9% соответственно.

Такой метод будет полезен во всех случаях, когда спектр содержит резонансные частоты, различающиеся не менее чем в 5–8 раз. Но даже для использования метода сглаживания в таких случаях необходимо проверить влияние сглаживания на корректность определения декрементов, что можно сделать на основе модельных рядов.

Результаты предлагаемого подхода к определению декрементов колебаний на малых частотах представлены на рис. 5 и в таблице, где δ_{SD} — относительный декремент, определенный по сглаженному ряду с помощью функции (12); N — номер гармоники; ν — частота; δ_w — относительный декремент, определенный по ширине спектральной линии; A_0 — амплитуда гармоники; δ — относительный декремент, заданный при генерации модельного ряда. На сумму гармоник модели был наложен случайный белый шум с амплитудой, равной 3. Спектр реальной акселерограммы (см. рис. 5, а) содержит три основные частоты — 4, 29 и 64 Гц. Декремент сглаженного ряда ($\omega = 0, 25, 333$ итераций) $\delta_{SD} = 2,3\%$. В основу модели положены данные спектрального анализа реального ряда: резо-

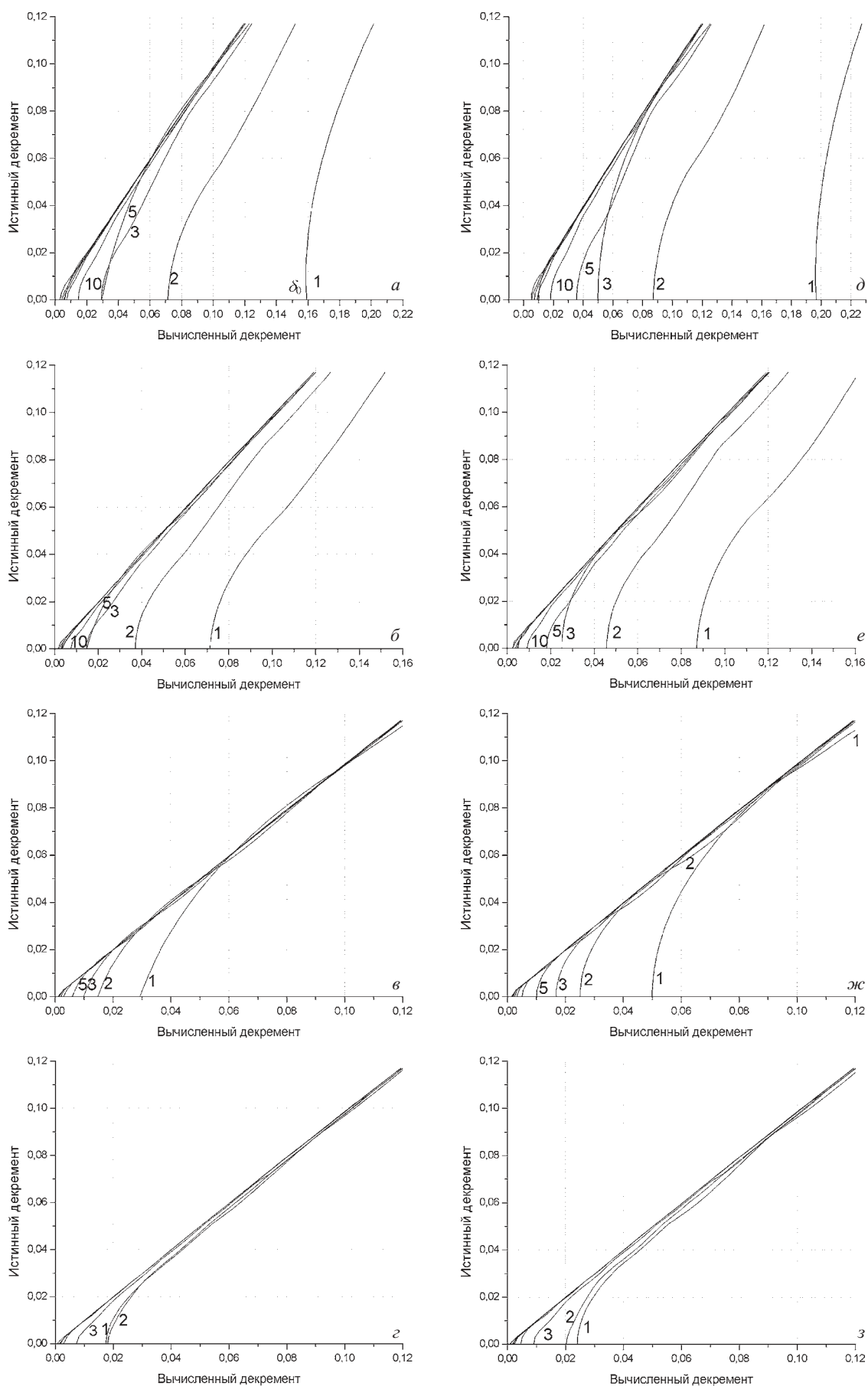


Рис. 3. Зависимости истинного от вычисленного относительного декремента модельных рядов для собственных частот ν_0^k , равных 1, 2, 3, 5, 10 Гц (цифры около кривых) и 15, 20, 25, 30, 35 Гц (соответствующие кривые лежат на диагонали) и длин рядов 3,3 (а, д), 6,7 (б, е), 10 (в, ж), 22,2 с (з, з) при шаге дискретизации 0,001 с; а – г — расчеты по модулю спектра, д – ж — по квадрату модуля

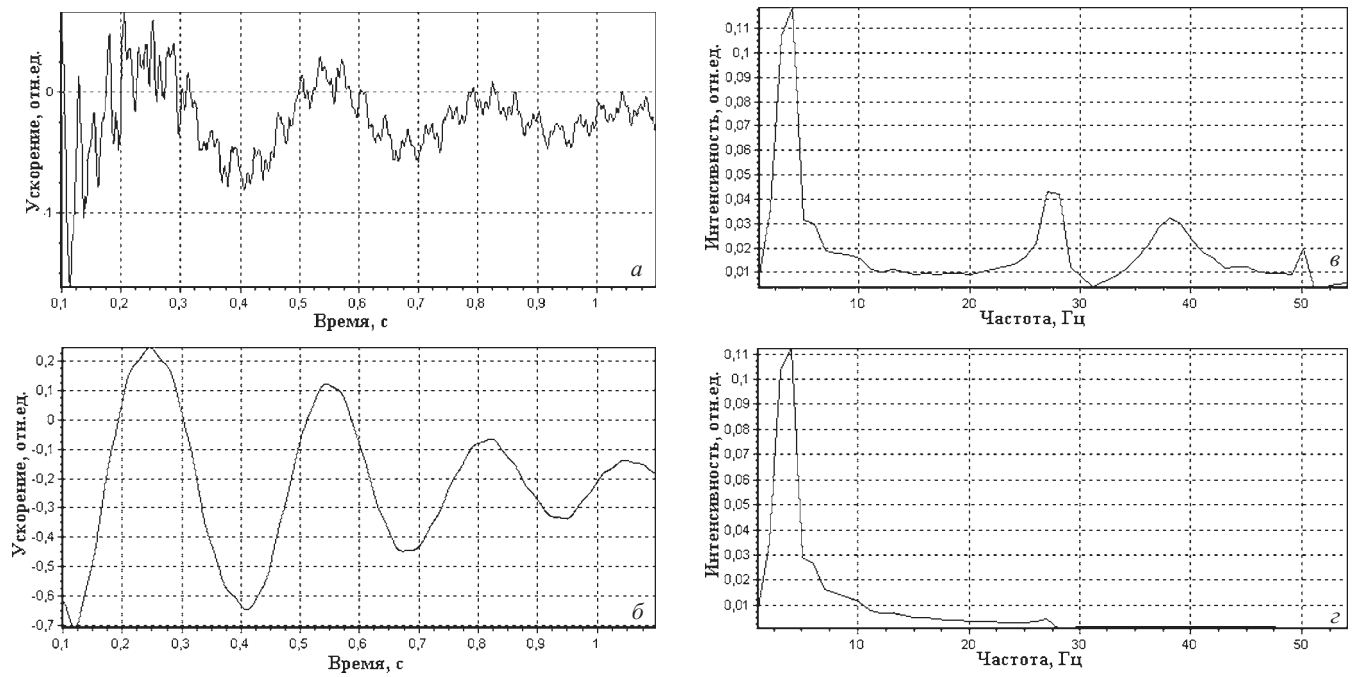


Рис. 4. Исходная (а) и сглаженная (б) акселерограммы и их спектры (в и г соответственно); сглаживание проводилось с $\omega = 0,25$ и числом итераций 376

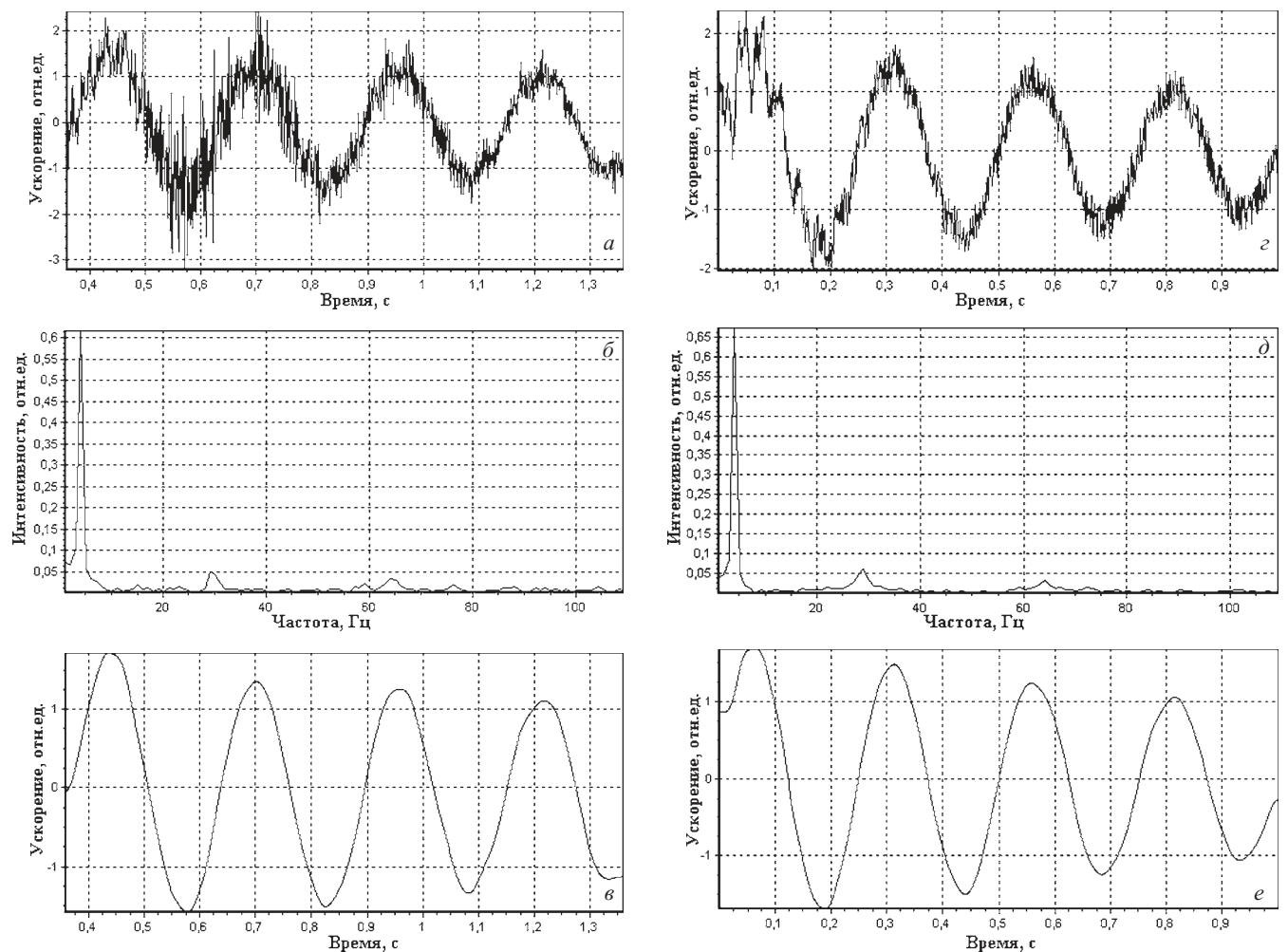


Рис. 5. Данные реальной акселерограммы вытяжного вентилятора Ц14-46-008 (а – в) и результаты моделирования ряда с помощью суммы синусоидальных гармоник (г – е); а, г — исходные ряды, б, д — их спектры, в, е — сглаженные ряды

Результаты подбора параметров модели акселерограммы и вычисления декремента низшей частоты с помощью релаксационного сглаживания (см. рис. 5)

Номер гармоники	Акселерограмма (см. рис. 5, а) после сглаживания, $\delta_{SD} = 2,3\%$		Модель (см. рис. 5, з) после сглаживания, $\delta_{SD} = 2,4\%$		
	ν , Гц	δ_w , % (по спектру)	A_0 , отн.ед.	δ , % (задан)	δ_w , % (по спектру)
1	4	8,4	8	2,3	8,2
2	29	3,1	3	3,1	3,2
3	64	1,9	2	1,9	1,7

нансные частоты 4, 29 и 64 Гц, амплитуды гармоник 8, 3, 2 (отн.ед.) соответственно и их декременты $\delta_1 = 2,3\%$, $\delta_2 = 3,1\%$, $\delta_3 = 1,9\%$. Как видно из таблицы, релаксационное сглаживание позволяет достаточно точно определить декремент $\delta_{SD} = 2,3\%$ низшей резонансной частоты 4 Гц. При этом вычисления по ширине спектральной линии дают значения δ_w , равные 8,4 % для реальной акселерограммы и 8,2 % для модельного ряда, что сильно завышено. Число итераций процедуры сглаживания практически не влияет на величину определяемого декремента низшей гармоники, если сглаженный ряд имеет вершины, однозначно определяемые как локальные максимумы. В зависимости от различных факторов необходимое число итераций может составить 100 – 1000. Исследования модельных рядов типа, представленного в таблице, показали, что функция δ_{SD} определяет относительные декременты сглаженных рядов (с однозначно определенными максимумами акселерограмм) в пределах 1 – 10 % (наиболее часто измеряемые величины) с погрешностью менее 10^{-3} . Декременты менее 1 % определяются с занижением на 0,0008 и менее. С возрастанием декрементов до 100 % они определяются с завышением до 14 %. Отсюда видно, что предложенный подход действительно обеспечивает определение малых декрементов колебаний на малых частотах, значения которых находятся вне пределов применимости СМОД.

Таким образом, проведенные исследования показали, что при определении декрементов колебаний элементов конструкций и оборудования спектральным методом может использоваться как Фурье спектр мощности, так и его квадрат. В последнем случае более контрастно выделяются резонансные пики (см. рис. 2), но ниже точность определения малых декрементов на малых частотах. Спектральный метод дает надежные результаты для декрементов более 1 % на частотах более 10 Гц. Для надежного определения декрементов при более низких частотах необходимо

использовать сглаживание рядов с последующим прямым определением декрементов по отношению последовательных максимумов, отсчитываемых от среднего значения. В последнем случае на практике могут потребоваться дополнительные меры по удалению глобального тренда. В работе описан комплекс процедур, обеспечивающий надежное определение декрементов колебаний элементов реальных конструкций и оборудования по экспериментальным акселерограммам. Описанный подход является общим и применим ко всем типам конструкций и оборудования.

Литература

1. Казновский С. П. — В кн.: Обеспечение сейсмостойкости атомных станций. — М.: Наука, 1987. С. 81 – 96.
2. ПНАЭ-Г-7-002–86. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. — М.: Энергоатомиздат, 1989. — 528 с.
3. Кириллов А. П., Амбриашвили Ю. К. Сейсмостойкость атомных станций. — М.: Энергоатомиздат, 1983. — 185 с.
4. РТМ-108.020.37–81. Энергетическое оборудование электростанций с водоводяными реакторами. Расчет на прочность при сейсмических воздействиях. — Л.: Минэнерго-маш, ЦКТИ, 1981. — 38 с.
5. ОТТ–87. Арматура для оборудования и трубопроводов АЭС. — М.: ГАЗН, 1987 — 154 с.
6. Лукин В. В., Пискарев В. В., Зайцев В. А. Сейсмостойкость электротехнического оборудования собственных нужд АЭС / Обеспечение сейсмостойкости атомных станций. — М.: Наука, 1987. С. 61 – 87.
7. Казновский П. С., Кравец С. Б. Новые методы теоретических и экспериментальных исследований материалов, приборов и технологий: Сб. науч. тр. — Новочеркасск: ЮР-ГТУ, 2001. С. 118 – 121.
8. Пат. № 2284553 РФ.
9. Кравец С. Б. Оценка сейсмостойкости технологических систем атомных станций. — М.: Энергоатомиздат, 2005. — 170 с.
10. Вибрации в технике: Справочник в 6 томах. Т. 5. Измерения и испытания / Под ред. В. В. Алесенко, А. С. Больших, М. Д. Генкина и др. — М.: Машиностроение, 1981. — 496 с.
11. Встовский Г. В., Децеровский А. В., Лукк А. А., Сидорин А. Я., Тимашев С. Ф. / Физика земли. 2005. № 7. С. 3 – 14.