

УДК 699.841.002.5:621.311.25:621.039

13.23.138 0090 13, 23

МЭХ  
54ГЕОЛ  
54**ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ АСПЕКТЫ ОЦЕНКИ СЕЙСМОСТОЙКОСТИ  
ПО ДАННЫМ ДИНАМИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ****Г.В. Встовский, П.С. Казновский, А.П. Казновский**  
(ОАО «ВНИИАМ»)ГЕОГР  
54

*Нарастание сейсмической активности земной коры за последние 30-50 лет, диктует необходимость совершенствования методов проверки и обеспечения сейсмостойкости промышленных и гражданских объектов, что находит свое отражение в современных нормативных документах. В работе кратко рассмотрены существующие методы исследований на сейсмостойкость. Оптимальным выбором 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. Показана необходимость и описаны три метода (спектральный метод определения декрементов по ширине резонансных спектральных линий, метод сглаживания на основе выделения гармоник в наименьшей частоте с помощью релаксационного сглаживания и метод огибающих, предлагается впервые, по наклону полулогарифмической зависимости амплитуд от времени) точного определения декрементов колебаний по измеряемым акселерограммам. Показана необходимость минимизации неравномерности АЧХ канала записи акселерограмм. Совокупность полученных к настоящему времени экспериментальных и расчетно-теоретических результатов делает этот метод динамических испытаний уникальным по своим возможностям адекватного учета реальных условий эксплуатации оборудования, конструкций и пр. при минимальных временных, финансовых и др. затратах и возможности применения на любых промышленных и гражданских объектах.*

**Введение.****Необходимость и методы исследований на сейсмостойкость**

Объективная реальность нарастание сейсмической активности земной коры за последние 30–50 лет, см. сайт <http://earthquake.usgs.gov/>, диктует необходимость совершенствования методов проверки и обеспечения сейсмостойкости как промышленных и гражданских объектов в целом, так и отдельных конструкций, единиц оборудования, узлов и т.д.

Такое положение дел находит свое отражение в современных нормативных документах. Например, пункт 6.13 норм [1] гласит: «Для обеспечения безопасности на этапе ввода в эксплуатацию объектов использования атомной энергии (ОИАЭ) должны изучаться динамические характеристики (затухание и частоты собственных колебаний) систем и элементов (кроме зданий и сооружений), важных для безопасности, методом экспериментальных исследований или их динамических испытаний в соответствии с порядком, методикой, объемами исследований, установленными в проекте.

Для эксплуатируемых ОИАЭ динамические характеристики компонент (систем и элементов, важных для безопасности), должны быть определены расчетом, а затем подтверждены исследованиями или испытаниями во время эксплуатации на остановленном и приведенном в безопасное состояние ОИАЭ (например, в период плановой остановки ОИАЭ).

Данные об уточненных динамических характеристиках компонент ОИАЭ должны использоваться при проведении анализов безопасности ОИАЭ, а также отражаться в соответствующих отчетах по обоснованию безопасности».

Расчетным путем невозможно установить резонансные частоты (а тем более характеристики затухания резонансных колебаний) оборудования в реальных условиях его монтажа, раскрепления и обвязки.

Важным обстоятельством является то, что сейсмические нагрузки носят резонансный характер, чем обусловлена их исключительная потенциальная опасность, т.к. 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 [2] обеспечения сейсмостойкости конструкций и оборудования АЭС различного назначения и разработаны соответствующие методы обследования и аттестации. Одним из мотивов данной работы является стремление расширить сферу применения этих методов на все промышленные и гражданские объекты.

Основные методы определения собственных частот колебаний и их декрементов традиционно делятся на две категории: расчетные и экспериментальные. Первые применимы только на стадии проектирования, т.к. в принципе не могут учесть все особенности реального состояния элементов оборудования и конструкций после их монтажа. Экспериментальные методы можно 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, вызванные невозможностью строго воспроизвести и смоделировать все элементы, узлы и динамические связи сложных многокомпонентных систем, и тем более – 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, обладают одним ограничением. Такие исследования, как по техническим возможностям, так и из условия неповреждаемости испытываемого оборудования проводятся при слабых силовых воздействиях, на порядок и даже на порядки меньших, чем реальные сейсмические воздействия при землетрясениях на уровне проектных землетрясений (ПЗ) и поэтому, несмотря на затраты, 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.

Оптимальным выбором 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 осуществляется запись акселерограмм 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 [3-5]. Съем и запись акселерограмм осуществляется с помощью портативного комплекса на базе современных электронных компонентов. Такой метод будем называть спектральным методом определения декрементов (СМОД) колебаний. Далее проводится расчетное определение сейсмических нагрузок и сейсмостойкости оборудования и его основных элементов на базе экспериментально определенных значений собственных динамических характеристик и поэтажных спектров ответа [2-5]. Метод расчетно-экспериментальной проверки сейсмостойкости (РЭПС) 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.

Данная работа посвящена анализу ключевых аспектов РЭПС и преодолению выявленных ограничений СМОД. Полученные результаты применимы ко всем типам оборудования и конструкций. Основным достоинством метода является то, что он является неразрушающим и не требует дополнительных технических приемов, типа образцов-свидетелей и пр.

### Необходимость точного определения декрементов колебаний

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 т.н. спектров ответа – зависимостям эффективного ускорения элемента оборудования от частоты колебаний при определенных декрементах. На схеме рис. 1 видно, что при уменьшении декремента в 5 раз расчетные нагрузки изменяются примерно в 2 раза. 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.

Следует отметить, что, как правило, при расчетах используются обобщенные спектры ответа типа изображенных на рис. 1. Для более точных расчетов следует использовать спектры ответа, полученные для конкретных условий размещения оборудования или конструкций. Процедура получения спектров ответа по измеренным акселерограммам грунта (или перекрытия здания на заданной высотной отметке) описана, например, в [6].

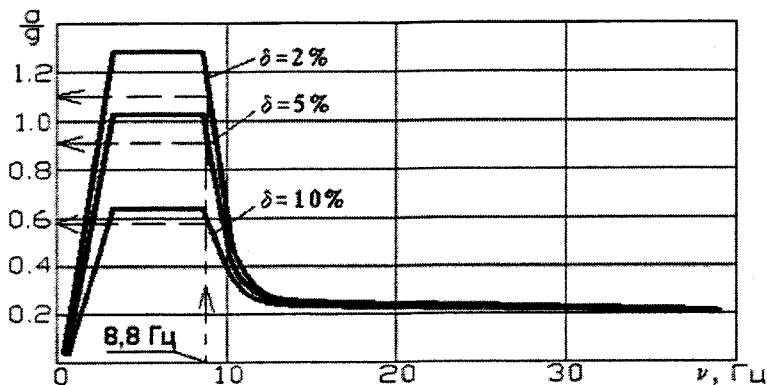


Рис.1. Схема определения расчетного ускорения (в единицах  $g$ ), обусловленного сейсмическим воздействием для оборудования с наименьшей собственной частотой  $8,8$  Гц и различными относительными декрементами  $\delta=2, 5, 10\%$   
 Величина декремента существенно влияет на выбор расчетной сейсмической нагрузки

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.

### Использование в РЭПС возбуждения колебаний с широким спектром

Поскольку основной причиной деформаций и возможного разрушения оборудования и других конструкций при сейсмических нагрузках являются резонансные колебания, основной задачей экспериментальных обследований является выявление резонансных колебаний, измерение их частот и декрементов. При динамических испытаниях используются различные методы возбуждения колебаний: толчок, мягкий удар, обрыв растяжки, использование вибраторов с регулируемой частотой возбуждаемых колебаний, и др. Такие методы позволяют возбуждать локальные направленные колебания элементов конструкций или единиц оборудования заданной интенсивности, не прибегая к методам, влекущих вибрации всего здания, где расположены исследуемые конструкции. При этом можно подобрать амплитуду колебаний, соответствующую реальным сейсмическим нагрузкам, в конкретных условиях размещения, монтажа и обвязки конструкций или оборудования, чего невозмож-

но добиться другими методами. Для выявления резонансных частот необходимо использовать как можно более плотный набор частот в критическом диапазоне 1–30 Гц. Использование перестраиваемых вибраторов требует больших затрат времени, но оправдано при отсутствии или невозможности дальнейшего спектрального анализа измеряемых акселерограмм. При условии использования спектрального анализа при обработке акселерограмм наиболее удобными являются возбуждения колебаний с помощью удара или обрыва растяжки. При этом эффективный источник колебаний является широкополосным с практически равномерным спектром частот, из которых в самой конструкции развиваются ее резонансные колебания. Спектральный анализ акселерограмм таких колебаний позволяет определять значения резонансов с достаточной точностью (лучше 1%).

### Методы определения декрементов по акселерограммам

Как было отмечено выше, наряду с величинами резонансных частот необходимо точно определять декременты резонансных колебаний. Декремент  $\Lambda_k$  затухающих колебаний некоторой  $k$ -й гармоники с резонансной частотой  $\nu_0^k$

$$A^k(t) = A_0^k \exp(-t/t_0^k) \sin(2\pi\nu_0^k t) \quad (1a)$$

определяется как логарифм отношения последовательных значений амплитуд и связан с параметрами модели (1a) соотношением

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

где  $\delta_k$  – безразмерный декремент, значения которого используются в нормативной литературе. Модель (1a) можно переписать в виде

$$A^k(t) = A_0^k \exp(-\Lambda_k \nu_0^k t) \sin(2\pi\nu_0^k t) = A_0^k \exp(-\delta_k \omega_0^k t) \sin(\omega_0^k t). \quad (16)$$

Ниже описываются три метода определения декрементов: СМОД по ширине резонансных спектральных линий, метод сглаживания (метод выделения гармоники с наименьшей частотой с помощью релаксационного сглаживания) и метод огибающих (предлагается впервые, определение наклона зависимости логарифмических амплитуд от времени методом наименьших квадратов). Для реализации каждого из этих методов были разработаны отдельные алгоритмы, включенные в специальную программу *VST Decrements 07*.

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

$$\delta_w = \frac{w}{2\nu_{\max}} \quad (3)$$

Как указывалось выше, метод состоит в получении акселерограмм и их Фурье спектров мощности. На рис. 2 приведены примеры измеренной акселерограммы и ее спектра мощности.

В работе [7] была предложена программная реализации СМОД, и было также показано, что этот метод наряду с целым рядом достоинств имеет ограничения. В частности, он дает сильно завышенные значения малых (менее 1%) декрементов колебаний на малых частотах 1–10 Гц. Для вычисления таких декрементов был предложен метод, описанный ниже.

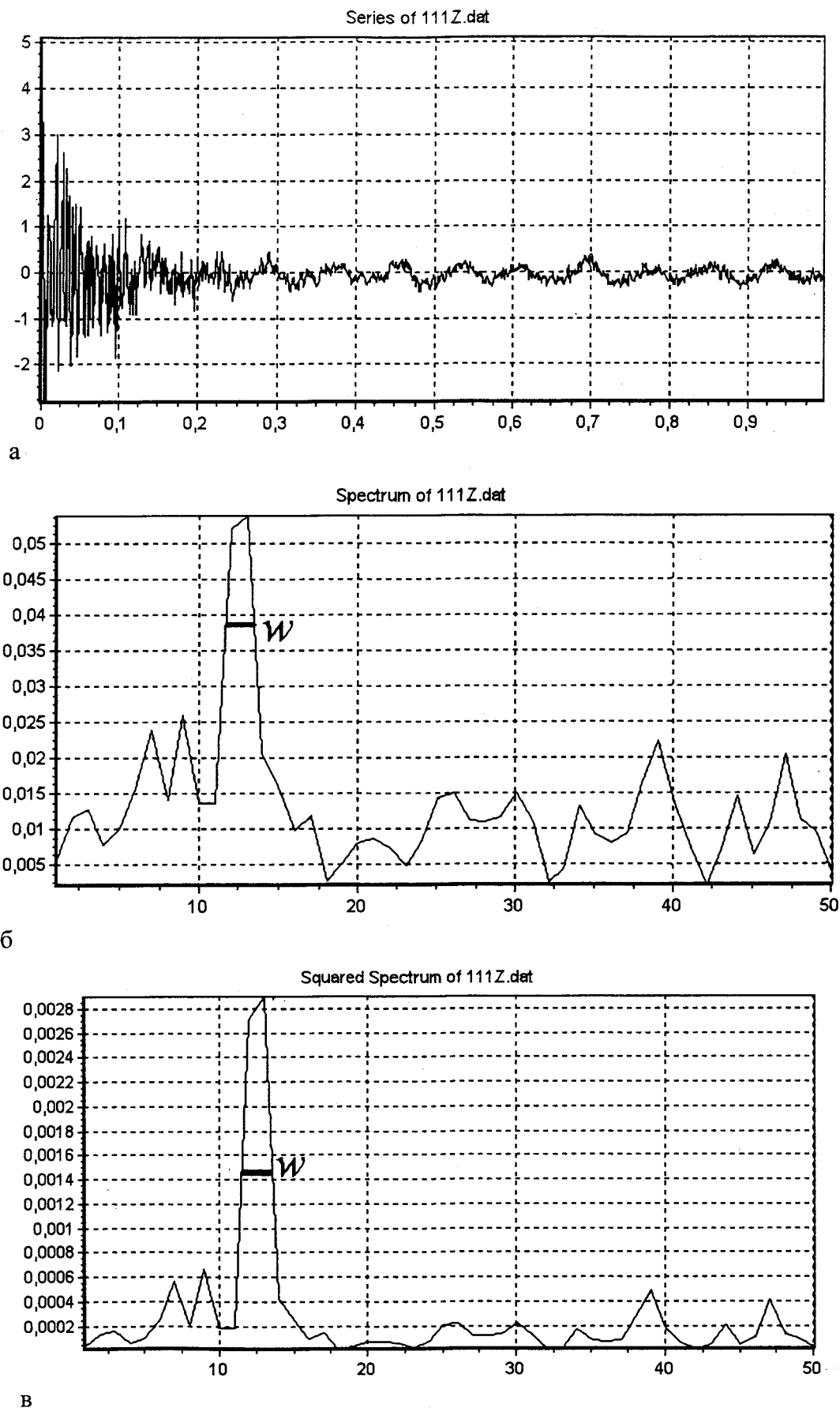


Рис. 2. Акселерограмма (1000 точек через 0,001 сек) (а), Фурье спектр мощности (б) и квадрат Фурье спектра мощности (в) колебаний приточного вентилятора тепловой защиты бетона, полученные при обследовании Ленинградской АЭС

**Метод сглаживания.** В работе [7] было предложено определять декременты низких частот на основе их буквального определения (2) по формуле

$$\delta_{SD} = \frac{1}{2\pi} \Lambda^k = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N-1} \ln \frac{A_i^k}{A_{i+1}^k}, \quad (4)$$

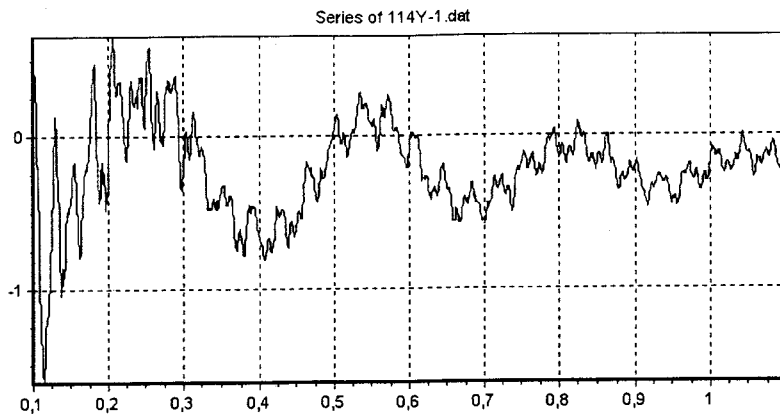
где  $N$  – число последовательных максимумов, применительно к сглаженным акселерограммам, амплитуды измеряются относительно среднего значения всего ряда. Сглаживание проводится до выявления основной гармонике с наименьшей частотой на основе релаксационной процедуры предложенной в работе [8]. Результат работы процедуры демонстрируется на рис. 3.

Как показали расчеты параметров модельных кривых с наперед заданными декрементами, метод позволяет определять декременты с точностью около 0,1%. Для возможности применения этого метода критической является способность измерительного тракта адекватно фиксировать колебания с малыми частотами, см. ниже. Число итераций процедуры сглаживания практически не влияет на величину определяемого декремента низшей гармонике после того, как сглаженный ряд имеет вершины, однозначно определяемые как локальные максимумы. В зависимости от различных факторов необходимое число итераций может составить 100-1000. МС хорошо работает, когда есть возможность выделить одну основную частоту, но при наличии двух близких низких частот он неприменим. Для определения эффективных декрементов в таких и других случаях, не охваченных СМОД и МС, в данной работе предлагается метод, описанный ниже.

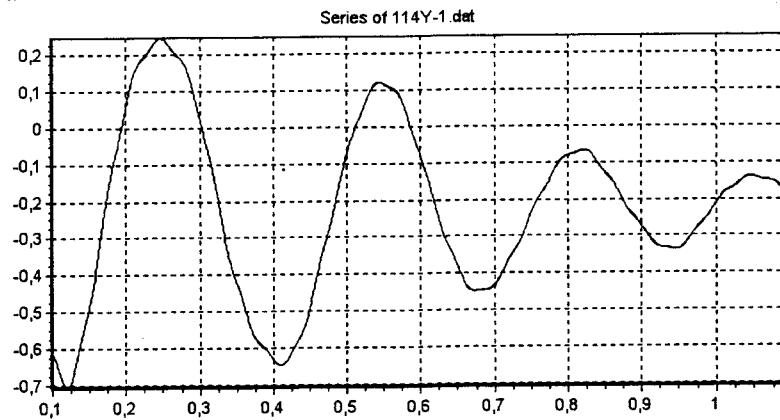
**Метод огибающих (МО).** Идея метода, который впервые предлагается в данной работе, состоит в численном определении среднего наклона  $S$  зависимости логарифмов амплитуд от времени методом наименьших квадратов. Поделив наклон на эффективную частоту, получим  $\delta_{eff} = S/(2\pi\nu_{eff})$  – эффективное значение декремента для выбора расчетной нагрузки по спектру ответа, см. рис. 1. В случае наличия одной гармонике такой метод даст точное значение декремента, поскольку согласно уравнению (16)

$$\ln(A_0^k \exp(-\delta_k \omega_0^k t)) = -St + \ln(A_0^k), \quad S = \delta_k \omega_0^k. \quad (5)$$

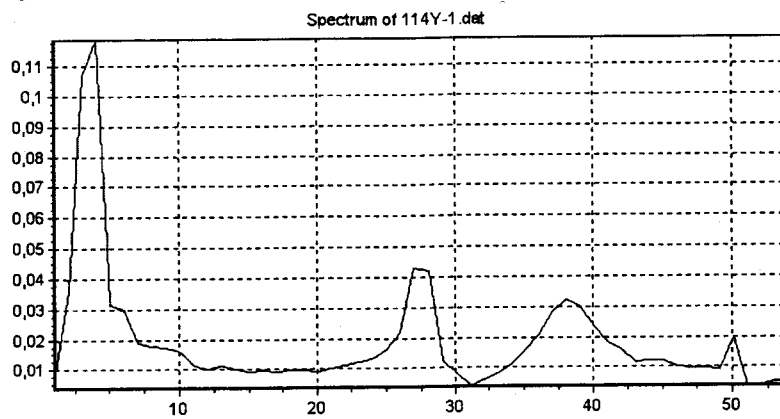
При наличии двух-трех близких низкочастотных гармоник такая процедура даст величину эффективного наклона  $S$ . Значение эффективной частоты  $\nu_{eff}$  предлагается вычислять как средне взвешенное значение по низким частотам с весами, равными высотам соответствующих пиков спектра мощности. В Приложении 5 дано краткое обоснование применимости подобной процедуры на примере обработки модельных акселерограмм. На рис. 4 представлена обработка реальной акселерограммы колебаний вентилятора ВД 15.5. Характер приведенного примера таков, что ни СМОД, ни МС в данном случае не применимы. Но МО позволяет получить разумное значение декремента. В данном случае величина эффективного декремента  $\delta_{eff} = 5,33\%$  получена для эффективного значения частоты 21,9 Гц, определенной по частотам двух низших гармоник 15,1 и 30,1 Гц. Как было показано на модельных акселерограммах, для правильного определения декрементов необходимо построить несколько последовательных огибающих (огибающих) до получения монотонно спадающей кривой, наклон которой в полулогарифмических координатах, деленный на эффективную частоту, дает правильное значение декремента. МО не требует предварительной обработки акселерограмм, но для лучшего выделения основных частот предпочтительно проводить релаксационное сглаживание [7,8], желательно до такой степени, чтобы монотонно спадающей была уже вторая огибающая.



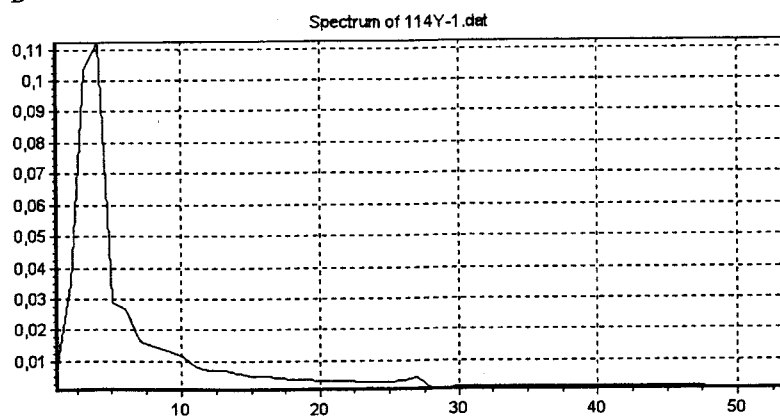
а



б

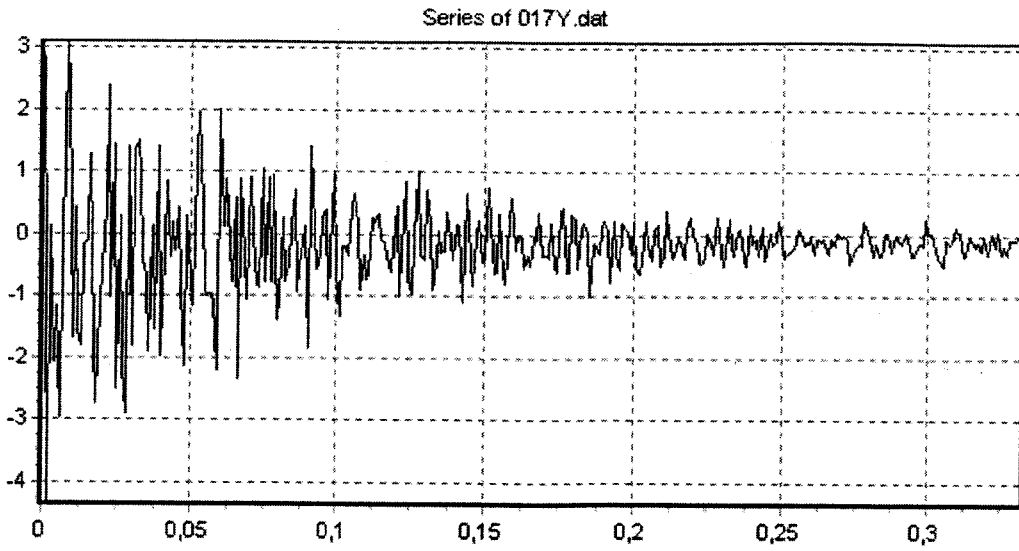


в

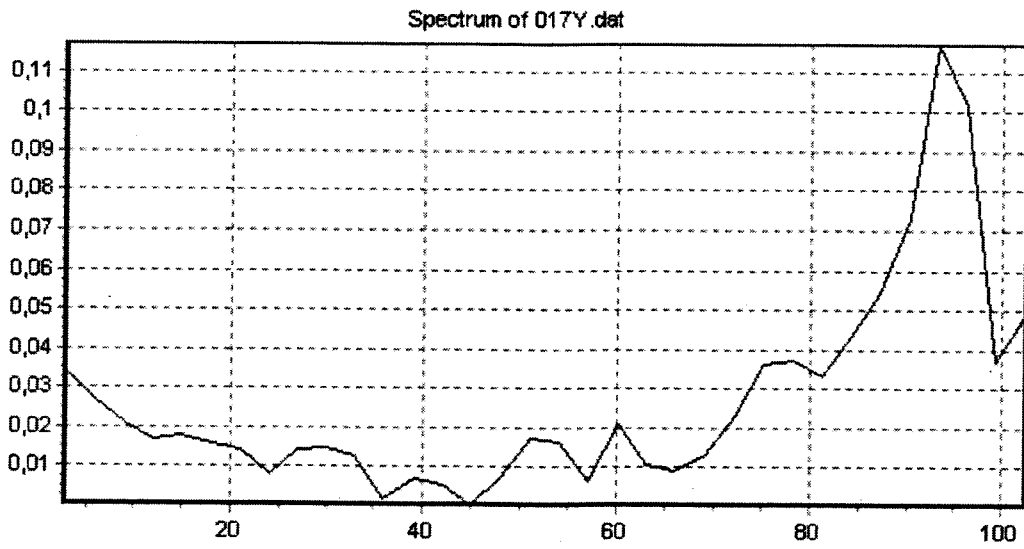


г

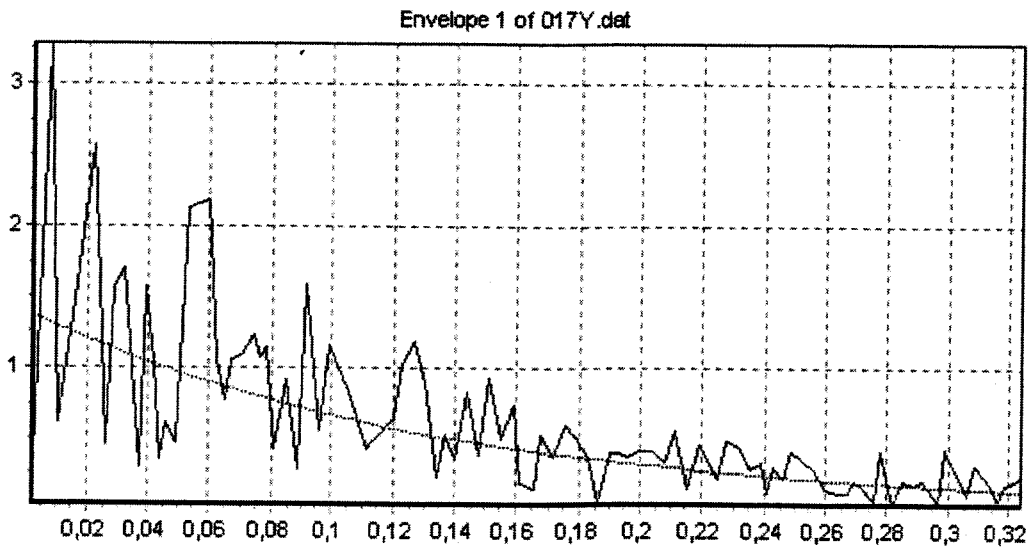
Рис.3. Пример релаксационного сглаживания акселерограммы (а, б) и влияния сглаживания на спектр мощности (в, г)



a

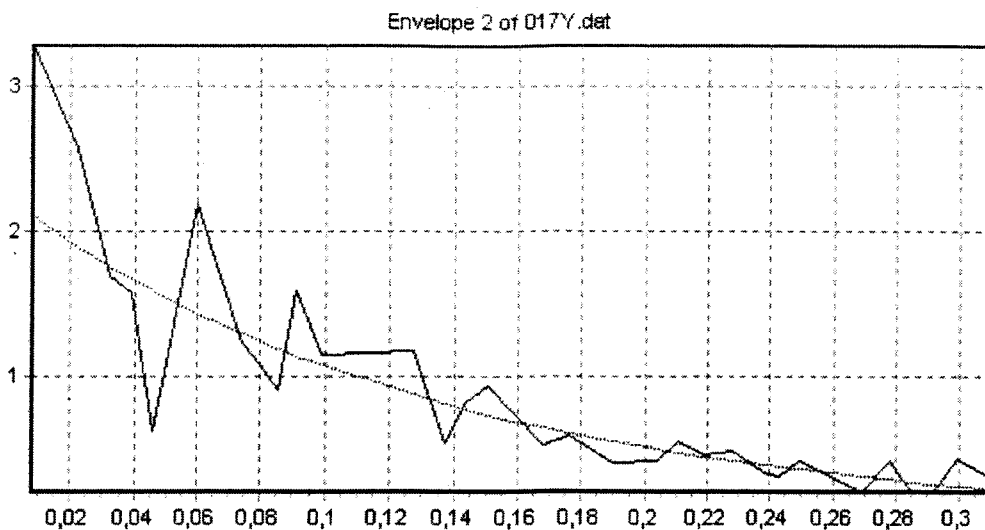


б

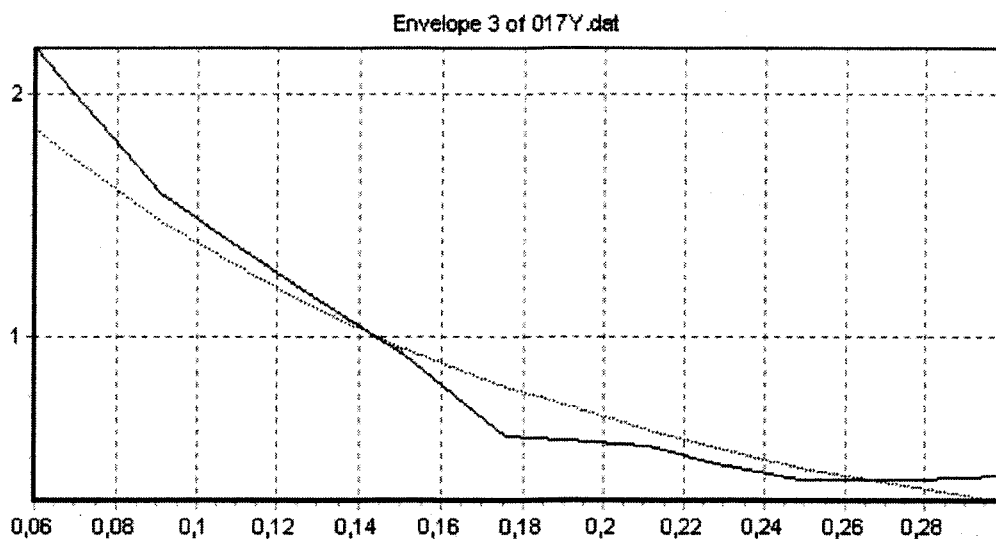


в





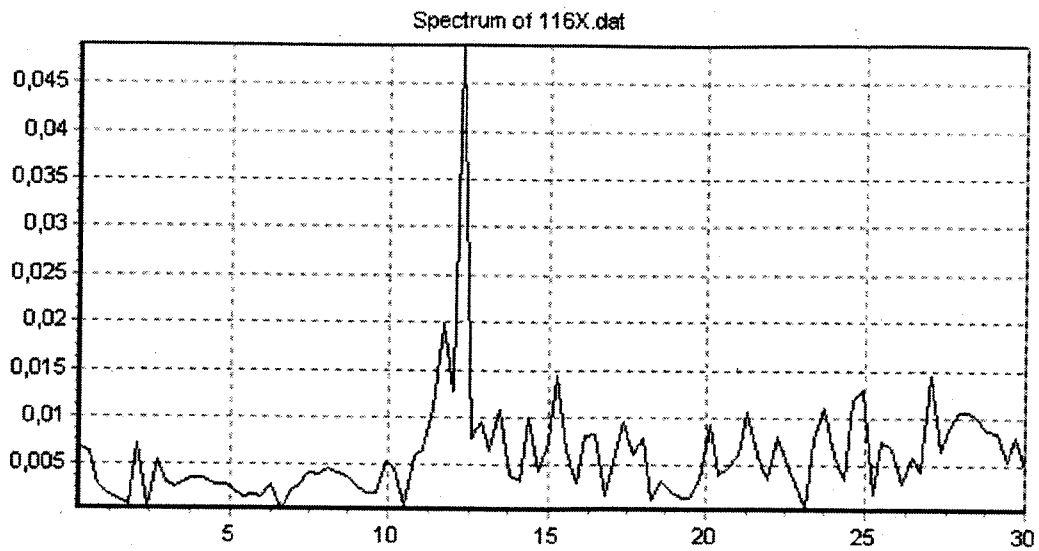
Г



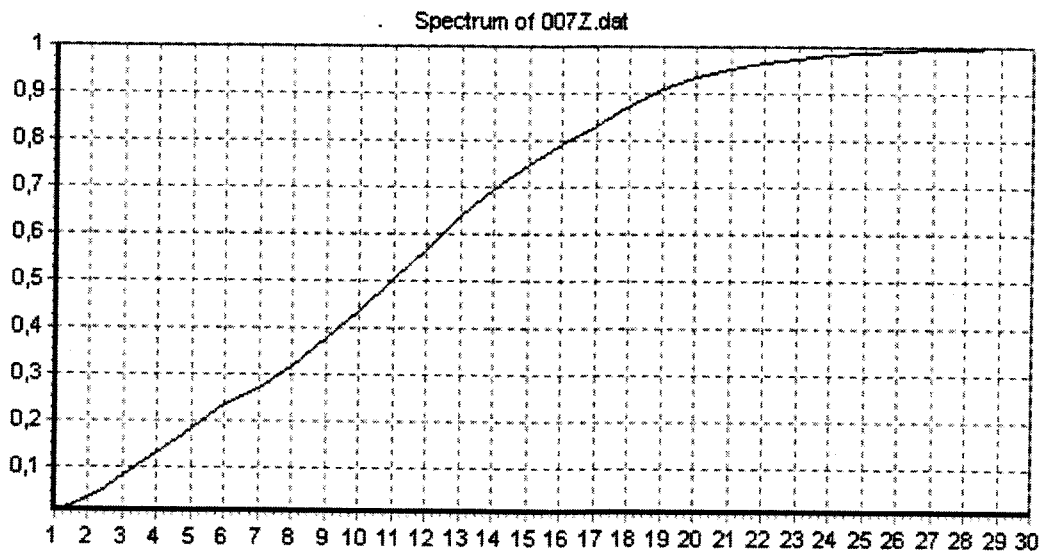
Д

Рис.4. Пример обработки реальной акселерограммы колебаний вентилятора ВД 15.5: а) акселерограмма, б) ее спектр мощности, в)-г) три последующие огибающие с их полулогарифмическими аппроксимациями по формуле (5), показанными в линейных координатах «время-амплитуда»

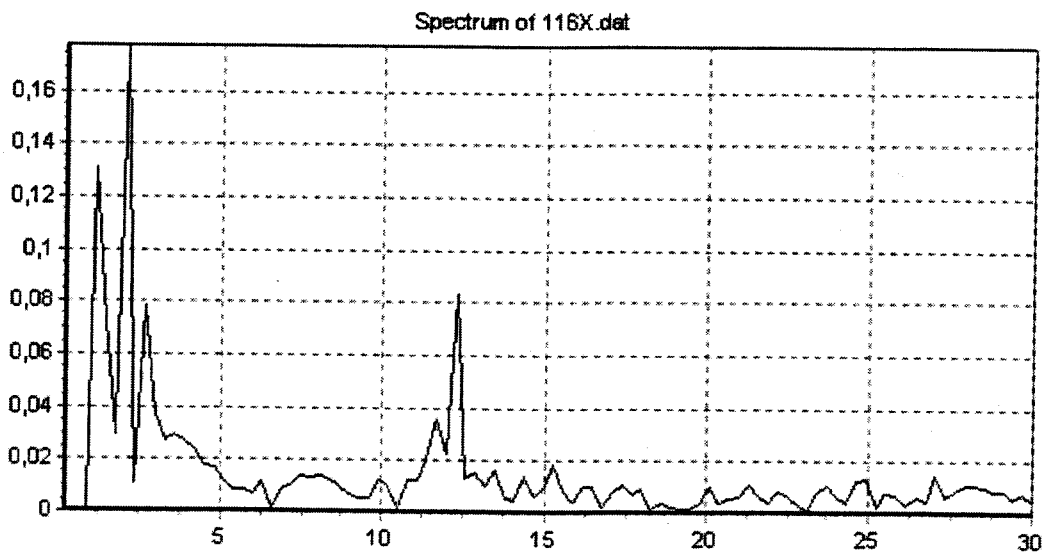
**Значение АЧХ канала записи акселерограмм.** Для успешного применения описанных методов определения декрементов большое значение имеет равномерность АЧХ канала записи акселерограмм, который представляет собой последовательное соединение сенсора (датчика), усилителя низкой частоты и АЦП. Как правило, АЧХ современных усилителей и АЦП достаточно равномерны во всем диапазоне паспортных частот, поэтому основным лимитирующим фактором является неравномерность АЧХ датчика. Единственно возможным способом учесть неравномерность АЧХ датчика является корректировка спектра мощности: поделив поточечно исходный спектр на АЧХ датчика, получим скорректированный спектр. На рис. 5а приводится пример спектра акселерограммы вентилятора Ц9-55-№ 10, записанной с помощью устаревшей модели акселерометра фирмы «Роботорон» с АЧХ, представленной на рис. 5б. Очевидно существенное подавление сигналов с частотами ниже 30 Гц. Результат корректировки представлен на рис. 5в. Такая корректировка слабо влияет на величины декрементов, определенных по СМОД для частот более 10 Гц, но существенна для качественного выделения основных резонансов. К сожалению, этот искусственный прием не позволяет компенсировать отсутствие информации в исходной акселерограмме, особенно в критической области частот 1–10 Гц, где неприменим СМОД.



а



б



в

Рис.5. Пример корректировки исходного спектра вентилятора Ц9-55-N10 (а) с помощью АЧХ датчика (б), в) – скорректированный спектр

Подавление низких частот при записи акселерограмм затрудняет определение истинных значений декрементов основных колебаний, т.к. регистрируемые в самом начале колебания с высокими частотами быстро затухают, но величины их декрементов не столь существенны для оценки сейсмостойкости, как декременты колебаний на низких частотах, которые могут быть определены по МС и МО фактически только при анализе сильно зашумленных «хвостов» акселерограмм, что является не решаемой задачей, т.к. уровень шума превышает полезный сигнал – затухающие колебания на низких частотах.

Таким образом, равномерность АЧХ датчиков является критическим фактором для корректного определения резонансных характеристик объектов, обследуемых на предмет оценки сейсмостойкости.

**Заключение.** Данная работа резюмирует лишь малую часть огромного опыта по обеспечению сейсмостойкости конструкций и оборудования, накопленного в Отделе сейсмостойкости промышленных объектов ОАО «ВНИИАМ». Эта часть, относящаяся к математической обработке результатов измерений акселерограмм весьма существенна для корректной оценки параметров резонансных колебаний именно в отношении тех аспектов метода динамических испытаний, которые обеспечивают адекватную функциональность РЭПС. Нужно отметить, что после выявления несейсмостойких элементов конструкций или оборудования обеспечение их сейсмостойкости достигается, как правило, простыми и дешевыми средствами как, например, укрепление опорных элементов с помощью косынок или введение дополнительных связей с помощью бандажей. Предлагаемые в работе математические методы обработки акселерограмм позволяют формально алгоритмизировать обработку всего объема получаемых данных, что не отменяет, но существенно сокращает временные затраты на анализ результатов специалистом.

Совокупность полученных к настоящему времени экспериментальных и расчетно-теоретических результатов делает этот метод единственным по учету реальных условий эксплуатации оборудования, конструкций и пр. на любых промышленных и гражданских объектах, при минимальных временных, финансовых и др. затратах.

Изложенное – не исчерпывает полный круг вопросов по поводу адекватности результатов, полученных методом динамических испытаний. Исследования в этом направлении продолжаются.

## Литература

1. НП-064-05. Учет внешних воздействий природного и техногенного происхождения на объекты использования атомной энергии. Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору. М. – 2005.
2. Казновский С.П. Направление и состояние исследований сейсмостойкости оборудования и пароводяной арматуры АЭС и АСТ. В сб. «Обеспечение сейсмостойкости атомных станций». М.: Наука. – 1987. С.81–96.
3. Казновский П.С., Кравец С.Б. Анализ сейсмостойкости оборудования 1-го блока Ростовской АЭС. В сб. «Новые методы теоретических и экспериментальных исследований материалов, приборов и технологий. Сборник научных трудов» Новочеркасск, ЮРГТУ. – 2001. С. 118–121.
4. Казновский С.П., Казновский П.С., Казновский А.С., Мищенко В.Ф., Писарев В.В. Патент РФ № 2284553. Способ аттестации многоэлементной системы на сейсмостойкость.
5. Кравец С.Б. Оценка сейсмостойкости технологических систем атомных станций. М.: Энергоатомиздат. – 2005. 170 с.
6. Бирбраер А.Н. Расчет конструкций на сейсмостойкость. СПб: Наука. – 1998.
7. Встовский Г.В., Казновский П.С., Казновский А.П. Спектральный метод определения декрементов механических колебаний по результатам динамических испытаний. Заводская лаборатория. – 2008, 74, № 6, 55–62.
8. Встовский Г.В., Дещеревский А.В., Лукк А.А., Сидорин А.Я., Тимашев С.Ф. Поиск электрических предвестников землетрясений методом фликкер-шумовой спектроскопии. Физика земли. – 2005, № 7, 3–14.