

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕЖИМА ИСПЫТАНИЙ НА СЕЙСМОСТОЙКОСТЬ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ АЭС НА ОСНОВЕ ЗАДАННЫХ СПЕКТРОВ

Как известно, параметры расчетного землетрясения нормируются поэтажными спектрами ответа или спектрами реакции (СР) для конкретной строительной площадки и здания АЭС [1], что обусловлено необходимостью статистической обработки большого количества возможных реализаций (нестационарных затухающих зависимостей ускорения от времени). Именно эти спектры являются определяющими при построении обобщенной акселерограммы или спектра виброускорений, которые необходимы для проведения стендовых испытаний. В этой связи, ключевым вопросом является преобразование исходных спектров ответа в адекватные режимы стендовых испытаний. Впервые такая работа выполнена НПП ВНИИЭМ [2] еще в прошлом веке. В этой работе были обобщены параметры возможных землетрясений на территории СССР и динамические характеристики строительных конструкций АЭС. Полученные спектры воздействий (режимы испытаний на синусоидальную вибрацию с варьируемой частотой) без существенных изменений вошли в действующий ГОСТ 17 516.1-90, что позволило в течение ряда лет проводить аттестацию сейсмостойкого электро-технического оборудования (ЭО) АЭС для СССР и дружественных ему стран.

В настоящее время проектируются принципиально новые конструкции зданий АЭС на строительных площадках, существенно удаленных от территории РФ. И хотя проектировщики в ряде случаев (наряду с поэтажными спектрами ответа) по-прежнему задают интенсивность землетрясения в баллах, возникает проблема обоснования режимов испытаний, соответствующих действующим в РФ стандартам, так как инозаказчики строго ориентируются на требования международных стандартов МЭК 60980, МЭК 60780, что проявилось при подтверждении сейсмостойкости оборудования для АЭС «Бушер» и «Тяньвань».

Таким образом, сейчас вновь стала актуальной задача преобразования исходных спектров ответа в адекватные режимы стендо-

вых испытаний с учетом требований международных стандартов.

В данной работе изложена постановка этой задачи и ее решение на примере режимов испытаний оборудования для АЭС «Тяньвань».

Данные по поэтажным спектрам ответа АЭС «Тяньвань» представляются Генпроектантом в виде спектров ускорений по трем направлениям X,Y,Z в диапазоне частот от 0 до 50 Гц (с достаточно мелким шагом по частоте, в среднем 0,25 Гц) для нескольких фиксированных значений демпфирования. Естественно, буквальная реализация режимов испытаний с учетом всех заданных подробностей на имеющемся в стране оборудовании невозможна, да и не имеет смысла. Поэтому, исходя из возможностей испытательного оборудования, выбран ряд фиксированных частот перехода в необходимом при испытаниях диапазоне.

Анализ исходных спектров ускорений показал прямую корреляцию воздействий в горизонтальном направлении (по осям X и Y) и отсутствие таковой по вертикальной оси Z. Поэтому построение требуемых спектров реакций (ТСР) в заданном диапазоне частот проводилось отдельно в вертикальном и горизонтальном направлениях. Это позволяет:

1. Привести в соответствие динамические характеристики шкафов и спектральные свойства воздействий в соответствующих направлениях. Дело в том, что при построении единого спектра по трем направлениям значительные уровни воздействий в частотной области около 10 Гц (обусловленные возбуждением по оси Z), безусловно, приведут к резонансным колебаниям оборудования в горизонтальном направлении (характерные собственные частоты типовых шкафов в горизонтальном направлении лежат в диапазоне 7-20 Гц).

2. Не рассматривать вопрос о конкретной ориентации того или иного изделия относительно здания АЭС.

Отметим здесь противоречие с данными ГОСТ, в котором воздействия в горизонтальном и вертикальном направлении имеют близкий частотный состав.

При формировании ТСР использовался основной принцип МЭК 60980 (п. 6.5.1), согласно которому задаваемый ТСР должен плотно охватывать исходный спектр во всем частотном диапазоне.

На рис.1 приведены графики исходных спектров ответа, заданных АЭП СПб для оборудования АЭС «Тяньвань» в горизонтальных направлениях (X,Y) для высотной отметки 23,6 м при максимальном расчетном землетрясении (МРЗ) 8 баллов, а также спектра ответа для принятого ряда частот перехода, сформированного для

использования в дальнейших расчетах. Спектр дан для значения демпфирования 10%.

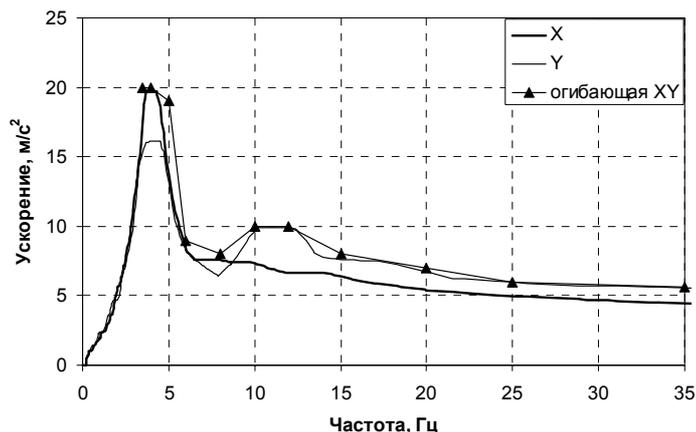


Рис. 1. Спектры ответа в горизонтальных направлениях на отметке 23,6 м при демпфировании 10%

Необходимо отметить, что построение акселерограммы соответствующей заданному спектру ответа не является однозначной задачей [1], так как может быть построено бесконечное множество временных зависимостей (различных как по амплитуде, так и по продолжительности воздействия), имеющих нужный спектр отклика. В современных стандартах используются следующие формы волн: полусинусоида (одиночный удар); затухающая синусоида; набор синусоид с фиксированными частотами; многочастотные волны.

Нами был выбран метод испытаний на воздействие многочастотной вибрации, а именно: гармонической вибрации с варьируемой амплитудой и плавным изменением частоты по логарифмическому закону:

$$f(t) = \left(\frac{f_n}{f_k} \right)^{\frac{t}{T}},$$

где T - время испытаний; f_n, f_k - начальная и конечная частота испытаний.

Преимуществом этого метода является сравнительно малое

время испытаний (близкое к времени действия землетрясения), а также простота его реализации на имеющемся испытательном оборудовании.

Требуемым спектром испытаний (ТСИ) будем называть зависимость амплитуды колебаний платформы стенда от частоты испытаний. Очевидно, что при выбранном методе испытаний, режим испытаний полностью определяется спектром и временем воздействия.

На рис. 2, 3 приведены спектр воздействия и соответствующая ему акселерограмма испытаний длительностью 20 с.

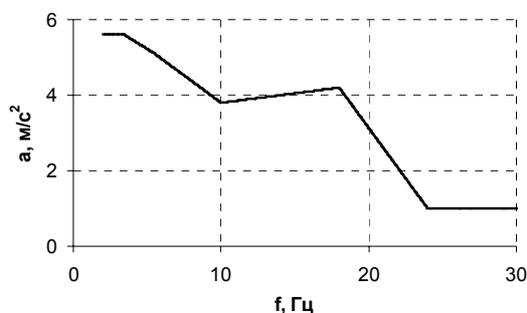


Рис. 2. Спектр воздействия

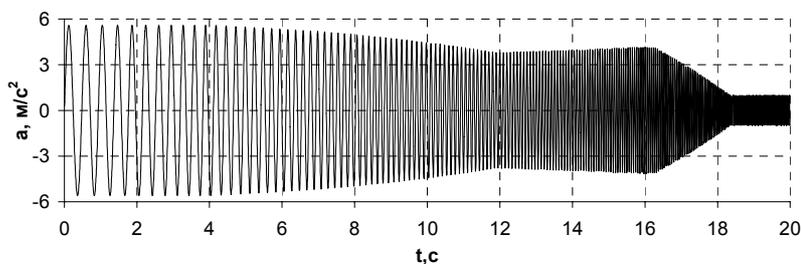


Рис. 3. Зависимость ускорения от времени, соответствующая заданному спектру испытаний

Так как в основу метода расчета ТСИ положен метод решения прямой однозначной задачи, а именно: получение спектра ответа для заданной акселерограммы, разработанная методика условно может быть разделена на две части:

1. Решение прямой задачи – определение спектров реакций (СР) для заданных акселерограмм.

2. Решение обратной задачи – определение ТСИ для заданного СР.

Задача вычисления спектров реакций была принципиально решена еще в 30-е годы прошлого века [3]. Отметим, что во ВНИИ-ЭМ в свое время также были разработаны специальные программы вычисления СР, предназначенные для анализа сложных сотрясений морского и космического оборудования [4].

В данной работе **метод расчета СР** основан на прямом интегрировании ряда дифференциальных уравнений колебаний осцилляторов, имеющих одну степень свободы и одинаковое демпфирование.

Уравнение колебаний осциллятора имеет вид

$$\ddot{x} + 2\zeta\omega\dot{x} + \omega^2x = -a, \quad (1)$$

где x – относительное перемещение, ζ – коэффициент демпфирования (относительно критического), ω – частота осциллятора, a – значение акселерограммы на данной частоте.

При нулевых начальных условиях решение (1) может быть представлено интегралом Дюамеля:

$$x(t) = -\frac{1}{\beta} \int_0^t e^{-\zeta\omega(t-\tau)} \sin \beta(t-\tau) a(\tau) d\tau, \quad (2)$$

где $\beta^2 = \omega^2(1 - \zeta^2)$.

С учетом ненулевых начальных условий решение (2) имеет вид

$$x(t) = x_0 e^{-\zeta\omega t} \cos \beta t + \frac{\zeta\omega x_0 + \dot{x}_0}{\beta} e^{-\zeta\omega t} \sin \beta t - \frac{1}{\beta} \int_0^t e^{-\zeta\omega(t-\tau)} \sin \beta(t-\tau) a(\tau) d\tau \quad (3)$$

Относительную скорость осциллятора можно получить, продифференцировав выражение (3).

При известных значениях x, \dot{x} относительное ускорение легко получить из (1)

$$\ddot{x} = -a - \omega^2x - 2\zeta\omega\dot{x}. \quad (4)$$

Абсолютное ускорение вычисляется как сумма относительного ускорения и ускорения основания $\ddot{x}_a = \ddot{x} + a$.

Таким образом, задача определения спектров ответа сводится к пошаговому выполнению вычислений (1), (4) и определению максимального значения \ddot{x}_a . Увеличение точности достигается использованием квадратичной интерполяции акселерограммы, что позволяет формализовать процедуру вычисления интеграла (3).

В основу **метода расчета ТСИ** положен метод итераций, т.е. многократное решение прямой однозначной задачи, а именно: получение СР для заданной акселерограммы.

Нулевое приближение для ТСИ строится на основе использования известного соотношения теории вынужденных колебаний:

$$S_v = \frac{S_o}{Q},$$

где S_v – амплитуда гармонического воздействия на заданной частоте (ТСИ); S_o – амплитуда отклика одномассовой системы (ТСР); $Q=1/2\zeta$ – добротность системы; ζ – демпфирование системы относенное к критическому.

После построения ТСИ для всех фиксированных частот перехода и использования линейной интерполяции решается прямая задача построения нулевого приближения для СР с учетом всех принятых ограничений (времени воздействия, диапазона частот и характера развертки по частоте). Затем полученное приближение сравнивается с заданным ТСР, определяются масштабные коэффициенты и строится новое приближение для ТСИ. Указанная процедура повторяется несколько раз до достижения заданной степени точности по принципу минимума среднеквадратичных отклонений.

Изложенный метод был реализован в программном обеспечении, предназначенном для выбора и анализа режимов испытаний на сейсмостойкость (спектров испытаний) на основе заданных спектров ответа. Разработанная в среде Delphi5 программа имеет стандартный Windows интерфейс и позволяет:

- вычислить спектр ответа для заданной акселерограммы;
- генерировать акселерограмму для заданного спектра воздействия;
- сравнить расчетный спектр ответа с заданным.

Несмотря на то, что существуют отечественные и зарубежные программы расчета акселерограмм по заданным спектрам ответа, непосредственное сравнение полученных различными способами результатов невозможно, так как эта задача не является однозначной.

С другой стороны, тестирование программы только в части определения спектров ответа (прямая задача) является достаточным для подтверждения правильности, определенного ТСИ, так как всегда можно сравнить спектр ответа, соответствующий найденному спектру воздействия с заданным ТСР.

В качестве верификационного примера был выбран случай задания акселерограммы в виде полусинусоидального импульса, аналитические результаты для которого приведены в [5]. На рис.4 приведены результаты расчета по программе и данные [5], построенные в безразмерных осях - зависимость коэффициента динамичности от частоты осциллятора, отнесенной к частоте импульса для различных значений демпфирования d .

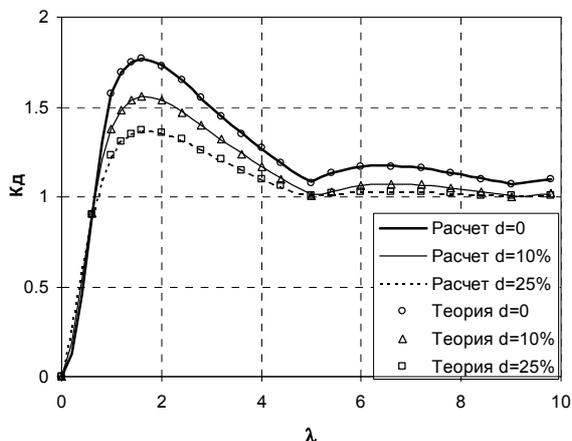


Рис. 4. Теоретические и расчетные зависимости коэффициента динамичности от безразмерной частоты осциллятора для тестового воздействия

Полученные результаты с достаточной степенью точности совпадают с приведенными в литературе [5].

С помощью разработанной программы были определены спектры воздействия для экспериментального подтверждения сейсмостойкости оборудования АЭС «Тяньвань», выбранные таким образом, чтобы соответствующие им испытательные спектры ответа не менее чем на 20% превышали приведенные в разделе 1 заданные спектры ответа (требование МЭК 60780, п.5.3.1.6).

Расчет проводился для значений демпфирования, соответствующих заданным спектрам ответов: 2, 5 и 10% , после чего был выбран наиболее «тяжелый» режим.

Отметим, что полученные выше спектры воздействия для испы-

таний удовлетворяют основному требованию МЭК 980 и охватывают заданный спектр ответа с запасом 20%. Однако одно из требований п.6.5.1 стандарта МЭК 980 к спектру воздействия (испытательному спектру) состоит в том, чтобы пиковое ускорение спектра было не меньше величины ускорения нулевого периода (УНП), относящегося к заданному спектру ответа.

Сразу же отметим, что это требование совершенно не вносит каких-либо увеличений в уровни реакции реального оборудования. Дело в том, что значение УНП соответствует максимальному ускорению в акселерограмме, которое, естественно, реализуется в диапазоне частот максимума ТСР. Это, в частности, показано на примере генерации расчетной акселерограммы (рис. 5). Из полученных данных следует, что максимальное значение ускорения (около 0,5 g) реализуется всего несколько раз с условной частотой меньшей 4 Гц. Легко показать, что на столь низких частотах оборудование является достаточно жестким, и уровни перегрузок по всей конструкции составят также около 0,5 g, что на порядок меньше уровней в диапазоне собственных частот 7–20 Гц.

Тем не менее, указанное требование приходится учитывать. Это связано с тем, что как показывает опыт взаимодействия с инозаказчиками, в ряде случаев совершенно невозможно доказать необходимое отступление от требований МЭК.

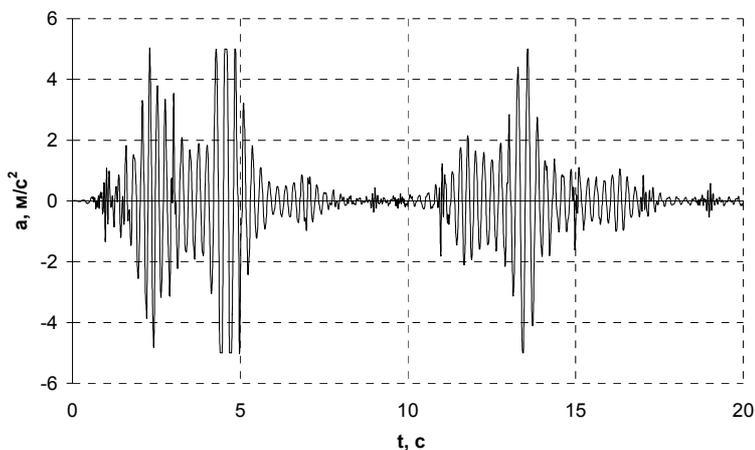


Рис. 5. Расчетная акселерограмма

Одновременный учет требований по плотному охвату спектра ответа и равенства пикового ускорения УНП значительно услож-

нил бы процесс алгоритмизации выбора спектра воздействия, поэтому более рациональным является поэтапное их выполнение.

Значения УНП, заданные Генпроектантом на отметках 23,6 м и 30,8 м, составляют: для горизонтальной компоненты – не более 5 м/с^2 , для вертикальной компоненты – не более 4 м/с^2 .

Полученные с помощью программы спектры испытаний проанализированы на выполнение указанного требования, и в необходимых случаях их пиковое ускорение увеличено до значения УНП.

В окончательном виде спектры испытаний приведены на рис.6.

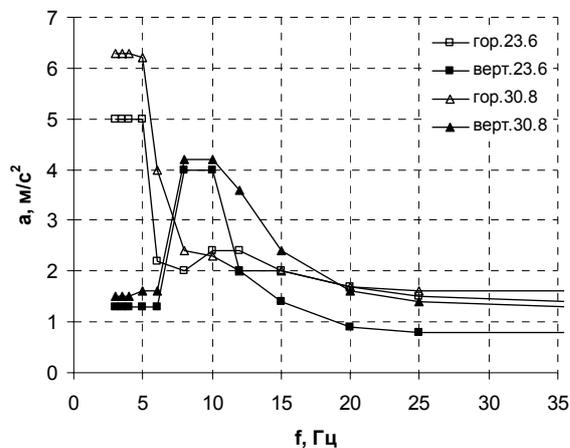


Рис. 6. Спектры испытаний оборудования для АЭС «Тяньвань»

Выводы

1. Выполнен анализ и обобщение исходных требований заданных АЭП СПб и предназначенных для проверки сейсмостойкости ЭО СУЗ АЭС «Тяньвань». Построены требуемые спектры реакции (ТСР) для ряда фиксированных частот в диапазоне проведения испытаний.

2. Разработано и верифицировано программное обеспечение для получения требуемых спектров испытаний (ТСИ) на основе ТСР.

3. Заданы режимы испытания (ТСИ) для ЭО АЭС «Тяньвань», адекватно отражающие исходные параметры землетрясения и требования МЭК.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бирбрайер А.Н. /Расчет конструкций на сейсмостойкость // СПб.: Наука. 1998.
2. Временные требования к режимам эквивалентных механических испытаний и к уровням нагрузок для расчета на прочность электротехнического оборудования атомных энергетических установок для сейсмических районов. ВНИИЭМ. ОАГ.130.003. 1980.
3. Theory of Vibration of Buildings During Earthquake /Biot M.A. // Angewandte Mathematic und Mechanic. 1934. Band 14. Heft 4.
4. Нестационарные колебания элементов электрических машин и аппаратов при действии кратковременных нагрузок /Горшков А.И.// Диссертация на соискание ученой степени кандидата наук. М.: ВНИИЭМ. 1984.
5. Батуев Г.С. и др. /Инженерные методы исследования ударных процессов //М.: Машиностроение. 1977.