

ИССЛЕДОВАНИЕ СЕЙСМОСТОЙКОСТИ АЭС
С ПОМОЩЬЮ ИНЖЕНЕРНО-СЕЙСМОМЕТРИЧЕСКОЙ
СТАНЦИИ

Для аналитического исследования сейсмостойкости сооружений существенное значение имеет правильный выбор расчетной схемы сооружения или, как часто ее называют, аналитической модели. Разработка аналитической модели является наиболее важным этапом расчета, требующим тщательного определения взаимодействия между отдельными элементами сооружения, между сооружением и оборудованием, а также материалом основания. Сооружение типа АЭС обычно моделируют системой дискретных масс, как систему со многими степенями свободы, уравнение движения которой описывается в следующем виде:

$$[M](\ddot{X}) + [C](\dot{X}) + [K](X) = (F(t)), \quad (1)$$

где, $[M]$; $[C]$; $[K]$ — матрицы соответственной массы, демпфирования и жесткости;

(X) ; $(\dot{X})$; $(\ddot{X})$ — векторы смещения, скорости и ускорения;
 $F(t)$ — вектор силовой функции.

Матрица массы часто определяется при предположении, что масса сосредоточена в узловых точках. В результате получается диагональная матрица массы с эффективной массой для каждой степени свободы.

Формулировка матрицы жесткости основана на предположении о линейном отношении силы к деформации. Элементы матрицы жесткости могут быть определены несколькими методами, включающими теорию луча, теорию оболочки и пластинки, метод конечных элементов и т. д.

Демпфирование в системе является сложным явлением, которое включает неупругое действие, гистерезисное демпфирование, вязкое демпфирование и фрикционные силы. Масштабы демпфирования могут зависеть от амплитуды колебания, частоты рабочей температуры, свойств материалов и условий поверхности. В настоящее время не имеется достаточных данных для количественной оценки параметров, которые влияют на демпфирование. Нормальным считается предположение, что демпфирование прямо пропорционально скорости (гипотеза Фойгта). Эта форма сил демпфирования включена в уравнение (1).

Есть предположение, что матрицы затухания можно выразить в виде линейной комбинации матриц массы и жесткости [1], т. е.

$$[C] = \alpha[M] + \delta[K]. \quad (2)$$

Для проверки правильности выбранной расчетной схемы и параметров, входящих в уравнение (1) (распределение масс и жесткостей, значения величин демпфирования), необходимо провести динамические испытания натурных сооружений и крупных моделей под высокими нагрузками.

Наиболее важным видом конструкционных динамических испытаний являются резонансные испытания при установившемся режиме. Такое испытание проводится путем приложения к сооружению синусоидальных сил с постоянной амплитудой и регулируемой частотой. При этом можно построить резонансные кривые, по которым можно определить собственные частоты и затухание.

Формы резонансных кривых могут дать сведения о природе восстанавливающей силы и механизме затухания. Резонансные кривые, полученные для ряда амплитуд возбуждающей силы, дадут также значительную информацию по нелинейным характеристикам сооружения.

Полную картину поведения АЭС во время землетрясения даст только станция инженерно-сейсмометрической службы (ИСС), которая представляет собой набор сейсмических приборов и регистрирующей аппаратуры для регистрации колебаний отдельных точек конструкций и оборудования АЭС во время землетрясения. Записи колебаний сооружений, оборудования и прилегающих участков грунта при землетрясениях являются исходными данными для совершенствования методов расчета зданий и сооружений.

Первой АЭС, построенной в СССР в сейсмоактивной зоне, является Армянская АЭС. Поэтому были приняты все меры для обеспечения ее безопасной работы во время землетрясения. Так как результаты натурных исследований АЭС при сейсмическом воздействии отсутствовали, расчеты велись по нескольким расчетным схемам и с большим коэффициентом запаса. Для получения большого количества данных о работе строительных конструкций и оборудования АЭС во время землетрясения, определения их динамических характеристик и уточнения расчетных схем было решено организовать на Армянской АЭС станцию ИСС.

Вследствие того, что ИСС АЭС содержит очень много приборов и что сильные землетрясения происходят редко, приборы, предназначенные для записей, должны работать в ждущем режиме, то есть запуститься при землетрясении.

Чтобы охватить большой диапазон сейсмических колебаний, необходимо иметь двучкальные или логарифмические сейсмографы или же дополнить чувствительные сейсмографы специальными сейсмографами с пониженной чувствительностью, которые будут давать отсчеты только при сильных толчках. Кроме того, ускорения нельзя получить с требуемой точностью из записей скорости или смещений, вследствие ошибок, связанных с любым возможным методом дифференцирования. Поэтому необходимо предусмотреть также акселерографы для регистрации сильных толчков. По мнению Хаузнера и Хадсона [2] акселерограф для регистрации сильных толчков должен иметь собственный период колебаний менее 0,1 с (предпочтительно около 0,05 с) и регистрировать ускорение порядка $1g$, причем, масштаб диаграммы должен позволять точно измерять ускорение порядка $0,01g$.

Частотные и амплитудные характеристики сейсмоприемников выбирают исходя как из характеристики ожидаемого землетрясения, так и из динамических характеристик сооружений и оборудования, на которых устанавливается сейсмоприемник.

В частности, спектр возможных ускорений на площадке Армянской АЭС имеет максимум $0,4g$ на частоте 3 гц . По предварительным данным собственные частоты сооружений достигают 20 гц и более. В основном наиболее ответственные оборудования имеют собственные частоты от $0,1$ до 10 гц .

Кроме того, необходимо учитывать то обстоятельство, что по высоте сооружения колебания усиливаются и могут при резонансе достигнуть многократного размера.

Этим условием наиболее отвечает приведенная в таблице сеймоаппаратура, выпускаемая отечественной промышленностью в настоящее время [3].

Тип сейсмо- аппаратуры	Приведен- ная длина	Чувствительность для катушки		Собствен- ный период, с	Диапазон регистра- руемых частот, гц	Амплитудный диапазон	Вес, кг	Размеры, мм
		рабочей	затухания					
ОСП	—	15	4	$2 \cdot 10^{-1}$	$0,7 \div 30$	до 1,125 м/с	4,6	$9,4 \times 137$
ВБП—3	$6,5 \cdot 10^{-1}$	10^{-1}	—	$5 \cdot 10^{-1}$ 2	$1 \div 100$	$1 \div 100$ мм	9,8	$230 \times 230 \times 150$
С5С	$4,25 \cdot 10^{-1}$	12,8	6,3	1 5	$0,2 \div 100$	$15 \cdot 10^{-5} \div 15$ мм	11	$350 \times 160 \times 150$
АПТ—1М	—	1,5 в/д	—	10^{-3}	$0,15 \div 500$	$0,2 \div 10^3$ см/с ²	4,6	154×130
ССРЗ	—	14,7 мм/д	—	0,05	$0,1 \div 30$	$15 \div 10^3$ см/сек ²	21	$452 \times 300 \times 285$
СБМ—3	—	—	—	0,25	—	5 $\div$ 10 баллов	20	$440 \times 440 \times 620$
ИГИС—1М	—	—	—	$0,05 \div 1,00$	—	3 $\div$ 10 баллов	70	$805 \times 380 \times 505$

Инженерно-сейсмометрическая станция Армянской АЭС состоит из 28 измерительных пунктов. Они расположены с таким учетом, чтобы решить следующие основные задачи:

1. Выявление пространственной работы основных сооружений Армянской АЭС.
2. Изменение интенсивности колебаний при их передаче от грунта фундаменту, сооружению и основному оборудованию Армянской АЭС.
3. Определение динамических характеристик основных сооружений и оборудования Армянской АЭС.
4. Влияние массы сооружений Армянской АЭС на колебательные характеристики грунта.
5. Уточнение динамических характеристик ожидаемых землетрясений на площадке Армянской АЭС.

Каждый измерительный пункт включает в себя 3 комплекта сейсмографов, состоящих из сейсмоприемников С5С, ВВП-3, ОСП, подключенных через шунтовую коробку ШК-2 к осциллографу на 2 гальванометра ГВ-III-3, что позволяет получить 2 уровня регистрации. Первый комплект аппаратуры предназначается для записи смещений при землетрясениях средней силы и состоит из сейсмоприемников С5С. Увеличение каналов принимается равным 20 (регистрация землетрясений силой 3—4 балла) и 5 (4—6 баллов).

Запись смещений при сильных землетрясениях осуществляется вибрографом ВВП-3. Увеличение каналов принимается равным 1 (6—7 баллов) и 0,25 (7—9 баллов).

Запись ускорений осуществляется акселерометром ОСП. Чувствительность каналов: $1 \text{ см} = 20 \text{ см/с}^2$ (3—5 баллов) и $1 \text{ см} = 100 \text{ см/с}^2$ (5—7 баллов).

После начала серийного выпуска приборов АПТ-1М целесообразно сейсмометрами ОСП комплектовать каналы записи скоростей, а акселерометрами АПТ-1М — каналы записи ускорений.

Измерительные пункты, находящиеся на грунте, дополнительно оснащаются автономными сейсмографами типа СБМ-3 (для измерения интенсивности землетрясений), ИГИС-1М (для прямого определения спектров колебаний во время сильных и разрушительных землетрясений) и ССРЗ-М (для регистрации ускорений колебаний сильных и разрушительных землетрясений).

Для автоматического запуска регистрирующей аппаратуры в момент землетрясения служит пусковое устройство ПУ-1. Оно рассчитано на запуск четырех осциллографов типа НО41 и обеспечивает задержку отключения от 10 до 30 с. Для одновременного включения большого количества регистрирующей аппаратуры на выходе ПУ-1 дополнительно включаются реле 8Э-53.

Вся сейсмоаппаратура перед установкой была калибрована на низкочастотной виброплатформе типа ASE-33T, изготовленной в Японии.

Армянский филиал ВНИИ АЭС

ЛИТЕРАТУРА

1. Biggs I. M. Introduction to structural Dynamics., M. Graw—Hill Book Comp. Inc. New—York., 1964. chapters and appendis.
2. Howsner G. W., Hudson D. E. Earthquake Research problems of Nuclear power plants. „Nuclear Engineering and design“ 1966, v. 3, № 2.
3. Аппаратура и методики сейсмометрических наблюдений в СССР, «Наука», М., 1974.