

## **МЕТОДОЛОГИЯ РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ОТРАБОТКИ СЕЙСМОСТОЙКОСТИ ВСТРАИВАЕМОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

В настоящее время все электрооборудование (ЭО), предназначенное для установки на атомных станциях (АЭС), проходит специальные испытания на стойкость и устойчивость к сейсмическим воздействиям [1,2], уровни которых устанавливаются в ТУ и ТЗ на конкретное ЭО. При этом в зависимости от условий эксплуатации ЭО подразделяется на 2 группы:

Группа «А» – комплектное ЭО (шкафы и пульта), монтируемое непосредственно на строительные конструкции зданий АЭС (перекрытия, колонны, стены).

Группа «В» – встроенное ЭО (панели и субблоки), монтируемое на промежуточные конструкции (шкафы, пульта, трубопроводы, арматуру).

Указанные группы ЭО, предназначенные для АЭС, расположенных на территории РФ, подвергаются сейсмическим воздействиям различной интенсивности согласно ГОСТ17516.1-90 или РД 25818-87 в соответствии с требованиями ТЗ.

Сразу же отметим, что экспериментальная отработка сейсмостойкости ЭО в НПП ВНИИЭМ в основном проводится для оборудования группы «А», т.е. для полностью укомплектованных шкафов, и это в полной мере позволяет подтвердить надежность функционирования поставляемых изделий. Вместе с тем у разработчиков встраиваемого в те же шкафы оборудования (оборудования группы «В») возникают вопросы по требованиям к своим изделиям, которые обычно указываются в частных ТЗ. Кроме того, на наш взгляд, в существующих нормативных документах имеется ряд противоречий, особенно в части требований к режимам испытаний изделий группы «В».

Предложенная в работе методология расчетно-экспериментальной отработки сейсмостойкости встраиваемого оборудования включает:

- сравнительный анализ требований к испытаниям ЭО на сейсмостойкость;

- разработку математической модели типового ЭО выполненного на базе шкафа фирмы «Rittal»;
- расчет спектров вибраций ЭО в условиях испытания на стенде и в условиях раскрепления на АЭС.

#### Анализ требований к испытаниям на сейсмостойкость

Как уже отмечалось, режимы испытаний ЭО для АЭС на сейсмические воздействия различной интенсивности (в зависимости от бальности площадки и высотной отметки) приведены в ГОСТ и РД.

Наиболее четко требования к режимам испытаний ЭО групп «А» и «В» на синусоидальную вибрацию заданы в РД. В частности для наиболее применяемого метода испытаний «качающейся частотой с логарифмической разверткой» зависимость ускорения от частоты для режимов испытаний на сейсмостойкость ЭО для интенсивности землетрясения 9 баллов и уровня установки 70 м над нулевой отметкой для горизонтальных направлений вибрации задана следующим образом:

Частота, Гц	1	2	3	4	5	6	8	10	15	20	30
Ускорение, м/с <sup>2</sup>											
Группа «А»	7	9	12	13	12	11	10	8	6	5	4
Группа «В»	8	15	29	51	49	43	33	31	20	18,5	14

Значение ускорений для вертикального направления воздействия устанавливается с уровнем 0,7 от значений ускорений для горизонтальных направлений.

Коэффициенты пересчета ускорений, заданных в РД, для различных интенсивностей землетрясения и уровней установки приведены в табл. 1.

Таблица 1

Интенсивность землетрясений (баллы по шкале МКС-64)	Значения коэффициентов на уровне установки над нулевой отметкой			
	70-30 м	20 м	10 м	0 м и ниже
9	1,0	0,8	0,4	0,25
8	0,5	0,4	0,2	0,12
7	0,25	0,2	0,1	0,06
6	0,12	0,1	0,05	0,03
5	0,06	0,06	0,03	0,02

Отметим, что согласно РД (п. 2.7) испытания изделий, относящихся к группе «А», проводятся даже при условии комплектации

последних изделиями, испытанными по группе «В». Данное положение РД (п.2.7) означает, что отдельные испытания встраиваемого оборудования являются предварительными и не позволяют судить о надежности его функционирования в составе скомплектованного изделия. Это действительно так, потому что вибрационные режимы существенным образом зависят от динамических характеристик несущей конструкции изделия (шкафа) и, как показывает практика, никогда не совпадают с режимами для группы «В».

По ГОСТ требования предъявляются только для стационарных изделий (т.е. группы «А») по максимальным ускорениям и соответствующим частотам (спектру) синусоидальной вибрации (см. рис.1 приложения 6 ГОСТ). Вместе с тем в ГОСТ приведены обобщенные спектры ответа при различных коэффициентах относительного демпфирования (см. рис.2, приложения 6 ГОСТ), которые предназначены для расчетно-экспериментальной оценки изделий на соответствие требований по сейсмостойкости. Эти данные могут быть использованы для установки требований к испытаниям изделий группы «В», при этом необходимо иметь достоверные данные по демпфированию конкретной конструкции. Наиболее часто используемое значение демпфирования в строительных конструкциях соответствует добротности (коэффициенту усиления на резонансной частоте) равной 10 или 5% относительному демпфированию. Указанное значение демпфирования подтверждается также практикой испытаний ЭО в НПП ВНИИЭМ.

Зависимости ускорения от частоты для режимов испытаний ЭО на сейсмостойкость в горизонтальном направлении для интенсивности землетрясения 9 баллов по шкале MKS-64 на уровне установки ЭО 0 м по данным ГОСТ имеют вид:

Частота, Гц	1	2	4	5	8	10	12	15	20	25	30
Ускорение, м/с <sup>2</sup>											
Группа «А»	1	2,6	5	5	4	3,2	2,5	2,3	2	1,8	1,5
Группа «В»	7	18	31,5	30	24,5	21,5	15	14	12,5	10,5	9

Значения ускорений для изделий группы «В» определены для относительного демпфирования 5%.

Значение ускорений для вертикального направления воздействия устанавливается с уровнем 0,7 от значений ускорений для горизонтальных направлений.

Коэффициенты пересчета ускорений, заданных в ГОСТ, для различных интенсивностей землетрясения и уровней установки приведены в табл. 2.

Таблица 2

Интенсивность землетрясений в баллах по шкале MKS-64	Значения коэффициентов на уровне установки над нулевой отметкой		
	70-30 м	20 м	10 м и ниже
9	2,5	2,0	1,0
8	1,25	1,0	0,5
7	0,6	0,5	0,25
6	0,3	0,25	0,12
5	0,15	0,12	0,06

Сравнительный анализ требований ГОСТ и РД проведем для максимально возможных воздействий, т.е. для уровня установки 30-70 м и интенсивности землетрясения 9 баллов. На рис.1,2 приведены соответствующие спектры режимов испытаний ЭО групп «А» и «В», соответственно.

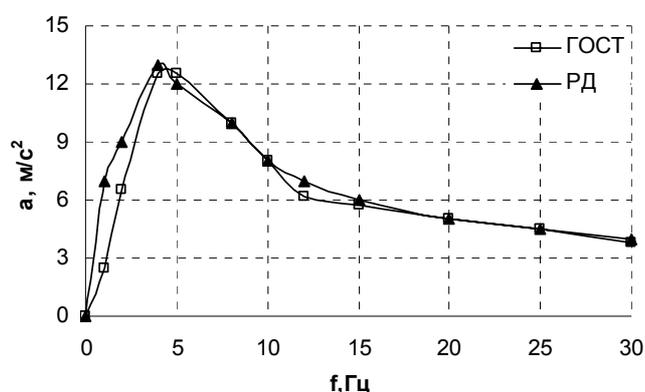


Рис.1. Спектры режимов испытаний ЭО группы «А»

Нетрудно видеть, что требования ГОСТ и РД для ЭО группы «А» практически идентичны при частоте выше 4 Гц, а для ЭО группы «В» требования ГОСТ во всем диапазоне частот примерно в 1,5 раза больше, чем требования РД. Еще раз напомним, что использовались данные ГОСТ для 5% относительного демпфирования.

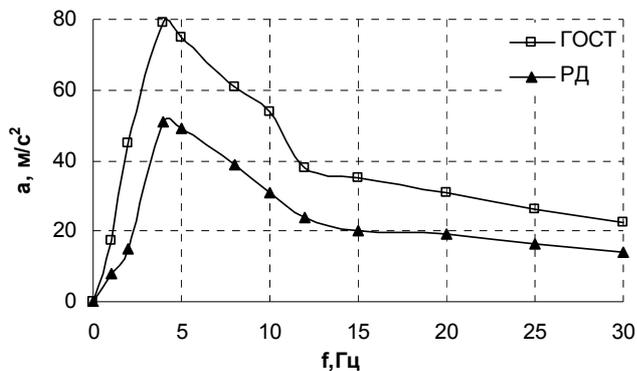


Рис.2. Спектры режимов испытаний ЭО группы «В»

### Математическая модель типового ЭО, выполненного на базе шкафа фирмы «Rittal»

Для выполнения расчетов вибрационных полей в реальном оборудовании при испытаниях на сейсмостойкость опытного образца шкафа фирмы «Rittal» была составлена математическая модель с использованием пакета программ, основанных на применении метода конечных элементов. При составлении модели использовались данные по динамическим характеристикам шкафа фирмы «Rittal», испытания которого проводились в НПП ВНИИЭМ.

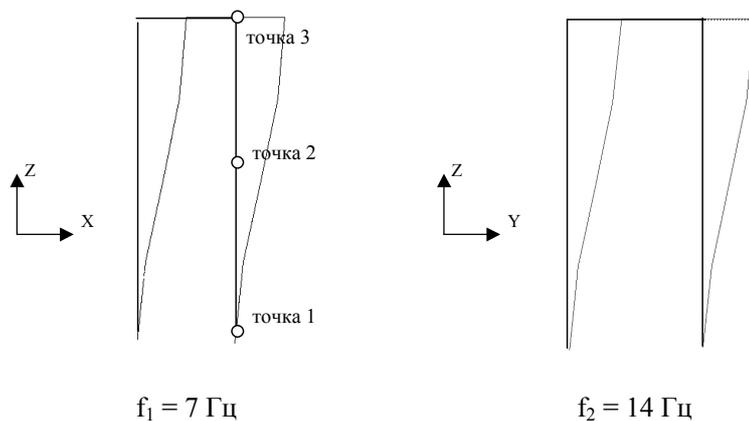


Рис.3. Низшие формы колебаний шкафа

При формировании модели использовалось:

- соответствие геометрических и массовых характеристик;
- соответствие жесткостных характеристик по данным натурных испытаний на обнаружение резонансных частот.

Составленная конечно-элементная модель представляла собой стержневую систему с габаритными размерами 400x800x2000 мм. Вся массовая нагрузка около 400 кг была равномерно распределена в четырех основных несущих вертикальных стержнях.

На рис.3 приведены формы колебаний конструкции для двух первых собственных частот 7 и 14 Гц, определенных при испытаниях в горизонтальных направлениях.

#### Расчеты спектров вибраций ЭО в условиях испытания на стенде и в условиях АЭС

Расчеты спектров вибраций проводились в соответствии с методикой, изложенной в [3].

Целью расчета являлось определение спектров ускорений в местах крепления встроенного оборудования. Для этого было выделено три расчетных сечения в нижней, средней и верхней плоскости шкафа (точки 1,2,3 на рис.3). Расчет проводился для нагружения в горизонтальном направлении в плоскости наименьшей жесткости шкафа, т.е. для случая, при котором возникают максимальные вибрации на оборудовании. Режим нагружения соответствовал спектру гармонических воздействий, реализуемому на стенде для максимально возможного землетрясения (см. рис.1).

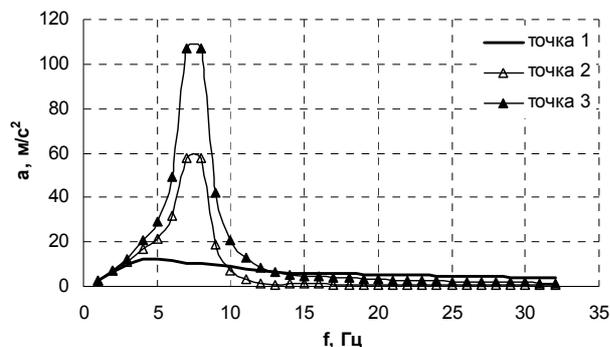


Рис.4. Ускорения в точках модели без раскрепления

Демпфирование в системе выбрано специальным образом, чтобы коэффициент усиления вибраций на резонансной частоте в

верхней плоскости шкафа равнялся 10 (при натуральных испытаниях шкафа этот коэффициент в различных случаях нагружения имел величину от 7 до 14).

На рис. 4 приведены уровни вибраций для математической модели шкафа фирмы «Rittal» без учета возможного раскрепления на АЭС (т.е. в условиях испытания на стенде), а на рис.5 - с учетом раскрепления в верхней части шкафа. Обозначения точек соответствуют рис.3.

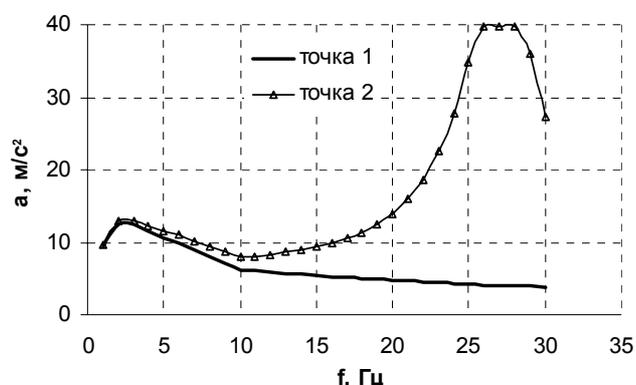


Рис.5. Ускорения в точках модели с дополнительным раскреплением

Как и следовало ожидать уровни вибраций, которые должна выдерживать встроенная аппаратура, существенным образом зависят от ее расположения по высоте шкафа, динамических характеристик (жесткости) силовой конструкции, условий раскрепления изделий на АЭС.

Для сравнительного анализа на рис.6 приведены требования для спектров ускорений в местах крепления встроенного оборудования, а также расчетные значения этих спектров для математической модели шкафа фирмы «Rittal» без учета возможного раскрепления на АЭС (т.е. в условиях испытания на стенде) и с учетом раскрепления в верхней части шкафа. Графики построены для дискретных значений частот, заданных в РД для группы В.

Сопоставление результатов расчетов и требований показывает существенное их различие, как по уровням воздействий, так и по спектральному составу. Как и следовало ожидать, уровни вибраций при испытаниях нераскрепленного изделия в области наиболее опасных низких частот существенно (почти на порядок) превышают уровни вибраций для оборудования раскрепленного на АЭС.

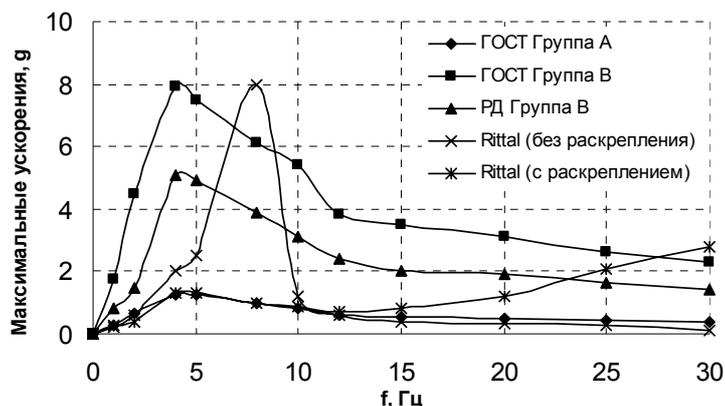


Рис.6. Расчетные и требуемые спектры ускорений

Таким образом, требования по сейсмостойкости для встроенного оборудования для изделий раскрепленных в условиях АЭС могут быть существенно снижены.

### Выводы

Выполненные расчеты спектров вибраций ЭО в условиях испытания на стенде и в условиях раскрепления на АЭС показывают существенное различие требований по вибрациям встроенного оборудования, как по уровням воздействий, так и по спектральному составу.

Показано, что требования по сейсмостойкости для встроенного оборудования для изделий раскрепленных в условиях АЭС могут быть существенно снижены, так как в этих условиях уровни вибраций в области наиболее опасных низких частот существенно (почти на порядок) ниже уровней вибраций при испытаниях нераскрепленного изделия.

Для внедрения разработанной методологии подтверждения сейсмостойкости встраиваемого оборудования необходимо:

- сформировать базы данных по динамическим характеристикам (определяемым в процессе проведения испытаний) шкафов различных типоразмеров;
- разработать программное обеспечение для формирования требований к сейсмостойкости встроенного оборудования с целью автоматизированного учета имеющейся базы экспериментальных данных, геометрических и массовых характеристик ЭО, конкрет-

ных требований по сейсмостойкости, условий раскрепления изделий на АЭС.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Бирбрайер А.Н. Расчет конструкций на сейсмостойкость. СПб.: Наука. 1998.
2. Кириллов А.П., Амбриашвили Ю.К. Сейсмостойкость атомных электростанций. М.: Энергоатомиздат. 1985.
3. Расчетно-экспериментальный метод подтверждения сейсмостойкости оборудования АЭС / Белостоцкий А.М., Геча В.Я., Горшков А.И., Канунникова Е.А. // См. наст. том.