

## ПРИМЕНЕНИЕ РАСЧЁТНОГО МЕТОДА ДЛЯ ПОДТВЕРЖДЕНИЯ СЕЙСМОСТОЙКОСТИ ОБОРУДОВАНИЯ

В.В. Каверин, Е.А. Канунникова,  
Н.А. Красова, А.Ю. Рузаков  
(ФГУП «НПП ВНИИЭМ»)

*Предложен алгоритм подтверждения сейсмостойкости оборудования расчётным методом, и определены границы его применения. Разработана математическая модель оборудования, и приведён пример определения собственных частот, напряжений и перемещений в конструкции. Применение расчётного метода позволяет значительно снизить объём испытаний при подтверждении сейсмостойкости оборудования.*

**Ключевые слова:** сейсмостойкость, динамические характеристики, расчёт на прочность, резонансная частота, конечно-элементная модель.

### Введение

Работы по подтверждению сейсмостойкости оборудования различного назначения обусловлены активным строительством объектов в сейсмоопасных зонах, изменением нормативных документов в части сейсмостойкости и созданием новых видов оборудования (в том числе крупногабаритного), к которым ранее не предъявлялись требования по сейсмостойкости.

В настоящее время существует общая тенденция к уменьшению количества испытаний, натурных макетов, применению более щадящих режимов испытаний. Требования в части сейсмостойкости по-разному регламентируются в отечественных и зарубежных стандартах. В России основным требованием является ГОСТ 17516.1 – 90 (Изделия электротехнические. Общие требования в части стойкости к механическим внешним воздействующим факторам) для введённых в эксплуатацию АЭС и нормы проектирования НП-031-01 для вновь строящихся. Из зарубежных стандартов основополагающим в части сейсмостойкости (сейсмической квалификации) является стандарт МЭК 60980. Эти же стандарты содержат рекомендации по применению расчётного метода для подтверждения сейсмостойкости.

В соответствии с требованиями ГОСТ 17516.1 – 90 допускается подтверждать сейсмостойкость расчётным методом для электродвигателей, генераторов, трансформаторов, изделий, не содержащих измерительные приборы. В случае внесения изменений в конструкцию ранее испытанного оборудования требуется наличие протоколов испытаний на электронные блоки или проведение их автономных испытаний. Расчётный метод позволяет произвести подтверждение сейсмостойкости крупногабаритного оборудования, оборудования,

уже находящегося в эксплуатации (например при модернизации), даёт возможность обобщить результаты испытаний на сейсмостойкость одного изделия на серию аналогичных изделий [1]. Важной является также возможность прогнозировать результаты испытаний и производить их расчётную коррекцию при невозможности создания для них штатных условий.

Расчётный метод включает в себя несколько основных этапов:

- анализ требований;
- создание математической модели оборудования;
- расчёт на заданные нагрузки.

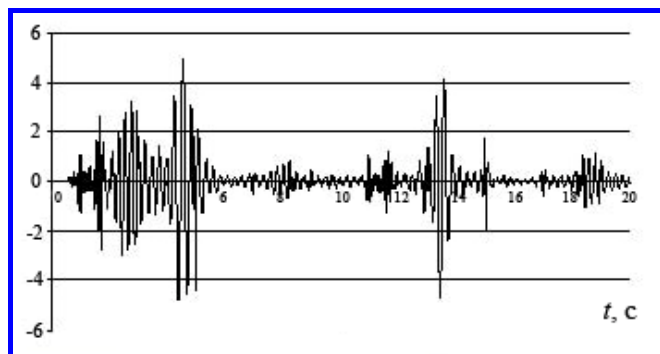
Существует несколько способов задания сейсмических воздействий [2], основные из них – акселерограмма землетрясения, спектры ответа или уровень воздействия в баллах по шкале MSK-64 (рис. 1 и таблица).

### Алгоритм проведения расчёта на сейсмостойкость

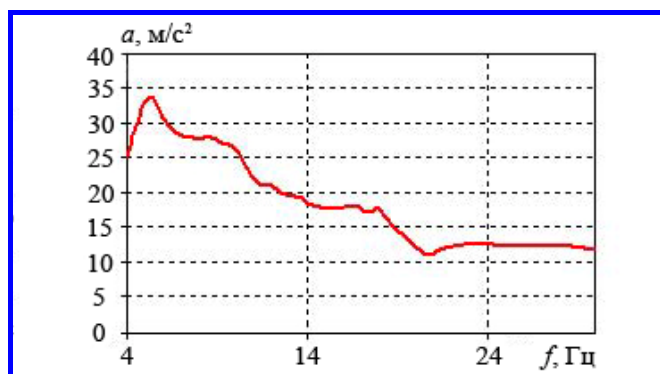
При расчётном подтверждении сейсмостойкости, как видно из алгоритма (рис. 2), используются два основных типа расчёта – статический и динамический. В статическом расчёте вычисляются напряжения и перемещения в конструкции, проводится их сравнение с допускаемыми для применяемых материалов значениями, на основании чего делается вывод о прочности конструкции при сейсмических воздействиях [3]. Результатом динамического расчёта являются ускорения в местах установки аппаратуры. Сравнение полученных значений ускорений с допустимыми для электронных блоков позволяет сделать вывод о стойкости электрооборудования к сейсмическим воздействиям.

### Уровень воздействия по шкале MSK-64 и отметка установки

Интенсивность землетрясения, баллы по MSK-64	Коэффициент для уровней установки над нулевой отметкой, м		
	70 – 30	20	10 и ниже
9	2,5	2,00	1
8	1,25	1,00	0,5
7	0,6	0,50	0,25
6	0,3	0,25	0,12
5	0,15	0,12	0,06



а



б

Рис. 1. Способы задания сейсмических воздействий: а – акселерограмма землетрясения; б – спектр ответа



Рис. 2. Алгоритм проведения расчёта на сейсмостойкость

### Создание конечно-элементной модели шкафа

Конечно-элементная модель оборудования создается на основе конструкторской документации, которая может быть представлена в виде бумажных или электронных чертежей, а также в виде трёхмерной модели. Наиболее часто встречаются первые два варианта, по ним приходится фактически заново создавать геометрию конечно-элементной модели в препроцессоре или программе трёхмерного моделирования.

При наличии 3D-модели (рис. 3) геометрическая модель импортируется в расчётный комплекс, что существенно сокращает трудозатраты. Геометрическая модель разбивается на конечные элементы, задаются свойства материалов, и прикладываются граничные условия.

### Виды расчётов

При подтверждении сейсмостойкости электрооборудования используются следующие виды расчётов:

- *статический расчёт*. Условия нагружения задаются в виде инерционной нагрузки вдоль заданной оси. Значение ускорения определяется исходя из значения спектра ответа на низшей резонансной частоте. Из расчёта определяются напряжения в элементах конструкции;
- *определение форм и частот колебаний*. Значение низших частот позволяет оценить жёсткость конструкции. Значение резонансных частот ниже 5 Гц, как правило, свидетельствует о недостаточной жёсткости конструкции;
- *расчёт на заданную акселерограмму* – расчёт отклика системы, основанный на интегрировании уравнений движения [3];
- *гармонический анализ* – метод динамического расчёта, основанный на разложении отклика по формам колебаний. Результатом расчёта является амплитуда установившихся вынужденных колебаний на каждой частоте вынуждающей силы. С использованием этого метода определяются перегрузки в местах установки оборудования при гармоническом воздействии.

### Пример применения расчётного метода

Для расчёта был выбран шкаф ШРП, спроектированный на основе несущего каркаса TS8 фирмы Rittal. Была создана конечно-элементная модель в программном комплексе MSC Patran, которая использовалась для всех видов расчёта.

Для моделирования несущих элементов конструкции (рамы, усиления) использовались балочные элементы. Стенки моделировались оболочечными элементами. Толщины элементов конструкции соответствуют толщинам, указанным в чертежах. Приборы смоделированы 3D-объёмными элементами. Для крепления шкафа к цоколю, крепления дверей и для моделирования петель и замков использовались жёсткие связи. Вес шкафа составляет 550 кг. Модель содержит 4733 конечных элементов и 6841 узлов.

В ходе работы было выполнено три вида расчётов: определение собственных частот, расчёт на прочность и гармонический анализ.

Результаты расчёта собственных частот и форм колебаний приведены на рис. 5.

Низшая собственная частота шкафа составила 6,7 Гц.

С учётом значений собственных частот определяются нагрузки для расчёта на прочность, которые выбираются исходя из низшей резонансной частоты по обобщённому спектру ответа с учётом интенсивности землетрясения и высоты установки оборудования в соответствии с ГОСТ 17516.1–90.

Для определения значения параметра демпфирования конструкции используются либо результаты испытаний аналогичных шкафов, либо рекомендованное МЭК 60980 значение 7%. В данном случае значение демпфирования было принято равным 5% в соответствии с протоколами испытаний аналогичного шкафа.

Расчёт проводится при одновременном действии нагрузок в вертикальном и одном из горизонтальных направлений. Соответственно рассматриваются два случая:  $X+Z$ ,  $Y+Z$ .

На рис. 6 показаны картины распределения эквивалентных напряжений, в соответствии с которыми наиболее нагруженной частью конструкции является цоколь. Максимальные напряжения составили 179 МПа, запас по пределу прочности составил 2,4.

По результатам расчёта можно сделать вывод, что запас прочности шкафа ШРП достаточен для сейсмического воздействия уровня 9 баллов на высоте до 20 м.

Для определения нагрузок на блоках оборудования был выполнен динамический расчёт с использованием метода гармонического анализа.

Нагрузка задавалась в виде зависимости амплитуды гармонического воздействия на основании шкафа от частоты (рис. 7) [3]. Расчёт проводился последовательно по осям  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ . В качестве примера приводится расчёт в направлении оси  $X$ .

Результатом расчёта являются ускорения во всех узлах модели. На рис. 8 показан график ускорения от частоты по оси  $X$  для трёх характерных мест установки блоков – в верхней части, середине и нижней части шкафа.

Как видно из рис. 8, в данном случае блоки, установленные в верхней части шкафа, должны быть работоспособны при перегрузке в  $13g$  на частотах 7 – 10 Гц, в средней части – при  $11g$ , и в нижней части – при  $8g$ . Значения допустимых перегрузок для блоков могут быть получены из технического паспорта, автономных испытаний блока или испытаний другого шкафа аналогичным блоком электроники. Сравнивая допустимые нагрузки на аппаратуру с расчётными значениями для места установки, делается заключение о сейсмостойкости шкафа.

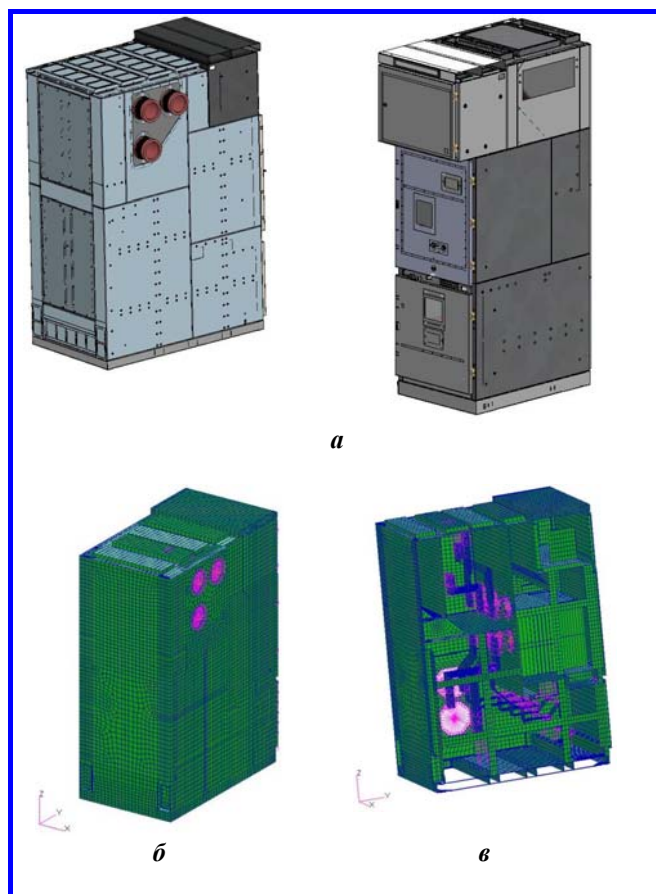


Рис. 3. 3D-модель и созданная на её основе конечно-элементная модель: *a* – 3D-модели (Solid); *б* – КЭМ в сборе; *в* – внутреннее устройство

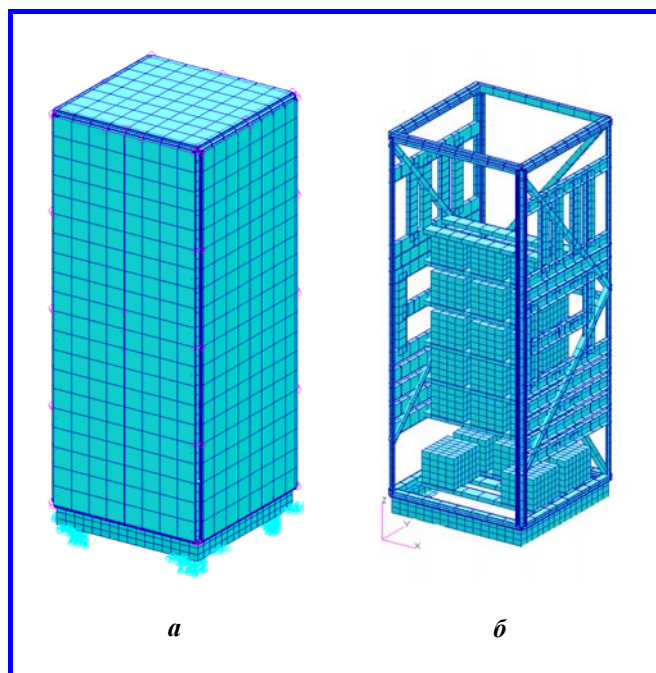


Рис. 4. Конечно-элементная модель шкафа ШРП: *a* – внешний вид; *б* – вид без стенок

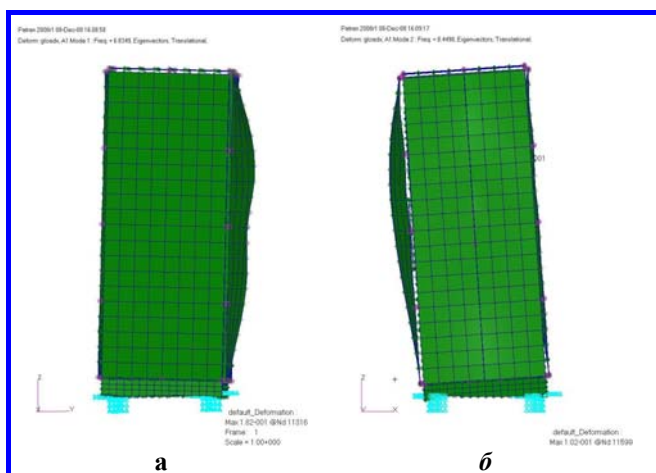


Рис. 5. Низшие формы колебаний шкафа:  
 $a - f_1 = 6,7$  Гц;  $b - f_2 = 8,5$  Гц

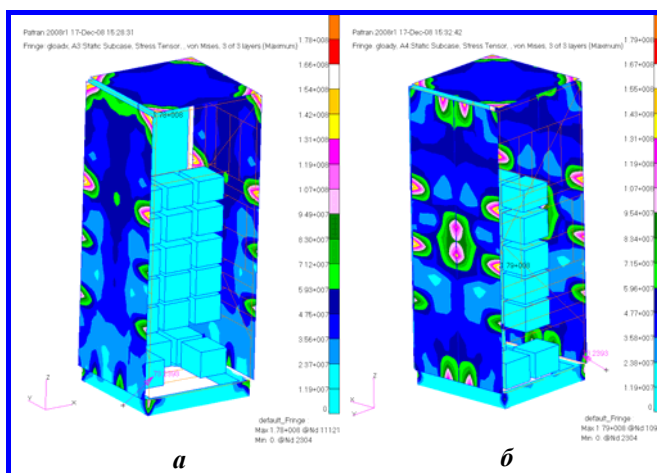


Рис. 6. Распределение эквивалентных напряжений:  
 $a -$  нагрузка  $a_x = 6g, a_z = 4,2g$  (напряжения, МПа);  
 $b -$  нагрузка  $a_y = 6g, a_z = 4,2g$  (напряжения, МПа)

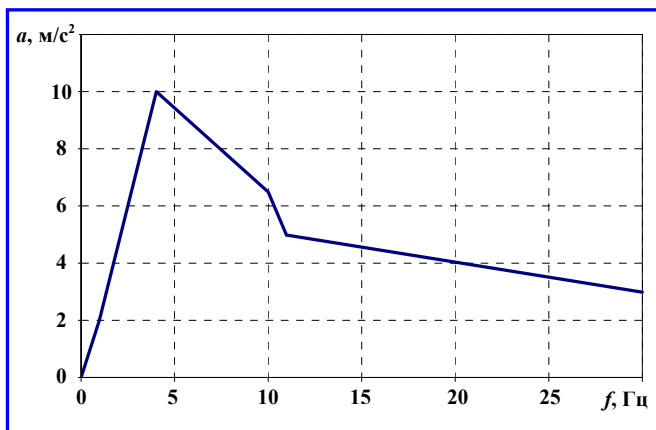


Рис. 7. Зависимость амплитуды воздействия от частоты

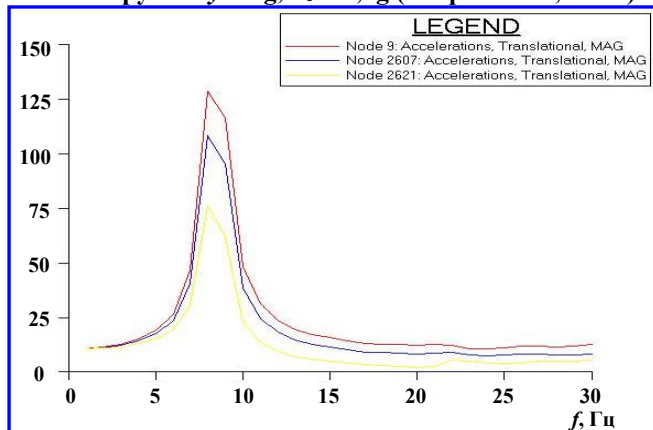


Рис. 8. Расчётные ускорения в местах крепления блоков. Ось X

### Заключение

Развитие расчётных программ и аппаратного обеспечения позволило существенно улучшить качество подготовки моделей, использовать сложные динамические расчёты. Это позволяет значительно снизить объём испытаний при подтверждении сейсмостойкости оборудования. Однако расчётный метод имеет недостатки, связанные прежде всего с невозможностью расчёта блоков электроники и необходимостью верификации расчётных моделей.

### Литература

1. Белостоцкий А. М. Расчётно-экспериментальный метод подтверждения сейсмостойкости оборудования АЭС / А. М. Белостоцкий, В. Я. Геча, А. И. Горшков [и др.] // Вопросы электромеханики. Обеспечение безопасности электрооборудования энергетических реакторов атомных электростанций. Труды НПП ВНИИЭМ. – М. : НПП ВНИИЭМ, 2004. – Т. 101. – С. 58 – 68.
2. Бирбрайер А. Н. Расчёт конструкций на сейсмостойкость / А. Н. Бирбрайер. – СПб. : Наука, 1998. – 255 с. : ил.
3. Кириллов А. П. Сейсмостойкость атомных электростанций / А. П. Кириллов, Ю. К. Амбриашвили. – М. : Энергоатомиздат, 1985. – 184 с. : ил..

Поступила в редакцию 04.02.2011

*Владимир Викторович Каверин, мл. научн. сотрудник.*  
*Елена Александровна Канунникова, канд. техн. наук начальник лаборатории.*  
*Наталья Алексеевна Красова, мл. научн. сотрудник.*  
*Алексей Юрьевич Рузаков, мл. научн. сотрудник.*  
 Т. (495) 366-33-66, e-mail: vniiem@vniiem.ru.