

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБОРУДОВАНИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ И ЗАЩИТЫ АЭС И ЕГО ИСПЫТАНИЯ НА ВОЗДЕЙСТВИЯ ОТ УДАРА САМОЛЁТА И ВОЗДУШНОЙ ВОЛНЫ

Е.В. Афромеев, Н.А. Красова,
А.А. Рузаков, И.Н. Хиблин
(ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ»)

Приведены результаты испытаний оборудования системы управления и защиты (СУЗ) для Нововоронежской АЭС на воздействия от удара самолёта и воздушной ударной волны методом одиночного импульса. Проанализированы требования к оборудованию СУЗ АЭС, обоснованы режимы испытаний. Представлены результаты идентификации математических моделей типового оборудования по результатам испытаний.

Ключевые слова: электрооборудование СУЗ АЭС, удар самолёта, воздушная ударная волна, спектр удара, режим испытаний.

Введение

Согласно нормам [1], при проектировании АЭС должна быть проанализирована опасность всех возможных природных и техногенных внешних воздействий, к которым относятся взрывная волна и удар летательного аппарата.

Вопрос о защите АЭС от удара самолёта впервые возник в 60-е гг. XX в. Это техногенное воздействие является одним из самых опасных. Его обязательный учёт предусмотрен российскими нормами проектирования АЭС [1, 2], а также зарубежными нормами, отражёнными в рекомендациях МАГАТЭ [3, 4].

При воздействии воздушной ударной волны (ВУВ) и удара самолёта (УС) на установленное в здании АЭС оборудование передаются инерционные нагрузки, при которых оно должно выполнять свои функции.

В данной работе приведены результаты испытаний оборудования системы управления и защиты (СУЗ) для Нововоронежской АЭС (НВ АЭС) на воздействия от удара самолёта и воздушной ударной волны, включающие анализ требований к оборудованию, установленному на АЭС, обоснование режимов испытаний, контроль при испытаниях и анализ результатов испытаний. Представлены результаты идентификации математических моделей типового оборудования по результатам испытаний.

Анализ заданных требований к оборудованию АЭС

Ускорения, передающиеся на оборудование внутри здания при воздействиях ВУВ и УС, как и при землетрясении, задают посредством поэтажных спектров ответа [5].

Сравнение спектров при максимально расчётном землетрясении (МРЗ), УС и ВУВ (рис. 1) показывает,

что сейсмический спектр достигает максимальных значений на частоте около 8 Гц, где ускорения ВУВ и УС малы. Максимумы спектров ВУВ и УС соответствуют частоте 30 Гц, где сейсмический спектр минимален. Поскольку оборудование, установленное на АЭС, требуется защитить от всех рассмотренных воздействий, то такая разница в местах максимальных значений ускорений по частоте вызывает сложности при формировании общих требований.

Из рис. 1 также видно, что спектр ускорений для ВУВ существенно превышает спектр для УС, поэтому испытания на ВУВ закроют оба требования.

Для группы «А» в соответствии с принятыми российскими ГОСТами основным критерием выполнения требований при испытаниях является превышение спектра испытательного воздействия над заданным спектром с некоторым квалификационным запасом. Для встроенного, монтируемого на промежуточные конструкции оборудования, в том

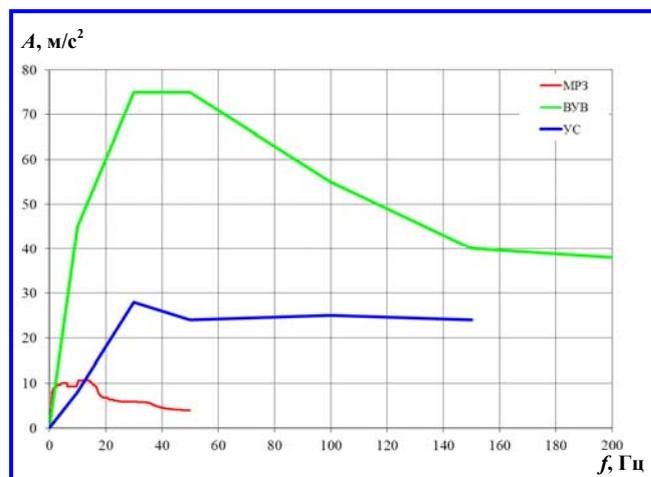


Рис. 1. Спектры ответа ускорений МРЗ, ВУВ, УС для оборудования НВ АЭС

числе на шкафы, пульта, панели (группа «В»), должен быть учтён факт усиления колебаний на промежуточных конструкциях заданием дополнительного коэффициента или использования спектров ускорений для группы «А» в качестве режимов для оборудования группы «В».

Режимы испытаний оборудования СУЗ АЭС и контроль параметров

ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ» более 40 лет разрабатывает и поставляет на АЭС электрооборудование СУЗ, имеет большой опыт в его разработке и сборке. Испытания оборудования СУЗ АЭС проводятся в испытательном центре в лаборатории механических испытаний.

Для проведения вибрационных и ударных испытаний лаборатория оснащена электродинамическими виброустановками (вибростендами) (рис. 2). Ударные воздействия реализуются в трёх взаимно-перпендикулярных направлениях, вдоль вертикальной оси Z и двух горизонтальных X, Y .

Управление и сбор необходимой информации осуществляется путём подключения вибропреобразователей (датчиков) к генератору электрических импульсов. Возможное количество одновременно подключаемых датчиков определяется 36 каналами генератора, из которых 16 каналов могут быть использованы как каналы управления.

Испытаниям на воздействие ВУВ и УС лучше всего соответствует метод воздействия одиночных импульсов. На начальном этапе оператор, пользуясь программным обеспечением, формирует необходимый эталонный импульс удара. Он описывает необходи-

мую форму изменения ускорения в переходном процессе, который будет воздействовать на объект испытания. На основе эталонного импульса генератор формирует «приводной сигнал» и через усилитель реализует его на стенде, нагружая тем самым испытываемый объект.

Для формирования эталонного импульса вибраторы выставляются в исходное положение.

Эталонный импульс (рис. 3) состоит из:

- основного импульса (определяет пиковый уровень воздействия);
- предварительного и последующего импульса (обеспечивают в начале и в конце основного воздействия значения смещения и скорости равные нулю).

Для максимально точного соответствия эталонной характеристики ударного импульса при проведении испытаний «приводной сигнал» непрерывно обновляется за счёт информации, получаемой генератором по системе «обратной связи» с контрольных датчиков, установленных на стенде.

При ударном импульсе существует опасность превышения заданного пикового уровня. Для предотвращения перегрузок необходимо задать ограничения, в пределах которых процесс управления должен формировать реализуемый импульс, т. е. ввести условия аварийного завершения работы стенда (рис. 4). Если установленные пределы будут превышены, то испытание будет остановлено. Границы безопасности состоят из уровней аварийного выключения и уровней предупреждения.



Состав вибростенда ES-180:

- станина с вибратором на пневморессорах;
- усилитель;
- станция водоснабжения (для охлаждения);
- воздушный компрессор.

Виды воздействий:

- гармоническая синусоидальная вибрация (Sin);
- широкополосная случайная вибрация (ШСВ);
- ударные импульсы различных форм (Shock);
- виброудар (Shock SRS).

Стенд способен реализовывать:

- вибрационные воздействия в диапазоне от 3,5 до 2200 Гц с ускорением до 98 g;
- ударные воздействия до 200 g.

Масса испытуемого оборудования до 1500 кг

Рис. 2. Электродинамический вибростенд ES-180 с установленным на нём шкафом электрооборудования СУЗ

Пределы уровней аварийного завершения и предупреждения определяются в процентах от пикового уровня импульса.

На этапе формирования эталонного импульса система управления подаёт на стенд сигналы уменьшенного уровня (-18, -9, -3 дБ), так называемые промежуточные воздействия. Уровни и количество таких воздействий устанавливает оператор в диалоговом окне. На каждом промежуточном шаге система реализует несколько ударных импульсов, их число устанавливает оператор. В итоге, сформировав необходимую форму ударного импульса, система воспроизводит сигнал полной силы (-0 дБ), форма которого должна быть максимально идентична форме эталонного ударного импульса.

При проведении испытаний шкафа с оборудованием СУЗ АЭС необходимо имитировать штатные условия размещения и крепления шкафа. Для этого используется жёсткая стальная плита, которая имитирует пол помещения АЭС. Всё оборудование должно быть штатно размещено.

Формирование режима по спектру ответа является отдельной сложной и интересной задачей, которая подробно будет рассмотрена в другой статье. В связи с этим здесь приведен только выбранный режим, и показано, что он удовлетворяет заданным выше требованиям (рис. 5).

Необходимые параметры для испытания шкафа СУЗ АЭС вводятся в настройки генератора путём формирования программы испытаний:

- ударный импульс синусоидальной формы;
- ускорение ударного импульса 7g;
- длительность ударного импульса 20 мс;
- пределы аварийного выключения из расчёта не более 30% от характеристики эталонного импульса;
- режим сигнала полной силы (-0 дБ) за два промежуточных шага (-9 и -4,5 дБ).

Во избежание возможного неоправданного разрушения объекта испытаний первоначально проводят испытания с весовым макетом шкафа для получения исходных данных и отработки испытательного режима. Убедившись, что реализуемый на стенде ударный импульс имеет необходимую характеристику, устанавливают на стенд реальный объект (шкаф СУЗ АЭС). По настроенной программе проводят испытания.

Оценка реализуемого временного сигнала даёт возможность говорить, что проведённые испытания полностью соответствуют требованиям программы ударных испытаний по имитации воздействия от падения самолёта и воздушной ударной волны для шкафа СУЗ АЭС.

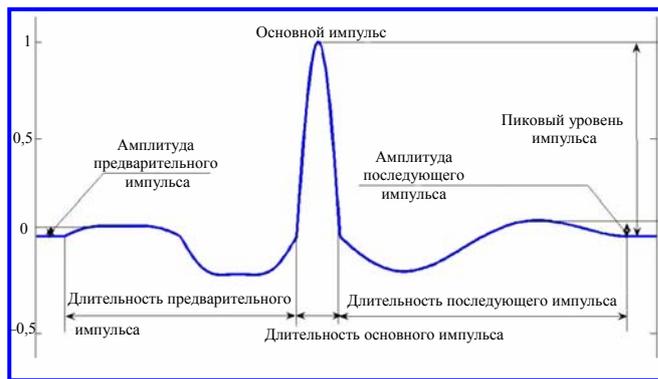


Рис. 3. Эталонный импульс безопасности состоит из уровней аварийного выключения и уровней предупреждения

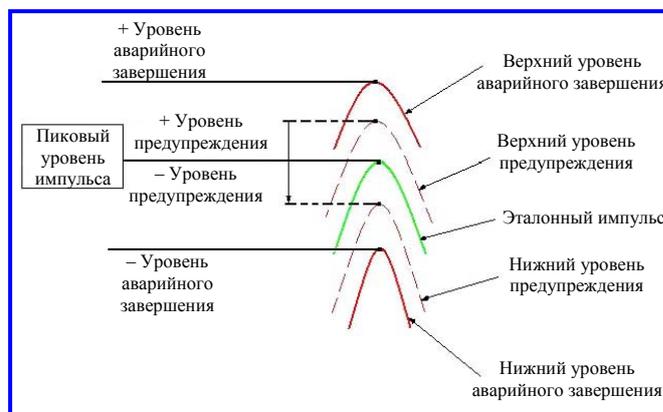


Рис. 4. Пределы аварийного завершения и предупреждения

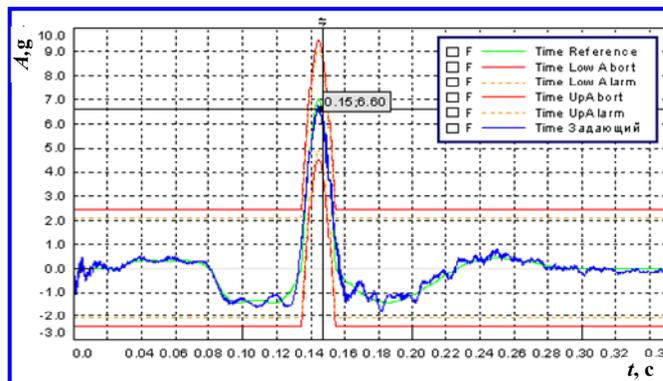
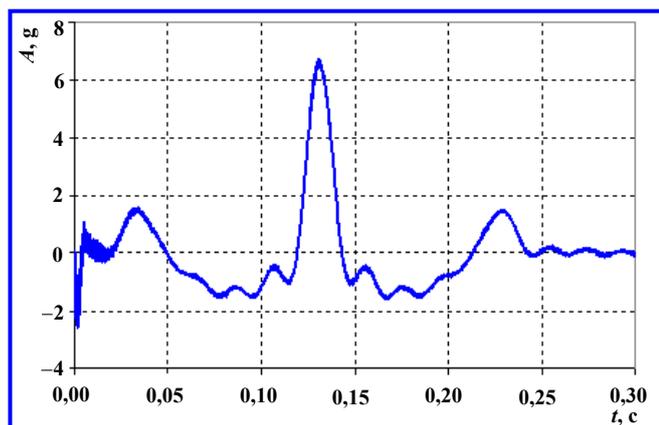


Рис. 5. Временная характеристика реализуемого ударного импульса

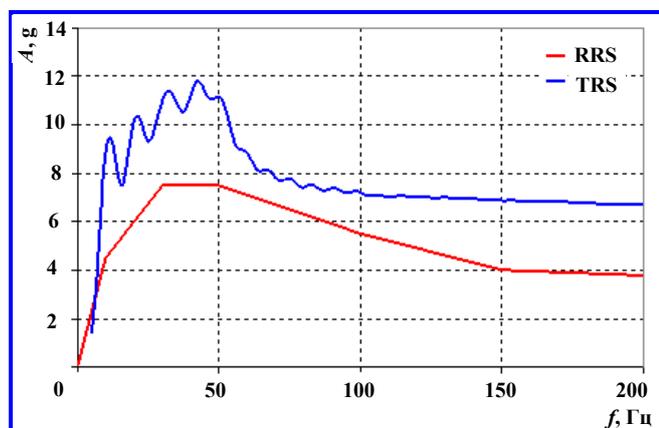
Расчёт синтеза спектра ударного отклика (SRS) при реализации ударного импульса строится с использованием программного обеспечения. Программа позволяет рассчитать ударный спектр после проведения испытания.

Для расчёта необходимо ввести в программу ряд параметров:

- диапазон исследуемых частот;
- количество расчётных точек на октаву;



а



б

Рис. 6. Испытательный импульс (а), сравнение требуемого и испытательного спектров ответа (б)

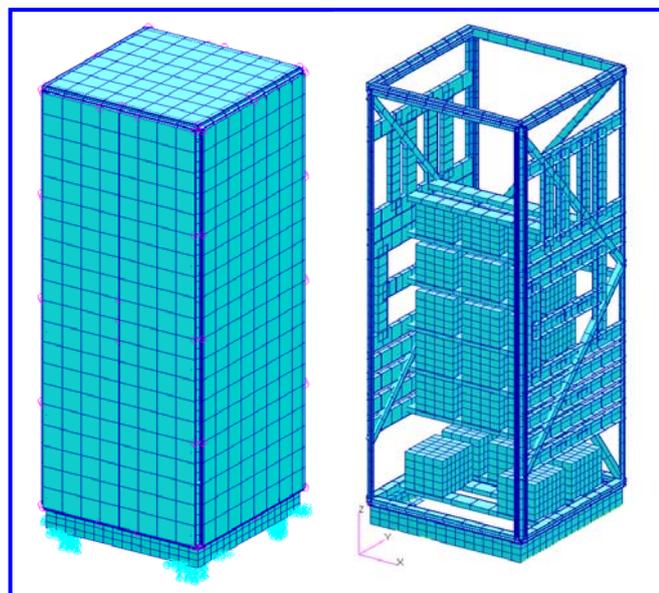


Рис. 7. Конечно-элементная модель

– коэффициент добротности (так называемый Q -фактор, коэффициент демпфирования целевого спектра ударного отклика);

– размерность расчётной величины;
– привязку – параметр, который определяет какая часть периода отклика будет использована (максимальная, первичная или остаточная).

Приведённые данные позволяют подобрать параметры испытательного импульса так, чтобы спектр ответа ударного воздействия при испытаниях оборудования охватывал заданный спектр ответа.

Форма импульса, реализуемая вибростендом (RRS), и соответствующий спектр ответа (TRS) приведены на рис. 6.

Конечно-элементные модели

Для выполнения расчётов применяется математическое моделирование конструкций (шкафа электрооборудования СУЗ и осциллятора) на базе метода конечных элементов.

Для моделирования несущих элементов конструкции шкафа электрооборудования СУЗ (рамы, усилений) использовались балочные элементы. Стенки моделировались оболочечными элементами. Толщины элементов конструкции соответствуют толщинам, указанным в чертежах. Приборы смоделированы 3D элементами типа Solid. Для крепления шкафа к цоколю, крепления приборов и для моделирования петель и замков дверей использовались MPC элементы типа RBE2.

Всего модель содержит 6200 конечных элементов, 6800 узлов.

Конечно-элементная модель шкафа показана на рис. 7.

Осциллятор моделировался при помощи балочного элемента с закрепленной на одном конце сосредоточенной массой. С другого конца балка жёстко закреплялась по всем степеням свободы, кроме направления приложения удара, масса прикреплялась равная массе шкафа. Жёсткость балки была подобрана так, чтобы первая частота составляла 13,7; 5,7 и 56,7 Гц (первые частоты шкафа электрооборудования СУЗ в направлении X, Y, Z соответственно [6]).

Анализ результатов испытаний и идентификация математической модели типового оборудования

Под идентификацией математической модели понимается выбор вида и параметров её уравнений с последующей их оценкой на основе данных, полученных в результате эксперимента.

Сравним полученные результаты испытаний шкафа с реакцией на заданное воздействие двух математических моделей:

- конечно-элементной модели шкафа электрооборудования СУЗ;
- простейшей одномассовой системы (осциллятора), настроенной на низшую резонансную частоту шкафа.

Так как воздействия ВУВ и УС существенно отличаются от сейсмических воздействий по длительности и спектральному составу, имеют выраженный ударный характер, то возможность применения имеющейся модели для расчёта на данные воздействия требует проверки.

Результаты измерений и расчётов в каждом из трёх направлений представлены на рис. 8 – 10:

для испытаний:

- ускорения на основании;
- ускорения в верхней части шкафа;
- ускорения в верхней части (отфильтрованный).

для расчёта:

- ускорения на основании;
- ускорения в верхней части шкафа;
- реакция осциллятора.

Для большей наглядности испытательный сигнал был отфильтрован от высокочастотных составляющих и также представлен на рисунках.

Из анализа приведённых на рисунках результатов можно сделать следующие выводы:

1. По трём осям наблюдается различный характер отклика на приложенное воздействие, обусловленный отношением резонансной частоты конструкции и длительности импульса:

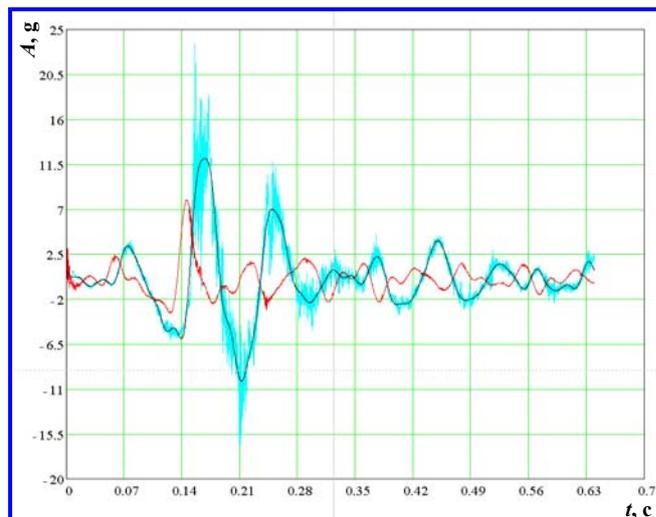
- по оси *X* (частота 13 Гц) максимум ускорения достигается на колебательном участке;
- по оси *Y* (частота 5 Гц) максимум ускорения достигается в переходном процессе;
- по оси *Z* (частота 57 Гц) отклик почти повторяет входной процесс, т. е. система практически жёсткая.

Все эти характерные особенности отслеживаются на модели.

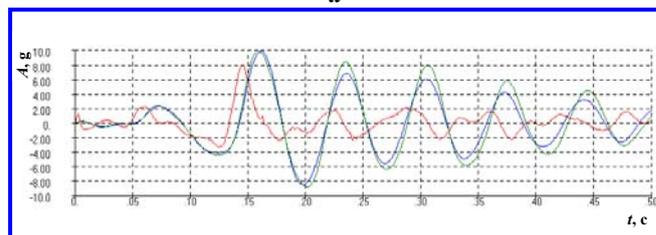
2. Основное отличие расчётных результатов от экспериментальных заключается в отсутствии высокочастотных колебаний, которые возникают в мелких перегородках, крышках, замках и т. д., которые не являются силовыми элементами и в модели отсутствуют.

Выводы

На основе анализа нормативной базы предложена методология испытаний оборудования АЭС на стойкость к воздействиям от ВУВ и УС с использованием одиночных импульсов.

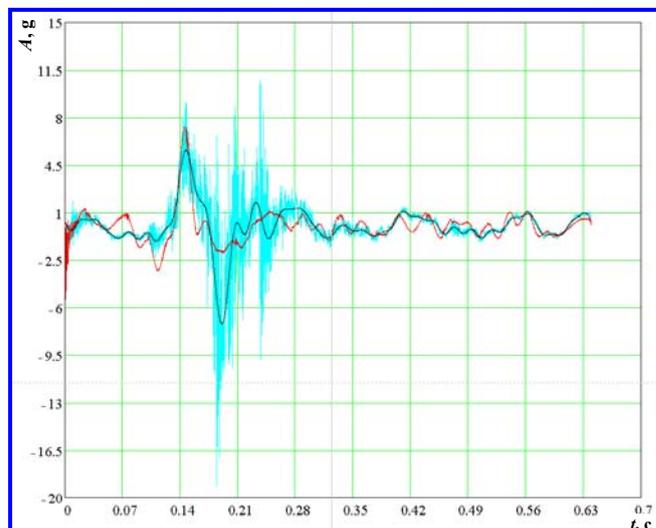


а

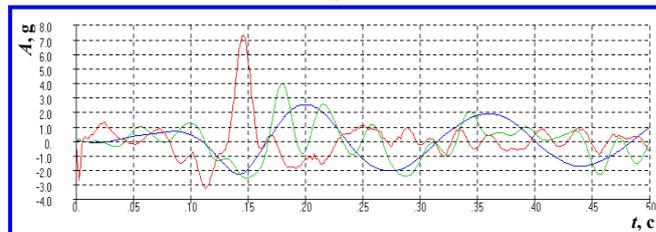


б

Рис. 8. Сравнение полученных результатов в направлении *X*: а – испытания; б – расчёт

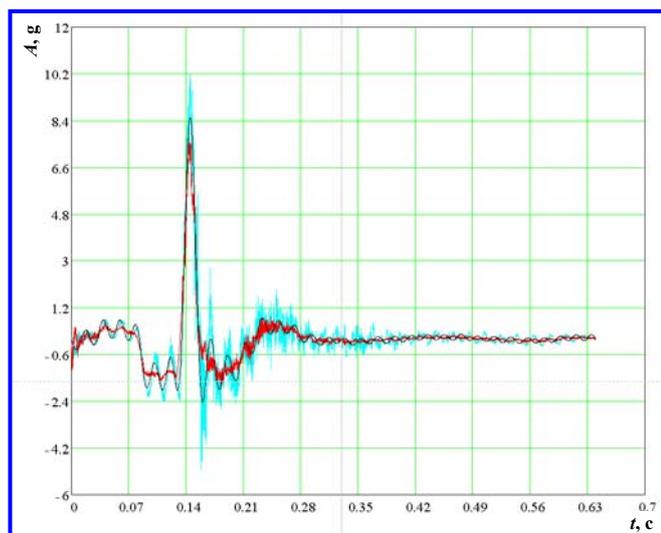


а

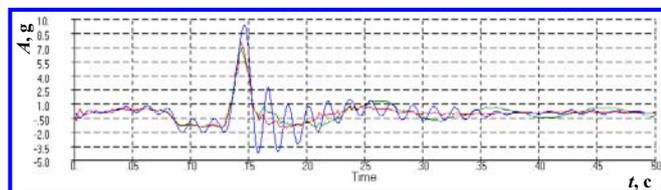


б

Рис. 9. Сравнение полученных результатов в направлении *Y*: а – испытания; б – расчёт



а



б

Рис. 10. Сравнение полученных результатов в направлении Z: а – испытания; б – расчёт

Предложенные режимы испытаний хорошо соответствуют требованиям для воздействий ВУВ и УС по характеру ударного спектра и времени действия.

Поступила в редакцию 16.05.2012

По разработанной методике проведены испытания оборудования СУЗ для Нововоронежской АЭС на ВУВ и УС.

По результатам испытаний проведена идентификация математических моделей типового оборудования СУЗ АЭС, при этом выявлено хорошее соответствие результатов в низкочастотной области и значительные отличия на более высоких частотах, что следует учитывать при проведении расчётов.

Литература

1. Нормы строительного проектирования атомных станций с реакторами различного типа. – ПиН АЭ-5.5-86. – Минатомэнерго РФ. – 1986.
2. Учёт внешних воздействий природного и техногенного происхождения на объекты использования атомной энергии. – НП-064-05 / Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору. – 2006.
3. External Events Excluding Earthquakes in the Design of Nuclear Power Plant // IAEA Safety Standards Series. Safety Guide No. NS-G-1.5. – IAEA. – Vienna, 2003.
4. External Human-Induced Events in Site Evaluation for Nuclear Power Plants // IAEA Safety Standards Series. Safety Guide No. NS-G-3.1. – IAEA. – Vienna, 2002.
5. Расчёт конструкций на сейсмостойкость / А. Н. Бирбрайер. – СПб. : Наука, 1998. – С. 34 – 40.
6. Применение расчётного метода для подтверждения сейсмостойкости оборудования / В. В. Каверин, Е. А. Канунникова, Н. А. Красова [и др.] // Вопросы электромеханики. Труды НИИ ВНИИЭМ. – М. : ФГУП « НИИ ВНИИЭМ», 2011. – Т. 122. – № 3. – С. 33 – 36.

Евгений Владимирович Афромеев, начальник отдела.

Наталья Алексеевна Красова, младший научн. сотрудник, e-mail: tinkal-88@list.ru.

Алексей Юрьевич Рузаков, младший научн. сотрудник, e-mail: alruzakv@mail.ru.

Иван Николаевич Хиблин, начальник лаборатории.

Т. 366-33-66.