ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО

ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ГОСТ Р 70925— 2023/ IEC/IEEE 60980-344:2020

Атомные станции

ОБОРУДОВАНИЕ, ВАЖНОЕ ДЛЯ БЕЗОПАСНОСТИ

Сейсмическая квалификация

(IEC/IEEE 60980-344:2020, Nuclear facilities — Equipment important to safety — Seismic qualification, IDT)

Издание официальное

Москва
Российский институт стандартизации
2023

gost.e-ecolog.ru

Предисловие

1 ПОДГОТОВЛЕН Акционерным обществом «Русатом Автоматизированные системы управления» (АО «РАСУ») на основе собственного перевода на русский язык англоязычной версии стандарта, указанного в пункте 4

2 ВНЕСЕН Техническим комитетом по стандартизации ТК 322 «Атомная техника»

3 УТВЕРЖДЕН И ВВЕДЕН В ДЕЙСТВИЕ Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 19 сентября 2023 г. № 873-ст

4 Настоящий стандарт идентичен международному стандарту IEC/IEEE 60980-344:2020 «Объекты использования атомной энергии. Оборудование, важное для безопасности. Сейсмическая квалификация» (IEC/IEEE 60980-344:2020 «Nuclear facilities — Equipment important to safety — Seismic qualification», IDT).

Наименование настоящего стандарта изменено относительно наименования указанного международного стандарта для приведения в соответствие с ГОСТ Р 1.5—2012 (пункт 3.5).

При применении настоящего стандарта рекомендуется использовать вместо ссылочных международных стандартов соответствующие им национальные стандарты, сведения о которых приведены в дополнительном приложении ДБ.

Дополнительная информация к термину «ускорение нулевого периода» приведена в приложении ДА.

Дополнительные сноски в тексте настоящего стандарта, выделенные курсивом, приведены для пояснения текста оригинала

5 ВВЕДЕН ВПЕРВЫЕ

6 Положения настоящего стандарта действуют в целом в отношении атомных станций, сооружаемых по российским проектам за пределами Российской Федерации

*Правила применения настоящего стандарта установлены в статье 26 Федерального закона от 29 июня 2015 г. № 162-ФЗ «О стандартизации в Российской Федерации». Информация об изменениях к настоящему стандарту публикуется в ежегодном (по состоянию на 1 января текущего года) информационном указателе «Национальные стандарты», а официальный текст изменений и поправок — в ежемесячном информационном указателе «Национальные стандарты». В случае пересмотра (замены) или отмены настоящего стандарта соответствующее уведомление будет опубликовано в ближайшем выпуске ежемесячного информационного указателя «Национальные стандарты». Соответствующая информация, уведомление и тексты размещаются также в информационной системе общего пользования — на официальном сайте Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии в сети Интернет (*gost.e-ecolog.ru

© IEC, 2020
© Оформление. ФГБУ «Институт стандартизации», 2023

Настоящий стандарт не может быть полностью или частично воспроизведен, тиражирован и распространен в качестве официального издания без разрешения Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии

Содержание

1 Область применения 1
2 Нормативные ссылки 1
3 Термины и определения 2
4 Сокращения и обозначения 8
5 Общие сведения о сейсмической обстановке и отклике оборудования 8
5.1 Общие положения 8
5.2 Сейсмическая обстановка 9
5.3 Оборудование на фундаментах 9
5.4 Оборудование на опорных конструкциях 9
5.5 Интерфейсы и нежелательные взаимодействия 9
5.6 Моделирование вибрации, вызванной землетрясением 10
5.7 Демпфирование 11
5.8 Учет демпфирования 12
6 Требования к квалификации по критерию сейсмостойкости 13
6.1 Общие положения 13
6.2 Спецификация подлежащего квалификации оборудования 13
6.3 Спецификация условий старения 13
6.4 Спецификация требований к сейсмическим колебаниям 14
6.5 Спецификация критериев приемлемости 14
7 Подход к квалификации на сейсмостойкость 14
7.1 Функция безопасности 14
7.2 Методы квалификации на сейсмостойкость 15
8 Старение 16
8.1 Общие положения 16
8.2 Термическое старение 16
8.3 Радиационное старение 16
8.4 Ухудшение свойств и коррозия материалов 16
8.5 Старение при циклических механических или электрических воздействиях 17
8.6 Вибрационное старение 17
9 Испытания 18
9.1 Общие положения 18
9.2 Контрольные и общие испытания 23
9.3 Испытания на условную вероятность отказа при сейсмическом воздействии 23
9.4 Испытания компонентов 24
9.5 Испытания оборудования в сборе 24
9.6 Методы испытаний 25
9.7 Документация к испытанию 36
10 Квалификация по сходству 36
10.1 Общие положения 36
10.2 Характер воздействия 36
10.3 Физические системы 37
10.4 Функция безопасности 37
11 Анализ 38
11.1 Общие положения 38

11.2 Методы сейсмического анализа 39
11.3 Нелинейный отклик оборудования 40
11.4 Прочие динамические нагрузки 41
11.5 Результаты сейсмического анализа 41
11.6 Документирование анализа 41
12 Объединение анализа и испытания 41
12.1 Общие положения 41
12.2 Модальные испытания 42
12.3 Экстраполяция для аналогичного оборудования 43
12.4 Испытания на ударопрочность 43
12.5 Экстраполяция для многокорпусных сборок 44
12.6 Прочие испытания/анализ 44
13 Документация 44
13.1 Общие положения 44
13.2 Отчет о квалификации на сейсмостойкость 44
Приложение А (обязательное) Квалификация на сейсмостойкость на основании опыта 47
Приложение В (справочное) Измерение ускорения нулевого периода 55
Приложение С (справочное) Состав частот и стационарность 56
Приложение D (справочное) Испытания на условную вероятность отказа при сейсмическом воздействии 57
Приложение Е (справочное) Продолжительность испытания и число циклов 59
Приложение F (справочное) Статистически независимые колебания 63
Приложение G (справочное) Блок-схемы, иллюстрирующие процедуры квалификации на сейсмостойкость 64
Приложение ДА (справочное) Дополнительная информация к термину «ускорение нулевого периода» 69
Приложение ДБ (справочное) Сведения о соответствии ссылочных международных стандартов национальным стандартам 70
Библиография 71

Введение

a) Техническая справка, основные вопросы и организация настоящего стандарта

Настоящий стандарт применим к важному для безопасности электротехническому оборудованию и его согласующим устройствам, необходимым для выполнения функции безопасности или отказ которых может негативным образом повлиять на функции безопасности другого оборудования.

Электротехническое оборудование объектов использования атомной энергии должно удовлетворять требованиям, предъявляемым к его функции безопасности, на протяжении всего проектного срока службы. Это достигается путем реализации продуманной программы обеспечения качества (ОК), контроля при проектировании, контроля качества, квалификации, изготовления, транспортирования, хранения, монтажа, технического обслуживания, периодических испытаний и надзора. В настоящем стандарте подробно рассмотрен вопрос о сейсмической квалификации. Настоящий стандарт следует использовать совместно с IEC/IEEE 60780-323.

Иные аспекты, относящиеся к обеспечению качества, надежности, выбору и использованию электронных устройств, проектированию и модификации цифровых систем, включая деятельность по верификации и валидации, не входят в область применения настоящего стандарта.

На качестве настоящего стандарта благотворно сказались результаты отраслевых промышленных исследований в области квалификации оборудования и опыт их применения в течение десятилетий. При проведении дальнейших работ в рамках рабочей группы по актуализации настоящего стандарта будет учтено следующее:

- опыт и знания, полученные при использовании методик контроля состояния;
- приобретенные знания о механизмах и динамике процессов старения;
- усовершенствования в использовании методов (испытаний и анализа), описанных в различных стандартах;
- усовершенствования вычислительных средств и методов их использования.

Предполагается, что настоящий стандарт будет востребован операторами атомных станций (АС) (систем обеспечения), специалистами по оценке систем, изготовителями оборудования, лабораториями, проводящими испытания и квалификацию, а также органами по лицензированию.

b) Положение настоящего стандарта в структуре серии стандартов подкомитета МЭК ПК 45А

МЭК 61513 и МЭК 63046 являются документами МЭК ПК 45А первого (высшего) уровня, в которых приведены указания, касающиеся систем контроля и управления (СКУ) и электроэнергетических систем (на системном уровне). Они дополнены руководством по функциональной классификации (МЭК 61226).

Помимо указанных документов существуют документы МЭК ПК 45А второго уровня. Документы второго уровня содержат руководства по проектированию технических средств (МЭК 60987), программному обеспечению (МЭК 60880 и МЭК 62138), выбору и использованию HDL-программируемых встроенных цепей (МЭК 62566), требования по снижению возможности и ограничению воздействия отказов по общей причине функций категории А (МЭК 62340), квалификации (IEC/IEEE 60780-323, IEC/IEEE 60980-344 и МЭК 62003), проектированию пунктов управления (МЭК 62342) и кибербезопасности (МЭК 62645).

IEC/IEEE 60980-344 является документом МЭК ПК 45А второго уровня, в котором рассмотрена сейсмическая квалификация важного для безопасности электротехнического оборудования.

Более подробно структура серии стандартов МЭК ПК 45А описана в пункте d) настоящего введения.

c) Рекомендации и ограничения, касающиеся применения настоящего стандарта

Настоящий стандарт, в обозначении которого использован двойной логотип, применим в отношении всего электротехнического оборудования, важного для безопасности, в соответствии с терминологией МАГАТЭ. Как стандарт IEEE[1)], настоящий стандарт применим к системам, конструкциям и компонентам, классифицируемым как системы, конструкции и компоненты безопасности или имеющие отношение к безопасности. Учитывая же руководства по классификации в соответствии с МЭК 61226 и МЭК 61513, настоящий стандарт применим к оборудованию всех классов безопасности: 1, 2 и 3. Настоящий стандарт следует применять в соответствии только с одной выбранной схемой классификации: по МЭК или по IEEE.

Для гарантии того, что настоящий стандарт останется актуальным в будущем, особое внимание уделено принципиальным вопросам, а не конкретным технологиям.

d) Описание структуры серии стандартов подкомитета МЭК 45А и их взаимосвязи с другими документами МЭК и документами других организаций (МАГАТЭ, ИСО)

Документами наиболее высокого уровня серии стандартов ПК 45А МЭК являются МЭК 61513 и МЭК 63046. МЭК 61513 содержит общие требования к СКУ и оборудованию, используемым для выполнения важных для безопасности АС функций. В МЭК 63046 приведены общие требования к электроэнергетическим системам АС (системам электроснабжения, включая системы питания СКУ). МЭК 61513 и МЭК 63046 следует рассматривать совместно и на одном уровне, так как они формируют структуру серии стандартов ПК 45А МЭК и создают основу, определяющую общие требования к системам контроля и управления и к электротехническим системам АС.

МЭК 61513 и МЭК 63046 содержат прямые ссылки на другие стандарты МЭК ПК 45А по общим вопросам, связанным с категоризацией функций и классификацией систем, квалификацией, разделением, защитой от отказов по общим причинам, с проектированием пунктов управления, электромагнитной совместимостью, кибербезопасностью, с программными и аппаратными аспектами программируемых цифровых систем, согласованием требований безопасности и защиты информации и с управлением старением. Стандарты, на которые напрямую ссылаются МЭК 61513 и МЭК 63046, являющиеся документами второго уровня, следует рассматривать совместно с последними как единый комплект документов.

Третий уровень документов ПК 45А МЭК составляют стандарты, на которые отсутствуют прямые ссылки в МЭК 61513 или МЭК 63046, относящиеся к конкретному оборудованию, техническим методам или определенным видам деятельности. Как правило, эти документы, содержащие ссылки на документы второго уровня по общим темам, могут быть использованы самостоятельно.

Четвертый уровень серии стандартов ПК 45А МЭК представлен техническими отчетами, которые не являются нормативными документами.

Серия стандартов ПК 45А МЭК постоянно реализует и детализирует принципы безопасности и защиты информации, а также базовые аспекты, содержащиеся в соответствующих стандартах безопасности МАГАТЭ и в соответствующей серии документов МАГАТЭ по ядерной безопасности (NSS). В частности, к этим документам отнесены нормы безопасности МАГАТЭ SSR-2/1, устанавливающие требования безопасности, связанные с проектированием АС; руководство по безопасности МАГАТЭ SSG-30, в котором рассмотрена классификация безопасности конструкций, систем и компонентов АС; руководство по безопасности МАГАТЭ SSG-39, относящееся к проектированию систем контроля и управления АС; руководство по безопасности МАГАТЭ SSG-34, рассматривающее проектирование электроэнергетических систем для АС, а также руководство NSS 17 по внедрению компьютерной безопасности для оборудования АС. Термины и определения, используемые в стандартах ПК 45А по безопасности и защите информации, соответствуют терминам и определениям, используемым в документах МАГАТЭ.

МЭК 61513 и МЭК 63046 представлены в том же формате, что и основной документ по безопасности МЭК 61508, с той же схемой жизненного цикла в целом и схемой жизненного цикла системы. В отношении ядерной безопасности МЭК 61513 и МЭК 63046 содержат толкование основных требований, действующих в атомной энергетике и изложенных в МЭК 61508-1, МЭК 61508-2 и МЭК 61508-4. По структуре серии стандартов ПК 45А МЭК 60880, МЭК 62138 и МЭК 62566 соответствуют МЭК 61508-3 в атомной энергетике. В МЭК 61513 и МЭК 63046 приведены ссылки на документы ИСО, а также на

[1)] *IEEE* — Институт инженеров по электротехнике и электронике (*Institute of Electrical and electronics Engineers).*

документы МАГАТЭ GS-R-2, GS-G-3.1 и GS-G-3.5 по вопросам, связанным с ОК. На втором уровне по вопросам ядерной безопасности вводным документом для серии стандартов по безопасности ПК 45А МЭК является МЭК 62645, который основан на действующих принципах высокого уровня и главных концепциях стандартов по безопасности, в частности ИСО/МЭК 27001 и ИСО/МЭК 27002. МЭК 62645 адаптирует и дополняет их применительно к атомной отрасли и приводит в соответствие с серией стандартов МЭК 62443. По пунктам управления на втором уровне первичным документом для стандартов ПК 45А МЭК является МЭК 60964, а по вопросам управления старением — МЭК 62342.

Примечание 1 — Предполагается, что при проектировании систем контроля и управления АС, реализующих стандартные функции безопасности (например, обеспечение безопасности работников, защита объекта, химическая безопасность, энергетическая безопасность технологических процессов), будут применены международные или национальные стандарты.

Примечание 2 — В 2013 г. расширена сфера ответственности ПК 45А МЭК, которая распространилась также на электрические системы. В 2014 и 2015 гг. в ПК 45А МЭК были проведены дискуссии с целью принятия решения о том, каким образом и где следует учитывать общие требования к проектированию электрических систем. Эксперты ПК 45А МЭК рекомендовали разработать независимый стандарт такого же уровня, как и МЭК 61513, устанавливающий общие требования к электрическим системам. В настоящее время для решения этой задачи начата работа над проектом МЭК 63046, и когда он будет опубликован, примечание 2 во введении стандартов подкомитета ПК 45А МЭК будет исключено.

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Атомные станции

ОБОРУДОВАНИЕ, ВАЖНОЕ ДЛЯ БЕЗОПАСНОСТИ

Сейсмическая квалификация

Nuclear power plants. Equipment important to safety. Seismic qualification

Дата введения — 2023—12—01

1 Область применения

Настоящий стандарт устанавливает процедуры сейсмической квалификации, которые позволяют получить количественные данные, демонстрирующие, что оборудование удовлетворяет предъявляемым к нему эксплуатационным требованиям. Настоящий стандарт применим к электротехническому, механическому, контролирующему и управляющему оборудованию (компонентам), применяемому на объектах использования атомной энергии[1)]. Настоящий стандарт устанавливает требования к методам и ведению документации сейсмической квалификации оборудования, направленные на подтверждение способности оборудования соответствовать предъявляемым к нему эксплуатационным требованиям во время и/или после сейсмического воздействия определенного уровня. Настоящий стандарт не устанавливает уровни сейсмического воздействия или эксплуатационные требования. Также в настоящем стандарте не рассматриваются вопросы, относящиеся к обеспечению качества, выбору оборудования, проектированию и модификации систем. Так как сейсмическая квалификация является только частью квалификации оборудования, настоящий стандарт следует использовать совместно с IEC/IEEE 60780-323.

Квалификация по критерию сейсмостойкости показывает способность оборудования выполнять назначенную ему функцию(и) безопасности во время и/или после воздействия сил, возникших в результате по меньшей мере одного максимального расчетного землетрясения (МРЗ/S2). Данную способность характеризуют, принимая во внимание старение оборудования и заданное число проектных землетрясений (ПЗ/S1) как постулируемых событий, возникших до МРЗ/S2 и имеющих меньшую интенсивность. К явлениям старения, которые должны быть учтены при наличии соответствующих указаний в проектных спецификациях, относят такие, которые могут повысить уязвимость оборудования при воздействии вибраций, возникающих при МРЗ/S2.

2 Нормативные ссылки

В настоящем стандарте использованы нормативные ссылки на следующие стандарты [для датированных ссылок применяют только указанное издание ссылочного стандарта, для недатированных — последнее издание (включая все изменения)]:

[1)] *Требования к устойчивости управляющих систем к механическим воздействиям с установленными проектом АС параметрами синусоидальной вибрации и механических ударов, а также параметрами сейсмических воздействий предусмотрены НП-026-16 «Требования к управляющим системам, важным для безопасности атомных станций».*

IEC 60068-2-6, Environmental testing — Part 2-6: Tests — Test Fc: Vibration (sinusoidal) [Испытания на воздействие внешних факторов. Часть 2-6. Испытания. Испытание Fc. Вибрация (синусоидальная)]

IEC/IEEE 60780-323, Nuclear facilities — Electrical equipment important to safety — Qualification[1), 2)] (Объекты использования атомной энергии. Электрооборудование, важное для безопасности. Квалификация)

IEEE Std 382™, IEEE Standard for Qualification of Safety-Related Actuators for Nuclear Power Generating Stations and Other Nuclear Facilities (Стандарт IEEE по квалификации имеющих отношение к безопасности исполнительных механизмов для атомных электростанций)

3 Термины и определения

Термины и определения, приведенные в настоящем стандарте, соответствуют терминам и определениям Глоссария по вопросам безопасности МАГАТЭ[3)].

В настоящем стандарте применены следующие термины с соответствующими определениями:

3.1 **критерий приемлемости** (acceptance criteria): Заданные границы показания функционального индикатора или индикатора состояния, используемые для оценки способности конструкции, системы или компонента выполнять назначенную им функцию.

Примечание 1 — Значения эксплуатационных параметров и иных критериев, свидетельствующие о способности оборудования выполнять назначенные функции безопасности, должны быть определены.

[Глоссарий МАГАТЭ по вопросам безопасности, 2018]

3.2 **сборка** (assembly): Узел, включающий все электрические, механические и структурные компоненты оборудования, а также крепежные и опорные конструкции.

3.3 **спектр отклика широкого диапазона** (broadband response spectrum): Спектр отклика на движение, в котором усиленный отклик отражен в широком (широкополосном) диапазоне частот[4)].

3.4 **класс 1Е** (class 1E): Классификация по безопасности электротехнического оборудования и систем, необходимых для аварийного останова ядерного реактора, изоляции гермооболочки, охлаждения активной зоны ядерного реактора, а также отвода тепла от гермооболочки и ядерного реактора, или иным образом являющихся важными для предотвращения значительных выбросов радиоактивных веществ в окружающую среду.

Примечание 1 — Обращаем внимание пользователей настоящего стандарта на то, что «класс 1Е» является функциональным термином. Оборудование и системы относят к классу 1Е только в случае, если они выполняют функции, перечисленные в данном определении. Отнесение систем или оборудования к классу 1Е на иных основаниях, помимо выполняемых ими функций, является неверным пониманием данного термина и должно быть исключено.

[Онлайн-словарь стандартов IEEE]

3.5 **компонент** (component): Одна из составных частей оборудования, которая может представлять собой аппаратный компонент (например, провода, транзисторы, интегрированные цепи, электродвигатели, реле, соленоиды, трубопроводы, арматура, насосы, баки и клапаны) или программный компонент. Компонент может состоять из других компонентов.

Примечание 1 — Компонентами являются элементы, из которых собрано оборудование.

Примечание 2 — Термины «компонент» и «устройство» являются взаимозаменяемыми.

[Глоссарий МАГАТЭ по вопросам безопасности, 2018]

---

1) Публикации IEEE доступны по адресу Института инженеров электротехники и электроники (gost.e-ecolog.ru gost.e-ecolog.ru

2) Стандарты или документы IEEE, на которые приведены ссылки в настоящем разделе, снабжены торговой маркой юридического лица «Институт инженеров электротехники и электроники».

3) Глоссарий МАГАТЭ по вопросам безопасности доступен по адресу: gost.e-ecolog.ru iaea-safety-glossary-2018-edition.

4) *Согласно ГОСТ Р ИСО 10137—2016 «спектр отклика — максимальные отклики ряда систем с одной степенью свободы, подверженных заданному динамическому движению основания, представленные функцией собственных частот для определения демпфирования».*

3.6 **функция когерентности** (coherence function): Сравнительное отношение во времени двух зависимостей, представленных как функции частоты.

Примечание 1 — Обеспечивает статистическую оценку того, насколько зависимы между собой два перемещения как функции частоты.

Примечание 2 — Цифровой диапазон составляет от 0 для независимых перемещений до +1,0 для зависимых перемещений.

3.7 **функция коэффициента корреляции** (correlation coefficient function): Сравнительное отношение во времени двух зависимостей, представленных как функции временной задержки.

Примечание 1 — Обеспечивает статистическую оценку того, насколько зависимы между собой два перемещения как функции временной задержки.

Примечание 2 — Цифровой диапазон составляет: от –1,0 — для обратнозависимых перемещений, 0 — для независимых перемещений, до +1,0 — для зависимых перемещений.

3.8 **критическое демпфирование** (critical damping): Минимальное значение демпфирования за счет вязкого трения, которое приводит к возврату конструкции, системы или компонента с одной степенью свободы (SDOF) в исходное положение без колебаний после изначального возмущения.

[онлайн-словарь стандартов IEEE]

3.9 **критические сейсмические характеристики** (critical seismic characteristic): Проектные, эксплуатационные характеристики, а также характеристики материалов оборудования, которые обеспечивают обоснованную степень уверенности в том, что оборудование будет выполнять назначенную ему функцию при сейсмическом воздействии.

3.10 **предельная частота** (cutoff frequency): Частота в спектре отклика, при которой начинается асимптота ускорения нулевого отклика (ZPA).

Примечание 1 — Это частота, выше которой в системе с одной степенью свободы не происходит увеличения амплитуды перемещения и которая отражает верхний частотный предел анализируемого вибрационного нагружения.

3.11 **демпфирование** (damping): Механизм рассеивания энергии, который подавляет усиление и гасит за счет уширения ответные колебания в резонансной области.

Примечание 1 — Обычно выражают в процентах от критического демпфирования.

3.12 **проектные события** (design basic events): Постулированные события, используемые при проектировании для установления приемлемых эксплуатационных требований к конструкциям, системам и компонентам.

Примечание 1 — Должны быть установлены условия постулированных проектных событий (DBE), в число которых входят разрыв первого контура, авария с потерей теплоносителя, прорыв главного паропровода и/или землетрясение, которые должны быть учтены при проектировании атомной станции и в течение или после которых оборудование должно выполнять назначенную ему функцию безопасности.

Примечание 2 — Оборудование должно быть квалифицировано по каждому установленному для DBE условию, чтобы обеспечить соответствие требованию к длительности эксплуатации, включая время работы после DBE.

[Онлайн-словарь стандартов IEEE]

3.13 **экспериментальный спектр отклика при землетрясениях** (earthquake experience spectrum): Спектр отклика, который определяет сейсмостойкость оборудования указанного класса, основанный на экспериментальных сейсмических данных.

3.14 **оборудование, важное для безопасности** (equipment important to safety): Оборудование, которое является частью группы безопасности, неисправность или отказ которого могут привести к недопустимому уровню воздействия радиации на персонал станции или население. К числу такого оборудования относят:

- конструкции, системы и компоненты, неисправность или отказ которых могут привести к недопустимому уровню радиоактивного облучения персонала на площадке или представителей населения;
- конструкции, системы и компоненты, которые препятствуют перерастанию нарушений нормальной эксплуатации в аварийные условия;
- средства безопасности для условий расширенного проектирования;

- средства, предназначенные для смягчения последствий неисправности или отказа конструкций, систем и компонентов.

Примечание 1 — Согласно области применения МЭК 61226 к оборудованию, важному для безопасности, относят:

- все оборудование СКУ, выполняющее функции категорий А, В и С (в соответствии со схемой категоризации по МЭК 61226);
- все электротехническое оборудование, необходимое для обеспечения аварийного электропитания вышеуказанного оборудования в условиях потери источников нормального электроснабжения;
- все электротехническое оборудование, необходимое для обеспечения общего электропитания в случае полного обесточивания атомной станции (при выборе данного условия в качестве условия расширенного проектирования, последствия от которого должны быть смягчены).

Примечание 2 — Согласно другим документам IEEE и категоризации как класс 1E, квалификация имеет существенное значение для следующего важного для безопасности оборудования:

- оборудование и системы, важные для аварийного останова ядерного реактора, изоляции гермооболочки, охлаждения активной зоны ядерного реактора, а также отвода тепла от гермооболочки и ядерного реактора;
- оборудование, являющееся по иным причинам важным для предотвращения значительного выброса радиоактивных веществ в окружающую среду.

[Глоссарий МАГАТЭ по вопросам безопасности, 2018]

3.15 **гибкое оборудование** (flexible equipment): Оборудование, конструкции и компоненты, наименьшая резонансная частота которых меньше предельной частоты спектра отклика.

3.16 **ускорение пола** (floor acceleration): Ускорение пола конкретного здания (или крепления оборудования) в результате движения, вызванного землетрясением.

Примечание 1 — Максимальным ускорением пола является ускорение нулевого периода (УНП) спектра отклика пола.

3.17 **уровень условной вероятности отказа при сейсмическом воздействии** (fragility level): Максимальный уровень входного возбуждения, выраженный в виде функции входной частоты, ускорения и продолжительности испытания, при котором оборудование остается способным удовлетворять эксплуатационным требованиям.

3.18 **спектр отклика на хрупкость** (fragility response spectrum): Спектр отклика, который определяет абсолютную сейсмостойкость испытуемого оборудования на основе данных об условной вероятности отказа при сейсмическом воздействии.

3.19 **ускорение грунта** (ground acceleration): Ускорение грунта в результате движения, вызванного землетрясением.

Примечание 1 — Максимальным ускорением грунта является ускорение нулевого периода (УНП) спектра отклика грунта.

3.20 **правила включения** (inclusion rules): Правила, определяющие границы параметров оборудования, отнесенного к классу контрольного оборудования, установленные на основе приемлемого диапазона физических характеристик оборудования, динамических характеристик и функций, для которых сейсмическая стойкость была подтверждена экспериментальными данными.

Примечание 1 — См. А.2.4.2 и А.3.4.2.

3.21 **независимые объекты** (independent items): Компоненты и оборудование, которые:

a) имеют разные физические характеристики;

b) имеют разные сейсмические характеристики, например спроектированы для разных землетрясений, смонтированы на разных площадках, в разных зданиях, имеют разную ориентацию/местоположение внутри одного здания.

3.22 **медианный внутриконструкционный спектр отклика** (median-centered in-structure response spectrum): Внутриконструкционный спектр отклика, полученный при реалистичном демпфировании и наилучших оценочных параметрах моделирования с целью определения наиболее вероятного ускорения конструкции, которое может в действительности возникнуть для данного уровня колебаний грунта при землетрясении.

3.23 **спектр отклика низкого диапазона** (narrowband response spectrum): Спектр отклика, описывающий колебания, в котором усиленный ответ возникает в ограниченном (узком) диапазоне частот.

3.24 **частота собственных колебаний** (natural frequency): Частота(ы), с которой(ыми) тело совершает колебательные движения, обусловленная(ые) его собственными физическими характеристиками (масса и жесткость конструкции), если приложить к телу усилие определенной направленности, а затем прекратить его воздействие.

3.25 **проектное землетрясени**е (operating basic earthquake): Землетрясение, которого можно обоснованно ожидать на площадке АС в течение срока службы АС, учитывая региональные и местные геологические и сейсмические особенности, а также конкретные характеристики местного грунта[1)].

Примечание 1 — Это землетрясение, которое приводит к таким вибрационным колебаниям грунта, при которых в соответствии с проектом должны сохранять свою функциональность компоненты АС, необходимые для обеспечения непрерывности эксплуатации без необоснованного риска для здоровья и жизни населения.

3.26 **эксплуатационное требование** (performance requirement): Требование, которое обязывает функциональные или структурные характеристики оборудования или системы соответствовать эксплуатационным характеристикам (условиям).

3.27 **спектральная плотность мощности** (power spectral density): Среднеквадратичная амплитуда волнообразного колебания на единицу частоты.

Примечание 1 — Данный показатель для волнообразного ускорения выражают в единицах спектральной плотности ускорения на единицу частоты: $(м/с^2)^2/Гц$ $(g^2/Гц)$.

Примечание 2 — Произвольную вибрацию характеризуют, как правило, частотным спектром спектральной плотности мощности (PSD) или спектральной плотности ускорений (ASD).

3.28 **недопустимые характеристики** (prohibited features): Особенности проекта, материалы, конструктивные особенности или характеристики монтажа, которые стали причиной отказа в связи с сейсмическим событием или неспособности оборудования сохранять свою конструктивную целостность и выполнять назначенную функцию во время землетрясения или испытательных воздействий, достигающих и включающих установленный уровень сейсмостойкости.

3.29 **контрольное испытание** (proof testing): Испытание, используемое для квалификации оборудования с целью его конкретного применения или на предмет соответствия конкретному требованию.

[Онлайн-словарь стандартов IEEE]

3.30 **аттестованное состояние** (qualified condition): Состояние оборудования до начала проектного события, для которого было подтверждено соответствие оборудования проектным требованиям при заданных условиях эксплуатации.

Примечание 1 — Данный термин может относиться, например, к системам поставарийного охлаждения и контроля, которые, как предполагается, должны оставаться работоспособными.

3.31 **аттестованный срок службы** (qualified life): Период, в течение которого, как подтверждено испытаниями, анализом или опытным путем, конструкция, система или компонент будут способны функционировать в заданных эксплуатационных условиях соответственно критериям приемлемости, сохраняя при этом способность выполнять назначенную им функцию безопасности при аварии или землетрясении.

Примечание 1 — В конце аттестованного срока службы оборудование должно сохранять способность выполнять функцию(и) безопасности, необходимую(ые) при постулированных проектном и постпроектном событиях.

[Глоссарий МАГАТЭ по вопросам безопасности, 2018]

3.32 **референтное оборудование** (reference equipment): Оборудование, используемое для установления класса сравниваемого оборудования.

3.33 **класс референтного оборудования** (reference equipment class): Группа оборудования, имеющего общие характерные признаки, определяемые набором правил применения и недопустимых характеристик.

3.34 **референтная площадка** (reference site): Площадка, на которой размещены оборудование или средства, используемые для установления класса референтного оборудования.

[1)] *Согласно НП-031-01 «проектное землетрясение — землетрясение максимальной интенсивности на площадке АС с повторяемостью один раз в 1000 лет».*

3.35 **требуемый спектр отклика** (required response spectrum): Спектр отклика, указанный пользователем либо его агентом в спецификациях на квалификацию или формируемый искусственно в целях обеспечения возможности использования по назначению в будущем.

Примечание 1 — Необходимый спектр отклика является требованием, которое должно быть выполнено, и включает допуск на испытания в соответствии с IEC/IEEE 60780-323.

3.36 **резонансная частота** (resonant frequency): Частота воздействия, вызывающая пик отклика в системе, подвергнутой воздействию вибрации. Эта частота сопровождается сдвигом фазы отклика относительно воздействующей вибрации.

3.37 **спектр отклика** (response spectrum): Графическое изображение максимальных откликов множества демпфированных осцилляторов с одной степенью свободы (SDOF), подвергаемых одинаковому базовому возбуждению как функции частоты генератора колебаний[1)].

3.38 **жесткое оборудование** (rigid equipment): Оборудование, конструкции и компоненты, наименьшая резонансная частота которых больше предельной частоты спектра отклика.

3.39 **максимальное расчетное землетрясение** (safe shutdown earthquake): Землетрясение, сила которого основана на оценке максимально возможного землетрясения с учетом геологического строения и сейсмологических исследований региона и конкретной местности, а также на специфических характеристиках местного грунта[2)]. Это землетрясение, в результате которого формируются вибрационные колебания грунта максимальной силы, при которых в соответствии с проектом определенные конструкции, системы и компоненты должны оставаться работоспособными. К ним относятся конструкции, системы и компоненты, необходимые для обеспечения уверенности:

a) в целостности границ давления первого контура;

b) способности выполнить останов ядерного реактора и поддерживать его в состоянии безопасного останова;

c) способности предотвратить или уменьшить последствия аварий, которые потенциально могут привести к выбросам за пределы площадки, сопоставимым с пределами, установленными нормативными требованиями.

3.40 **функция безопасности** (safety function): Определенная цель, которая должна быть достигнута ради обеспечения безопасности объекта для предотвращения или уменьшения радиологических последствий при нормальной эксплуатации, нарушениях нормальной эксплуатации и авариях[3)].

[Глоссарий МАГАТЭ по вопросам безопасности, 2018]

3.41 **сейсмостойкость** (seismic capacity): Максимальный сейсмический уровень, для которого было подтверждено требуемое соответствие эксплуатационных характеристик[4)].

3.42 **условия эксплуатации** (service conditions): Фактические физические состояния или воздействия в течение срока службы оборудования, включающего нормальные условия эксплуатации, нарушения нормальных условий эксплуатации, проектные события и условия расширенного проектирования[5)].

Примечание 1 — В Глоссарии МАГАТЭ по вопросам безопасности 2007 г. аварийные условия включали как проектные аварии, так и запроектные аварии. Второй термин был заменен в рамках МАГАТЭ понятием условий расширенного проектирования (DEC) [МАГАТЭ, SSR-2/1]. Оборудование, необходимое в случае DEC, должно иметь соответствующую квалификацию. Этим и объясняется необходимость изменения определения.

[Глоссарий МАГАТЭ по вопросам безопасности, 2007 г., изменен: см. примечание]

---

1) *Согласно НП-031-01 «спектр ответа (реакции) — совокупность абсолютных значений максимальных ответных ускорений линейного осциллятора при заданном акселерограммой воздействии с учетом собственной частоты и параметра демпфирования осциллятора.*

2) *Согласно НП-031-01 «максимальное расчетное землетрясение — землетрясение максимальной интенсивности на площадке АС с повторяемостью один раз в 10000 лет».*

3) *Согласно НП-001-15, приложение 2, «функция безопасности — конкретная цель и действия, обеспечивающие ее достижение, направленные на предотвращение аварий и (или) ограничение их последствий».*

4) *Согласно НП-031-01 «сейсмостойкость элементов АС — свойство элементов АС сохранять при землетрясении способность выполнять заданные функции в соответствии с проектом».*

5) *Согласно НП-001-15, приложение 2, «условия безопасной эксплуатации — установленные проектом АС минимальные требования по количеству, характеристикам, состоянию работоспособности, объему, периодичности и иным условиям технического обслуживания, контроля и испытаний систем (элементов), важных для безопасности, при которых обеспечивается соблюдение пределов безопасной эксплуатации и (или) критериев безопасности».*

3.43 **срок службы** (service life): Период времени с первого запуска до окончательного снятия с эксплуатации конструкции, системы или компонента[1)].

[Глоссарий МАГАТЭ по вопросам безопасности, 2018]

3.44 **оборудование категории сейсмостойкости I** (seismic category I equipment): Оборудование, спроектированное с учетом требования стойкости к воздействию максимального расчетного землетрясения (MP3/S2) и выполнения назначенных им функций безопасности во время и/или после MP3/S2 при сохранении им конструктивной целостности.

3.45 **оборудование категории сейсмостойкости II** (seismic category II equipment): Оборудование, к которому не предъявляют требование функционирования, но отказ которого может негативным образом повлиять на функцию безопасности иного оборудования.

Примечание 1 — Такое оборудование следует проектировать устойчивым к отказу, который может негативно повлиять на работу оборудования категории сейсмостойкости I или привести к травме персонала АС (например, пункта управления) с потерей трудоспособности, что может сказаться на безопасности эксплуатации АС.

3.46 **сейсмическая прочность** (seismic ruggedness): Способность выдерживать разрушительное воздействие землетрясения за счет устойчивости, обеспечиваемой особенностями проектирования и изготовления.

3.47 **сейсмическая уязвимость** (seismic vulnerability): Физическая и/или электрическая характеристика, которая при воздействии землетрясения может привести единицу оборудования в состояние, подверженное конструктивному повреждению или неисправности.

3.48 **синусоидальные толчки** (sine beats): Непрерывная синусоида одной частоты с амплитудой, модулированной синусоидой более низкой частоты.

3.49 **синусоидальный прорыв** (sine dwell): Непрерывная синусоида с одной частотой.

3.50 **стационарность** (stationarity): Состояние, существующее, когда распределение амплитуд, частотный спектр и другие описательные параметры сигнала волновой формы остаются статистически постоянными во времени.

3.51 **сильные колебания** (strong motion): Промежутки времени на временной диаграмме испытаний ускорением, в которые первый пик ускорения достигает и превышает 25 % максимального пикового значения к моменту, когда ускорение падает в последний раз до значения ниже 25 % максимального пикового значения.

3.52 **диаметр конструкции** (structure diameter): Диаметр круга площадью, эквивалентной площади фундамента объекта.

3.53 **испытательный спектр** (test experience spectra): Спектр отклика, полученный по результатам испытаний, определяющий сейсмостойкость референтного оборудования определенного класса.

3.54 **испытательная частота** (test frequency): Частота применяемого усилия, которое прилагают к оборудованию во время испытаний.

3.55 **испытательный спектр отклика** (test response spectrum): Спектр отклика, полученный при сейсмических испытаниях и представляющий собой временную зависимость смещений испытательного стола (обычно именуемого вибростолом).

3.56 **передаточная функция** (transfer function): Сложная амплитудно-частотная функция, которая определяет динамические характеристики линейной системы с постоянными параметрами.

Примечание 1 — Для идеальной системы передаточная функция представляет собой отношение преобразования Фурье выходных данных к преобразованию Фурье входных данных.

3.57 **ускорение нулевого периода**[2)] (zero period acceleration): Уровень ускорения высокочастотной неусиленной части спектра отклика.

Примечание 1 — Данное ускорение соответствует максимальному пиковому значению ускорения в процессе его изменения во времени, которое используют для получения спектра.

[1)] *Согласно ГОСТ Р 27.102—2021 (статья 29) «срок службы — календарная продолжительность эксплуатации объекта от начала эксплуатации или ее возобновления после капитального ремонта до момента достижения объектом предельного состояния».*

[2)] *Дополнительная поясняющая информация к термину приведена в приложении ДА.*

4 Сокращения и обозначения

В настоящем стандарте использованы следующие сокращения и обозначения:

БПФ — быстрое преобразование Фурье (fast Fourier transform, FFT);

ИСО — Международная организация по стандартизации (International Organization for Standardization, ISO);

ККСК — корень квадратный из суммы квадратов (square root of the sum of the squares, SRSS);

МАГАТЭ — Международное агентство по атомной энергии (international Atomic Energy Agency, IAEA);

МРЗ/S2 — максимальное расчетное землетрясение (safe shutdown earthquake, SSE/S2);

МЭК — Международная электротехническая комиссия (International Electrotechnical Commission, IEC);

ОВКВ — отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха (heating, ventilation and air conditioning, HVAC);

ОК — обеспечение качества (quality assurance, QA);

ПЗ/S1 — проектное землетрясение (operating basis earthquake, OBE/S1);

СКУ — система контроля и управления (instrumentation and control system, I&C system);

УНП — ускорение нулевого периода (zero period acceleration, ZPA);

ASCE — Американское общество гражданских инженеров (American society of civil engineers);

ASD — спектральная плотность ускорения (acceleration spectral density);

ASME — Американское общество инженеров-механиков (American society of mechanical engineers);

DBE — проектное событие (design basis event);

DEC — условия расширенного проектирования (design extension conditions);

EES — экспериментальный спектр отклика при землетрясениях (earthquake experience spectrum);

HELB — разрыв первого контура ядерного реактора (high energy line break);

IEEE — институт инженеров электротехники и электроники (Institute of Electrical and Electronics Engineers);

LOCA — авария с потерей теплоносителя (loss-of-coolant accident);

PSD — спектральная плотность мощности (power spectral density);

RMS — среднеквадратичное значение (root mean square);

RRS — требуемый спектр отклика (required response spectrum);

RSA — анализ спектра отклика (response spectrum analysis);

SC-I — категория сейсмостойкости I (seismic category I);

SC-II — категория сейсмостойкости II (seismic category II);

SC-II/I — категория сейсмостойкости переходная от II к I (seismic category II over I);

SDOF — одна степень свободы (single-degree-of-freedom);

SRV — предохранительно-разгрузочный клапан (safety relief valve);

TES — экспериментальный спектр отклика (test experience spectrum);

TRS — испытательный спектр отклика (test response spectrum);

U.S. NRC — комиссия по ядерному регулированию США (United States Nuclear Regulatory Commission);

V&V — верификация и валидация (verification and validation);

3D — трехмерный (three-dimensional).

5 Общие сведения о сейсмической обстановке и отклике оборудования

5.1 Общие положения

В данном разделе приведена справочная информация о сейсмической обстановке и о работе оборудования во время моделируемых сейсмических событий. Приведенные числовые значения являются типичными, иллюстративными и не должны рассматриваться в качестве нормативных. Блок-схема, представленная на рисунке G.1, показывает, каким образом для квалифицируемого оборудования определяют сейсмические условия, наступающие в результате землетрясения.

5.2 Сейсмическая обстановка

Землетрясения происходят в результате образования разрывов и скользящих продольных перемещений геологических пород. Землетрясения вызывают случайные трехмерные (3D) перемещения грунта, характеризуемые одновременными, но статистически независимыми горизонтальными и вертикальными составляющими. Колебания грунта, как правило, имеют случайный характер, обладают широким диапазоном частот и вызывают потенциально разрушительные эффекты в диапазоне частот от 1 Гц до предельной частоты спектров отклика. Предельная частота обычно составляет от 32 до 50 Гц для строительных конструкций, находящихся в зоне землетрясения, за исключением центральных и восточных регионов США с грунтом из твердых пород, и в других частях мира, где возможны землетрясения, способные вызывать колебания частотой до 100 Гц. Предельная частота может быть больше, если дополнительные нагрузки, вызывающие вибрацию, сочетаются с сейсмическими нагрузками.

Длительность сильного колебания при землетрясении может составлять от 10 до 15 с, при этом само событие в целом может продолжаться значительно дольше и вызывать горизонтальное ускорение грунта от 0,1 g до 0,6 g или выше. Продолжительность сильного колебания зависит от типа грунта, расстояния от эпицентра, энергии, высвобождаемой при разрушении, и продолжительности скользящих перемещений геологических пород.

5.3 Оборудование на фундаментах

Уровень вибрации, создаваемой при движении грунта (как горизонтальном, так и вертикальном), может быть усилен или ослаблен при передаче оборудованию, установленному на фундаменте. Для любого заданного колебания грунта изменение зависит от собственных частот вибрации (грунта, фундамента, промежуточной конструкции и оборудования), жесткости, массы и геометрии здания и промежуточных конструкций, а также от механизмов демпфирования (коэффициент демпфирования может зависеть от рассматриваемых частот)[1)]. Широкополосные спектры отклика, которыми обычно описывают колебания грунта, указывают на преобладание многочастотного возбуждения.

5.4 Оборудование на опорных конструкциях

Колебание грунта (горизонтальное и вертикальное) может быть отфильтровано промежуточными строительными конструкциями, что приводит к формированию усиленных или ослабленных узкополосных колебаний внутри конструкции. Динамический отклик оборудования на опорных конструкциях может быть дополнительно усилен или ослаблен до уровня ускорения, во много раз большего или меньшего, чем максимальное ускорение грунта, в зависимости от демпфирующего эффекта и собственных частот оборудования. Узкополосные спектры отклика, которые обычно описывают движение пола здания, указывают на то, что преобладающим может быть одночастотное возбуждение. Фильтрация внутренних колебаний конструкций может происходить в гибких трубопроводных системах. Для компонентов, установленных вдали от опор трубопроводов, результирующее колебание может быть преимущественно одночастотным по своей природе и иметь частоту, равную или близкую к резонансной частоте системы трубопроводов. Для компонентов, установленных на линии трубопровода, такое резонансное состояние может стать причиной возникновения критической сейсмической нагрузки[2)].

5.5 Интерфейсы и нежелательные взаимодействия

Некоторые единицы оборудования могут иметь электрические или механические интерфейсы или располагаться в непосредственной близости друг от друга. Сейсмическая квалификация оборудования должна учитывать особенности размещения (например, опорного узла и анкерного крепления) и потенциальную возможность неблагоприятных взаимодействий, вызванных землетрясением (таких, как падение вышерасположенных компонентов, удары вследствие близкого расположения, неравномерные смещения, распыление жидкости, затопление или пожар). Если две единицы оборудования имеют механические или электрические интерфейсы, влияние неравномерного относительного смещения обеих единиц, вызванного землетрясением, следует оценивать путем рассмотрения возникающих ограничений на уровне интерфейса и путем подтверждения (посредством анализа и/или испытания) отсутствия

[1)] *При выполнении анализа оборудования на фундаментах необходимо учитывать эффекты взаимодействия конструкций с грунтовым основанием.*

[2)] *При выполнении анализа оборудования на опорных конструкциях необходимо учитывать эффекты взаимодействия конструкций с грунтовым основанием.*

влияния на эксплуатационные функции оборудования, которые должны выполняться в процессе и/или после сейсмического воздействия. Это может быть осуществлено с помощью специальных методов диагностики (методик и процедур).

5.6 Моделирование вибрации, вызванной землетрясением

5.6.1 Общие положения

Основное разрушающее напряжение в оборудовании, возникающее в результате землетрясения, зависит от интенсивности возбуждения колебаний грунта (УНП), количества циклов пиковой амплитуды, продолжительности возбуждения и усиления возбуждения, вызываемого откликом конструкций здания и/или системы, где установлено оборудование. Цель сейсмического моделирования состоит в реалистичном воспроизведении постулируемого природного землетрясения. Форма моделируемого сейсмического колебания, используемого при квалификации оборудования путем анализа или тестирования, может быть описана одной из следующих функций:

a) спектром отклика;

b) зависимостью изменений во времени;

c) спектральной плотностью мощности (PSD).

Моделируемые сейсмические колебания могут быть сгенерированы для фундамента, пола здания или опорной конструкции, на которых должно быть установлено оборудование. Данные об этом предоставляет пользователь или агент пользователя в составе спецификаций для оборудования (см. раздел 6), или генерирование происходит другими стандартными способами.

Из-за направленного характера сейсмических колебаний и ответных смещений строительных конструкций и оборудования сведения о направлении смещающих усилий и их применении к оборудованию должны быть указаны или установлены каким-либо другим соответствующим образом.

5.6.2 Спектр отклика

Спектр отклика дает информацию о максимальном отклике генераторов колебаний с одной степенью свободы (SDOF) в зависимости от частоты генерируемых колебаний и демпфирования под воздействием входных колебаний. Частотная составляющая и пиковое значение входных колебаний, т. е. УНП, должны быть указаны.

Необходимо понимать, что спектр отклика не предоставляет следующую информацию:

a) о форме волны возбуждения или временной зависимости произведенных ею возмущений;

b) продолжительности колебаний (должна быть указана в квалификационной спецификации);

c) динамической реакции любого конкретного оборудования.

Форму волны возбуждения обычно определяют путем изучения имеющихся зарегистрированных данных о землетрясениях и особенностях места, на котором расположена площадка. Общая продолжительность колебаний, а также продолжительность сильных колебаний должны быть указаны в спецификации закупок или проектной спецификации. Если продолжительность сильных колебаний не указана или не указана никакая другая информация/требование для конкретной площадки, то продолжительность сильных колебаний для сейсмических испытаний должна составлять не менее 15 с. Динамический отклик оборудования определяют исходя из его собственной частоты и характеристик демпфирования. Если оборудование не показывает никакого усиления колебаний при частотах ниже предельной частоты, то такое оборудование считают стойким.

5.6.3 Временная зависимость сейсмических колебаний

Временная зависимость сейсмических колебаний — это форма колебаний, вызванных землетрясением, обозначаемая в виде зависимости ускорения от времени. Колебания моделируют на основании данных о реальных или искусственно генерируемых землетрясениях. Применительно к любому этажу здания запись временной зависимости сейсмических колебаний отражает влияние факторов фильтрования и усиления колебаний за счет самого здания и других опорных конструкций. При наличии сведений о зависимости сейсмических колебаний времени можно с помощью дискретного анализа на основе БПФ определить ускорение как функцию частоты. Между спектром отклика и временной зависимостью сейсмических колебаний нет однозначной корреляции, поскольку данный спектр отклика может быть получен на основе нескольких временных зависимостей сейсмических колебаний.

5.6.4 Функция спектральной плотности мощности

Спектральная плотность мощности (PSD) представляет собой среднеквадратическое ускорение колебаний и описывается как функция частоты. PSD дает представление о частотном распределении мощности сигнала ускорения (мера мощности сигнала в диапазоне частот), и эту функцию обычно

используют для характеристики широкополосных стационарных случайных колебаний. Для данных о вибрации амплитуду PSD выражают в единицах ускорения в квадрате на герц [$(м/с^2)^2$/Гц или g^2/Гц]. Согласно теореме Парсеваля квадратный корень из общей площади под PSD-кривой равен среднеквадратичному значению (RMS) ускорения, рассчитанному во временной области. PSD предоставляет информацию, касающуюся непосредственно возбуждения, не учитывая влияния на множество генераторов колебаний с одной степенью свободы, в отличие от спектра отклика. Функция PSD не определяет точную форму волны или продолжительность возбуждения, но позволяет сразу увидеть важные характеристики колебания, зависящие от частоты, при взгляде на одну кривую. PSD позволяет применять соотношения между возбуждением и откликом для линейных систем, используя для этого функции преобразования.

5.7 Демпфирование

5.7.1 Общие положения

Демпфирование — это общее наименование различных механизмов рассеяния энергии в системе. На практике демпфирование зависит от многих параметров, таких как конструктивные особенности системы, режим вибрации, деформация, нормальная составляющая силы, скорость потоков и вращений, материалы, соединения и возникающие трения. В теории линейных колебаний существует упрощающее допущение о том, что демпфирование вызвано исключительно вязкостными свойствами системы или является пропорциональным относительной скорости движущихся частей. Поэтому, когда речь идет о количественном показателе демпфирования в реально существующей системе, обычно принимают это значение эквивалентным вязкости или линейно зависимым. Это удобное упрощение, связывающее реальное поведение аппаратных средств, которое может быть до некоторой степени нелинейным, с теоретическими концепциями, которые обычно используют линейные методы анализа.

Разумно предположить, что фактическое демпфирование по природе нелинейно. Для большинства оборудования демпфирование является функцией амплитуды отклика, зависящей от таких факторов, как трение внутри материала или в соединениях между компонентами, трение скольжения кулоновского типа. Для аналитических целей эти механизмы рассеяния энергии часто можно рассматривать приблизительно как линейное демпфирование, если должным образом учитывать тот факт, что эти приближенные представления изменяются, иногда значительно, с увеличением отклика. Например, низкоимпедансные испытания для определения эффекта демпфирования следует использовать с осторожностью, так как при сильных колебаниях, характерных для землетрясений большой мощности, вышеупомянутые факторы могут привести к тому, что реальное демпфирование будет совершенно иным и гораздо выше, чем при измерении на низких уровнях.

Для оборудования, являющегося сборкой компонентов, обычно не существует единого значения количественного показателя демпфирования. Свой эффект демпфирования характерен для каждой отдельной части оборудования, начиная от сварных или соединенных болтами конструкций, и заканчивая однородным материалом. Величина демпфирования может варьироваться от места к месту в зависимости от множества факторов. Поэтому, когда указывают количественный показатель демпфирования для оборудования, обычно приводят диапазон типичных значений. Так как разным режимам вибрации конструкции могут соответствовать разные значения показателя демпфирования, что чаще всего и происходит, то при проведении анализа следует указывать, к какому режиму вибрации оборудования в интересующем диапазоне частот относится значение показателя демпфирования.

5.7.2 Измерение демпфирования

5.7.2.1 Общие положения

Теория линейных колебаний показывает, что существует множество методов измерения демпфирования. Следует проявлять особую осторожность при установлении соотношения между идеальной моделью и практической системой. Например, редко удается найти для оборудования положение точек, которые точно соответствуют элементам сосредоточенной массы в модели. Некоторые методы расчета, относящиеся к демпфированию колебаний, основаны исключительно на предположениях (например, моделирование конструкции в виде сборки генераторов колебаний с одной степенью свободы).

Недопустимо проводить расчеты демпфирования исходя непосредственно из максимального отклика на резонансном пике, измеренного в любой точке оборудования, и величины входного возбуждения синусоидальной развертки, поскольку отклик точек оборудования обычно определяется вектором формы колебаний и коэффициентом участия для каждого режима вибрации. Для оценки демпфирования обычно используют перечисленные ниже методы, но допускается использовать и другие обо-

снованные методы. Они основаны на допущении, что в оборудовании может существовать один режим вибрации, а датчики движения установлены в местах, которые не находятся в состоянии покоя при возбуждении колебаний. Во всех случаях следует соблюдать осторожность при определении того, является ли существенной нелинейность демпфирования по отношению к амплитуде отклика.

5.7.2.2 Определение демпфирования путем измерения скорости затухания

Эквивалент демпфирование за счет внутреннего трения (вязкости) может быть рассчитан путем регистрации скорости затухания при конкретном режиме вибрации. Такой порядок расчета часто называют методом логарифмического декремента.

5.7.2.3 Определение демпфирования путем измерения ширины полосы отклика на уровне половинной мощности

Возбуждение оборудованию должно передаваться медленно распространяющейся синусоидальной вибрацией. Измеряют отклик в любой необходимой точке оборудования и отображают графически как функцию частоты. Исходя из полученных графиков отклика может быть рассчитано демпфирование для каждого режима вибрации путем измерения ширины соответствующего резонансного пика в точке половинной мощности. Такую процедуру расчета часто называют методом измерения ширины полосы на уровне половинной мощности.

5.7.2.4 Определение демпфирования методами аппроксимации кривой

Оборудование подвергают воздействию синусоидального, случайного или нестационарного возбуждения и разрабатывают функцию преобразования отклика. Демпфирование колебаний вычисляют путем подбора математической модели для фактических данных о частоте сигнала отклика (передаточной функции). Подбор кривой позволит ослабить влияние любых шумов или небольших ошибок эксперимента.

5.8 Учет демпфирования

5.8.1 Общие положения

Диапазоны демпфирования, измеренные в соответствии с 5.7.2, являются ценными данными для проектировщика оборудования. Демпфирование используют различным образом при проведении квалификационных испытаний и анализов, как описано в 5.8.2 и 5.8.3.

5.8.2 Применение демпфирования при испытаниях

5.8.2.1 Общие положения

При испытании оборудование может быть квалифицировано путем воздействия на него имитируемого сейсмического толчка, определяемого требуемым спектром отклика (RRS). Спектр отклика определяет сейсмический толчок через пиковый отклик множества генераторов колебаний с одной степенью свободы.

5.8.2.2 Широкополосное возбуждение

Поскольку генераторы являются гипотетическими, в RRS может быть использовано любое фактическое значение критического демпфирования для испытаний, например 5 %, и оно не обязательно должно соответствовать реальному демпфированию оборудования (следует обратить внимание на отличие от использования RRS в анализе, где значение демпфирования должно быть связано с реальным оборудованием). Применение требуемых спектров отклика (RRS) и испытательных спектров отклика (TRS) при выборе приемлемых испытательных колебаний приведено в 8.6.1. Для значений критического демпфирования в спектрах отклика существуют следующие соотношения:

a) при сравнении RRS и TRS предпочтительно, чтобы демпфирование в обоих случаях было одинаковым;

b) при сравнении RRS и TRS, когда демпфирование не совпадает, применяют следующие условия:

1) если демпфирование для TRS превышает демпфирование для RRS и соблюдено соответствие критериям, указанным в 8.6.1, то квалификация возможна, так как в этом случае она обеспечивает запас прочности,

2) если демпфирование для TRS меньше демпфирования для RRS, заключение о квалификации невозможно без дальнейшей оценки. Одна из возможностей заключается в повторном анализе тестовых колебаний с целью получения TRS для приемлемого значения демпфирования и возможности применения критериев, указанных в перечислении a) или b1).

5.8.3 Применение демпфирования в анализе

При анализе создают математическую модель оборудования, позволяющую прогнозировать отклик на сейсмические колебания. Для более точного прогноза отклика значение демпфирования, используемое в этой модели, должно соответствовать фактическому рассеянию энергии в оборудовании. Альтернативный подход заключается в использовании консервативного значения линейного затухания для получения консервативной оценки отклика. В любом случае необходимо знать диапазоны демпфирования для конкретного оборудования, а также природу нелинейностей и их влияние на отклик. Соответствующие значения демпфирования могут быть получены в результате испытаний или из других обоснованных источников.

Как правило, в большинстве случаев конструктивные системы предполагают демпфирование за счет трения, однако некоторые шкафы или корпуса оборудования могут иметь демпфирование другого характера. Решение такой проблемы является аналитически сложным и должно проводиться с использованием соответствующих методов.

Нелинейности могут существовать в дополнение к тем, которые связаны с демпфированием. Подробнее см. в 11.3.

6 Требования к квалификации по критерию сейсмостойкости

6.1 Общие положения

Квалификация является формальным процессом, в ходе которого четко регистрируемым и отслеживаемым способом достигается требуемая наглядность, чтобы можно было констатировать применимость и правильность квалификации. Требования к квалификации, как правило, детально излагают в закупочной или проектной спецификации, где наряду с этими требованиями указывают также нормы и стандарты, соответствие которым необходимо подтвердить. Настоящий стандарт предполагает, что требования четко определены, понятны и представлены как часть квалификационной спецификации оборудования. Спецификация должна включать специальные требования к испытаниям, анализу, установлению сходства или методам, основанным на опыте. Спецификация для программы сейсмической квалификации должна включать, как минимум, следующее:

- спецификацию подлежащего квалификации оборудования;
- условия старения, которые необходимо учитывать в процессе квалификации;
- спецификацию требований к сейсмостойкости;
- спецификацию критериев приемлемости.

Сразу после установления требований можно определить, будет ли квалификация проведена путем испытания, анализа, установления сходства, на основе опыта или с использованием комбинации этих методов.

Методы, используемые для квалификации оборудования, приведены в разделе 7.

6.2 Спецификация подлежащего квалификации оборудования

Необходимо предоставить четкую спецификацию оборудования. Спецификация должна содержать:

- описание физических свойств оборудования, его марку/модель/тип, чертеж, регистрационный номер, физические/эксплуатационные характеристики и т. д.;
- определение важных для безопасности устройств и схем, а также их функцию(и) безопасности во время и после старения и MP3/S2;
- границы оборудования, подлежащего квалификации (включая пространственные ограничения или потенциальные взаимные ограничения);
- электрические и механические нагрузки и соединения;
- подробности установки и монтажа, включая ориентацию до первой опоры;
- среда, в которой оборудование должно выполнять свою(и) функцию(и) безопасности;
- условия эксплуатации оборудования.

6.3 Спецификация условий старения

Условия старения, обусловленные условиями окружающей среды на АС (нормальные, нарушение нормальных условий, аварийные) и условиями эксплуатации, которые необходимо учитывать в процессе квалификации, должны быть определены в соответствии с идентификацией компонентов и

условий использования оборудования. Контроль состояния (например, по IEC/IEEE 60780-323) в сочетании с контролем условий старения для оценки деградации, если это предусмотрено, проводят только в том случае, когда существует известная зависимость между деградацией контролируемого компонента вследствие старения и деградацией функции безопасности оборудования. Должны быть указаны границы испытаний, применяемые при испытании на старение (например, по IEC/IEEE 60780-323). Дополнительная информация приведена в разделе 8.

6.4 Спецификация требований к сейсмическим колебаниям

Необходимо четко определить данные требования. Они должны включать, как минимум, следующее:

- длительность сильных колебаний при землетрясении (см. 5.6.2);
- горизонтальные и вертикальные сейсмические колебания (например, RRS, PSD, временная зависимость) при сейсмических испытаниях, соответствующие уровням ПЗ/S1 и МРЗ/S2;
- при отсутствии RRS необходимо указать максимальные ускорения колебания пола или конструкции на всех значимых частотах либо представить временную зависимость;
- обоснованное число ПЗ/S1, по которому следует проводить квалификацию оборудования перед его квалификацией на стойкость к МРЗ/S2 для каждой площадки, или использовать число ПЗ/S1, равное 5;
- детали о числе сейсмоволн при МРЗ/S2 (если необходимо);
- относительные ограничения/смещения в местах механических/электрических соединений оборудования (кроме монтажных соединений), вызванные землетрясением;
- запас прочности, применяемый при испытаниях на сейсмостойкость для уровней ПЗ/S1 и МРЗ/S2. Для получения дополнительной информации см. IEC/IEEE 60780-323.

6.5 Спецификация критериев приемлемости

Оценка работоспособности оборудования с целью его квалификации должна быть основана на заранее установленном наборе критериев приемлемости. При этом не должны иметь место следующие минимальные условия, насколько это возможно:

a) разрушение или прогиб конструкции, которые могут затруднять или препятствовать выполнению любой важной для безопасности функции;

b) потеря выходного сигнала;

c) ложный или нежелательный выходной сигнал;

d) значительное отклонение уставки или уставки отключения с учетом указанной точности;

e) потеря требуемых эксплуатационных характеристик (функциональных и электрических);

f) нарушение целостности границ контура под давлением.

Указанные критерии приемлемости согласно разделу 8 должны быть определены до и после испытаний на старение, а также до, во время и после испытаний на сейсмостойкость. Исходные и пост-сейсмические функциональные испытания проводят в начале и в конце программы соответственно в целях получения точных референтных данных о характеристиках испытуемых образцов оборудования. Число и тип испытаний, проводимых в качестве исходных функциональных испытаний, могут отличаться от числа и типа пост-сейсмических функциональных испытаний.

7 Подход к квалификации на сейсмостойкость

7.1 Функция безопасности

Квалификация на сейсмостойкость оборудования категории сейсмостойкости I (SC-I) должна демонстрировать способность оборудования:

- выполнять необходимую(ые) функцию(ии) безопасности во время и/или после того, как оно подверглось воздействию сил, вызванных МРЗ/S2;
- избегать ложного срабатывания при воздействии на него сил, вызванных МРЗ/S2, которое может поставить под угрозу выполнение функции(й) безопасности.

Оборудование, квалифицированное как оборудование категории сейсмостойкости I, должно демонстрировать способность выполнять свою функцию безопасности во время и/или после землетрясения. Необходимые функции безопасности зависят не только от самого оборудования, но также от системы и АС, в составе которых оно должно функционировать. Функции безопасности во время земле-

трясения могут быть такими же, но нередко отличаются от функций безопасности, необходимых после землетрясения. Например, от электрического устройства может быть востребовано следующее (или комбинация следующего):

a) не иметь ложных срабатываний во время землетрясения;

b) выполнять назначенную(ые) функцию(и) как во время, так и после землетрясения;

c) выдержать землетрясение и продолжить выполнять назначенную функцию после него.

Для поддержания целостности конструкции во время землетрясения как отдельной задачи может потребоваться другое устройство. Настоящий стандарт исходит из того, что указанные в нем требования понятны, а определение функции(й) безопасности является частью спецификации на квалификацию оборудования. Пользователь отвечает за проверку того, что выбранный подход к проведению квалификации соответствует всем требованиям.

Если функция(и) безопасности оборудования требует демонстрации работоспособности во время землетрясения, то это осуществляют на одном из этапов квалификационных испытаний путем моделирования сильных колебаний.

Для квалифицируемого посредством испытаний оборудования, имеющего более одной функции безопасности, может потребоваться несколько MP3/S2 для демонстрации надлежащего выполнения всех функций безопасности. Кроме того, оборудование должно выдержать воздействие серии ПЗ/S1 [см. 9.1.7, 11.5, A.2.4.2, перечисление b) и A.3] до применения к нему MP3/S2. При отсутствии более точной информации обычно считают достаточным проведение пяти испытаний на устойчивость к ПЗ/S1.

7.2 Методы квалификации на сейсмостойкость

В настоящем стандарте представлены наиболее часто используемые методы квалификации на сейсмостойкость. Эти методы делят на пять категорий:

a) испытание (в моделируемых сейсмических условиях);

b) метод сходства (основанный на сейсмических испытаниях аналогичного оборудования);

c) анализ;

d) сочетание испытания и анализа;

e) методы, основанные на имеющихся опытных данных.

В приложении G приведены блок-схемы, иллюстрирующие данное деление.

Испытания на сейсмостойкость, входящие в состав общей программы квалификации, должны быть проведены в надлежащей последовательности и с соответствующими допусками на испытания, указанными в IEC/IEEE 60780-323. Необходимо также принять меры по идентификации и описанию значимых механизмов старения с учетом допусков на испытания, как указано выше. Выполняя данные указания, следует продемонстрировать способность оборудования выполнять назначенную ему функцию безопасности на протяжении всего аттестованного срока службы, а также функциональную работоспособность оборудования во время и/или после MP3/S2 в конце его аттестованного срока службы.

Метод сходства основан на сравнении с предыдущими испытаниями аналогичного оборудования. Квалификационные испытания референтного оборудования и полученные при этом аналитические данные экстраполируют, основываясь на сходстве возбуждающего воздействия (сейсмической активности), физической системы и функциональности оборудования. Сходство физической системы и функциональности оборудования устанавливают на основе анализа данных, касающихся проектирования, эксплуатации, закупки, производства и испытаний, в целях подтверждения способности оборудования-кандидата функционировать в соответствии со спецификациями квалифицированного референтного оборудования.

Метод анализа предназначен для квалификации оборудования в тех случаях, когда для демонстрации выполнения им своих проектных функций вполне достаточно одной конструктивной целостности в условиях сейсмических и других статических и динамических нагрузок.

Квалификацию оборудования на основе опытных данных (см. приложение A) следует рассматривать как частный случай метода сходства [метода b)].

Каждый из указанных выше методов или иные обоснованные методы могут быть применены для проверки способности оборудования соответствовать требованиям квалификации на сейсмостойкость, включая допуски, приводящие к неопределенностям. Выбор должен быть основан на практичности метода для данного типа, размера, формы и сложности конфигурации оборудования, независимо от того, требуется ли оценка работоспособности с точки зрения выполнения функции безопасности или только с точки зрения конструктивной целостности, а также на надежности выводов. Вне зависимости от вы-

бранного метода необходимо идентифицировать и описать механизмы старения (раздел 8), которые могут влиять на состояние и поведение оборудования во время и после землетрясения.

Оборудование, относящееся к категории сейсмостойкости II (SC-II), непрерывной работы которого не требуется во время или после землетрясения, но отказ или взаимное влияние которого может снизить до недопустимого уровня работоспособность оборудования категории SC-I, находящегося с ним в непосредственной близости, должно быть способно сохранять конструктивную целостность в такой степени, чтобы сейсмические события силой до MP3/S2 включительно не могли вызвать отказ в работе оборудования категории SC-I. Для оценки оборудования, относящегося к категории SC-II, используют методы квалификации на сейсмостойкость, установленные в настоящем стандарте. Оборудование категории SC-II, находящееся в непосредственной близости от оборудования категории SC-I, обычно относят к категории сейсмостойкости, переходной от II к I (SC-II/I).

8 Старение

8.1 Общие положения

Согласно IEC/IEEE 60780-323 оценка признаков старения оборудования в соответствии с программой испытаний необходима, чтобы определить, оказывает ли старение существенное влияние на способность оборудования выполнять назначенную(ые) функцию(и) безопасности. Важное для безопасности оборудование, подверженное, как установлено, значительному старению, должно быть признано непригодным к концу срока службы до проведения испытаний в условиях проектных событий (DBE). Для такого оборудования следует устанавливать аттестованный срок службы. При определении аттестованного срока службы учитывают деградацию характеристик оборудования до, во время и после аварийных условий в зависимости от применимых требований. Установление аттестованного срока службы тесно связано и с установлением аттестованного состояния. Аттестованным состоянием считают такое состояние деградации, при котором оборудование демонстрирует нормальное функционирование во время последующего DBE.

В соответствии с IEC/IEEE 60780-323 для оборудования, не испытывающего действия значительных механизмов старения и работающего в умеренных условиях окружающей среды, меры, предохраняющие от старения, и установление аттестованного срока службы не требуются, если была выполнена оценка или проведен анализ на предмет старения, которые показали, что условия эксплуатации в течение срока службы оборудования не приводят к повышению вероятности отказа во время сейсмического события.

8.2 Термическое старение

Термическое старение необходимо учитывать, если оно может привести к изменению механических свойств материалов, из которых изготовлено оборудование (герметичности, коэффициента демпфирования). Особое внимание следует уделять термическому старению полимерных материалов, используемых для изготовления изоляции, соединений и разъемов. Термическое окисление может приводить к повышению хрупкости материала. Термическое старение может быть смоделировано в ходе испытания на ускоренное термическое старение. При таком испытании особое внимание должно быть уделено выбору режимов подъема температуры и связанной с этим продолжительности испытаний.

8.3 Радиационное старение

Радиационное старение необходимо учитывать, если оно может привести к изменению механических свойств материалов, из которых изготовлено оборудование. Особое внимание следует уделять старению под воздействием радиационного облучения полимерных материалов, используемых в гермооболочке, и металлов, подвергаемых облучению потоком нейтронов высокой плотности (например, корпуса, блока контрольно-измерительных приборов, расположенных в непосредственной близости от активной зоны).

8.4 Ухудшение свойств и коррозия материалов

Ухудшение свойств и коррозию материалов оборудования необходимо внимательно изучать. Для учета данных явлений следует проводить испытания на воздействие температуры и влаги (при нормальных и аномальных условиях окружающей среды), а также, при необходимости, химические испытания.

8.5 Старение при циклических механических или электрических воздействиях

Износ по причине циклических механических или электрических воздействий необходимо учитывать для всех видов оборудования, чьи подвижные части часто используются в ходе эксплуатации АС. Для учета этих явлений рекомендуется проводить эксплуатационные испытания, методики которых в значительной степени зависят от используемых технологий и в настоящем стандарте не описаны.

8.6 Вибрационное старение

8.6.1 Общие положения

Квалификационным испытаниям оборудования на сейсмостойкость, предназначенным для демонстрации надлежащего функционирования оборудования в ходе и/или после МРЗ/S2, должны предшествовать испытания, воспроизводящие усталостный эффект от серии ПЗ/S1, установленной для каждой площадки, а также усталостные эффекты, эквивалентные эффектам от присущих АС и установленных вибраций, возникающих при нормальных и переходных эксплуатационных режимах. Рекомендуется моделировать эквивалентные условия, соответствующие сроку службы испытуемого объекта, по мере возможности, однако следует, как минимум, достичь эквивалентных усталостных явлений, соответствующих сроку службы или аттестованному сроку службы оборудования.

Испытания на вибрационное старение призваны показать, что уровни вибрации, связанной с нормальными и переходными режимами эксплуатации АС, а также с землетрясениями более низкой мощности (ПЗ/S1), случающимися с более высокой вероятностью, не окажут негативное влияние на выполнение оборудованием функций безопасности и не приведут к состоянию, которое, не будучи своевременно выявленным, может стать причиной отказа в выполнении этих функций в ходе последующего МРЗ/S2. Данные испытания могут также предусматривать часть требований, приведенных в IEC/IEEE 60780-323.

Испытания на вибрационное старение должны предшествовать испытаниям на воздействие ПЗ/S1 и МРЗ/S2. Испытания на воздействие вибрации, возникающей при эксплуатации АС, обычно проводят в соответствии с IEC 60068-2-6 (Test Fc) или IEEE Std 382™, если не оговорено иное. Требования к испытаниям на вибрационное старение, такие как скорость качания частоты, диапазон цикла качания, число циклов качания или их продолжительность, а также заданная амплитуда, указывают в спецификации испытаний. Как правило, испытания проводят по каждой оси отдельно путем качания частоты от нижнего предела частот (например, 1 Гц) до верхнего предела частот (F Гц), который как минимум в два раза превышает предельную частоту. Если не указано иное, то скорость качания должна составлять 1 окт./мин.

8.6.2 Старение в условиях несейсмических вибраций

Испытания на стойкость к заданной вибрации, связанной не с сейсмической активностью, а с вибрацией здания и вибрацией, сопутствующей нормальному и переходному режимам эксплуатации оборудования, могут быть совмещены с испытаниями на сейсмостойкость по IEC/IEEE 60780-323 в части соответствующих требований. Для этого необходимо продемонстрировать, что циклы амплитудной характеристики, достигнутые в испытаниях на сейсмостойкость, исключая характеристики, зависящие от условий низкоцикличной усталости сейсмического характера, превышают эквивалентные циклы амплитудной характеристики, обусловленные вибрационными нагрузками несейсмического происхождения (см. 9.6.5 и приложение Е). Допускается использовать результаты любых испытаний, проводимых до испытаний на воздействие МРЗ/S2.

Особое внимание следует уделять установлению эквивалентности в тех случаях, когда несейсмические вибрационные нагрузки, такие как нагрузка от срабатывания предохранительно-разгрузочного клапана (SRV), содержат значительную частотную составляющую, превышающую предельную частоту, или в случаях, когда применяемая возмущающая функция несейсмического происхождения существенно отличается от возбуждающих колебаний, моделируемых при испытаниях, описанных в 9.2—9.5. В последнем случае нагрузка несейсмического происхождения может привести к вибрации оборудования, не вызванной движениями фундамента.

Циклы амплитудной характеристики могут быть установлены в ходе анализа, описанного в разделе 11, или путем коротких испытаний оборудования в моделируемых условиях несейсмической вибрации.

8.6.3 Гидродинамические нагрузки

Часть оборудования АС подвергается воздействию вибрационных нагрузок, относящихся к гидродинамическим нагрузкам [включая нагрузки, связанные со срабатыванием SRV и авариями с потерей

теплоносителя (LOCA)]. Влияние гидродинамических нагрузок отражают в требованиях к старению и, соответственно, в требованиях к испытаниям.

Так как прочность конструкции и работоспособность компонентов следует оценивать в соответствии со спецификациями, учитывающими сейсмические и прочие вибрационные нагрузки, для получения RRS может потребоваться комбинированный спектр, т. е. спектр отклика на ПЗ/S1 или МРЗ/S2, совмещенный со спектром отклика на прочие вибрационные нагрузки. RRS для проведения испытаний может быть получен путем соответствующей комбинации отдельных спектров, например нахождением квадратного корня из суммы квадратов (ККСК) или суммы абсолютных значений. Данная ситуация может привести к изменению RRS для испытаний, включая увеличение предельной частоты.

8.6.4 Старение при сейсмической активности (ПЗ/S1)

Квалификационные испытания оборудования на сейсмостойкость должны включать испытания на воздействие ПЗ/S1, предшествующие испытанию на воздействие МРЗ/S2 и воспроизводящие ряд эквивалентных циклов максимальной амплитуды (не менее, чем указано в 9.6.5) для каждого заданного сейсмического события. Более подробная информация приведена в 9.1.7.

9 Испытания[1)]

9.1 Общие положения

9.1.1 Программа испытаний

Оборудование испытывают при моделируемых условиях эксплуатации, соответствующих либо требованиям ожидаемой эксплуатации, либо их предельным значениям. Устройства должны быть установлены на вибрационном стенде таким образом, который динамически моделирует рекомендуемую монтажную схему. За принятие решения о пригодности вибрационного стенда к проведению заявленного вибрационного испытания ответственность несет организация, обслуживающая испытательный стенд.

Некоторые виды оснащения, такие как шкафы с привинченными дверями или панелями, издают при испытании дребезжание, дрожание, грохот или стук. Эти состояния могут передаваться оборудованию и приводить к более высоким уровням ускорения на частотах, превышающих частоту первоначального возбуждающего сигнала, поданного на вибрационный стенд. Таким образом, низкочастотный исходный сигнал может вызвать высокочастотный отклик, который может оказать негативное воздействие на устройства, установленные в оборудовании, и который необходимо учитывать при квалификации оборудования. В этом случае предпочтительнее проводить испытание сборки. Альтернативно при испытании сборки получают RRS места монтажа устройства, включающий эффекты от указанных выше состояний во временной зависимости, и для учета этих эффектов анализируют колебания при соответствующих высоких частотах. После этого устройства могут быть испытаны с использованием методов, описанных в 9.4, или любых других допустимых методов. При наличии данных условий необходимо принять дополнительные меры, чтобы при испытании устройства можно было убедиться в консервативности временной зависимости продолжительности, амплитудной и частотной составляющих. К методам подтверждения адекватности частотной составляющей относится графическое изображение TRS или PSD при более высоких частотах.

В настоящем разделе представлены методы испытаний, которые могут быть использованы для квалификации оборудования по сейсмостойкости. Эти методы проиллюстрированы схемой на рисунке G.2. Испытания на сейсмостойкость проводят, подвергая оборудование воздействию вибрации, которая более или менее точно имитирует вибрацию, предполагаемую на месте монтажа оборудования во время землетрясения. Процедуры приведенных здесь методов являются наиболее распространенными из используемых в настоящее время, однако допускается применение других обоснованных методов. Теоретические основы методик испытаний не входят в область применения настоящего стандарта. С ними можно ознакомиться в литературе о динамике взаимодействий. При разработке программы испытаний для квалификации оборудования возникает одна практическая проблема, связанная с выбором параметров землетрясения, поскольку должно быть учтено много факторов (см. раздел 5). К таким факторам относятся место расположения оборудования, характер оборудования, характер предполагаемых сейсмических воздействий и др. Также необходимо учитывать, предполагается ли использование

[1)] *Испытания на виброустойчивость и вибропрочность проводят в соответствии с НП-031-01 «Нормы проектирования сейсмостойких атомных станций».*

данного оборудования по одному или нескольким назначениям. Если оборудование используют только по одному назначению, характер сейсмического воздействия может быть установлен и может быть выбран метод квалификационных испытаний на соответствие спецификации (контрольное испытание). Если оборудование имеет несколько назначений, программа квалификационных испытаний оборудования должна предусматривать проведение нескольких контрольных испытаний, учитывающих каждое назначение, или проведение общего испытания. Информация о контрольном испытании и общем испытании приведена в 9.2. Испытания на условную вероятность отказа при сейсмическом воздействии, проводимые для установления предела возможностей оборудования, описаны в 9.3. Еще один фактор, который следует учитывать, заключается в разнонаправленном характере сейсмических воздействий землетрясения. В ходе испытаний оборудования необходимо учесть эти разные направления воздействия. Эти вопросы более подробно рассмотрены в 9.6.6.

Другая задача практического характера возникает при попытке конкретизировать испытания устройств (реле, двигателей, датчиков и т. д.) и сложных сборок, таких как панели управления. В первом случае целесообразно предположить, что устройство может быть испытано на сейсмостойкость путем моделирования эксплуатационных условий и осуществления контроля его рабочих характеристик в ходе испытания, однако для испытания сложного оборудования, такого как панели управления, данный подход нельзя считать правильным. В состав таких панелей, как правило, входит много устройств, которые являются частью нескольких систем, распределенных среди множества других панелей, расположенных в разных частях промышленного объекта. Испытание таких панелей в эксплуатационных условиях может быть практически невыполнимым, и в таких случаях рекомендуется использовать следующий альтернативный подход. Соответствующее входное вибрационное воздействие (RRS) применяют к панели с установленными реальными, но не функционирующими устройствами или с устройствами, динамические свойства которых имитированы. Динамический отклик от мест расположения устройств измеряют и используют в качестве исходных критериев для квалификации отдельных устройств в эксплуатационных условиях (см. 9.4 и 9.5). Цель установки нефункционирующих устройств заключается в моделировании динамических характеристик, которыми будет обладать панель при ее использовании.

Следует отметить, что оборудование, которое прошло испытания на вибрационном стенде, как правило, не следует устанавливать на АС, если только не будет продемонстрировано, что циклы напряжений, уже испытанные оборудованием, не снизили его способность выполнять назначенную ему функцию(и) безопасности во всех предполагаемых условиях применения (включая условия землетрясения).

Вне зависимости от объекта испытаний (устройства или сборки) и вида испытаний, которые необходимо провести (контрольные, общие или испытания на условную вероятность отказа при сейсмическом воздействии), следует принять во внимание ряд общих аспектов. Перечень данных аспектов приведен в 9.1.2—9.1.6.

Соответствие заданным критериям приемлемости должно соблюдаться до, во время и/или после проведения испытания на воздействие MP3/S2. Аспекты, связанные с функциональными возможностями оборудования во время и/или после MP3/S2, рассмотрены в последующих подразделах. Важно отметить, что для оборудования с более чем одной функцией безопасности или режимом эксплуатации могут потребоваться дополнительные испытания на воздействие MP3/S2 для демонстрации надлежащего выполнения всех функций безопасности и подтверждения характеристик во всех режимах эксплуатации.

9.1.2 Монтаж

Оборудование, подлежащее испытанию, монтируют на вибрационном стенде таким образом, который имитирует монтаж для эксплуатации. Методы монтажа должны быть такими же, как рекомендуемые методы монтажа для эксплуатации. Следует использовать, отражая это в документации, рекомендованные размеры и типы болтов, моменты затяжки, варианты конфигурации, а также типы, размеры и формы сварных швов. Необходимо учесть влияние электрических соединений, коммуникаций, измерительных линий и любых других зон сопряжения, соединения следует осуществить до состояния исходного интерфейса, если не указано иное. Пространственная ориентация оборудования при испытании должна быть задокументирована и должна соответствовать той ориентации, которая предусмотрена для квалификации оборудования, если нельзя предоставить надлежащее обоснование возможности распространения квалификации на другие ориентации, не использованные при испытании. Метод монтажа оборудования на вибрационном стенде необходимо задокументировать, следует предоставить описание любых использованных промежуточных креплений и соединений. Оборудование, устанавливаемое с помощью промежуточных испытательных креплений, должно быть смонтировано таким

образом, который воспроизводит предусмотренный монтаж и ориентацию данного оборудования на площадке АС. Промежуточные крепления, если их используют, не должны отфильтровывать или изменять частоты колебаний на входе. Влияние промежуточных креплений и соединений (включая влияние гравитационного ускорения) необходимо оценить и отразить в отчете, если они были использованы только для монтажа с целью проведения квалификации оборудования, но не его эксплуатации, чтобы убедиться в отсутствии негативного влияния данных различий на выполнение оборудованием функции(й) безопасности.

9.1.3 Мониторинг

В процессе вибрационных испытаний оборудования следует контролировать его функциональные параметры и параметры ответных вибраций.

Для оценки функциональности оборудования до, во время и после его вибрационного испытания необходимо использовать достаточный набор контрольно-измерительных приборов. Подробная информация, позволяющая выполнить данное требование, должна быть приведена в документах, относящихся к конкретному оборудованию. Выполнение данного требования часто требует приложения значительных усилий при планировании и проведении испытаний.

Для определения применяемых уровней вибрации следует использовать достаточный набор контрольно-измерительных приборов для мониторинга колебаний. При необходимости определяют отклонения и/или смещения приборов относительно предусмотренных мест их размещения и от верхней точки сборки. Рекомендуется также использовать контрольно-измерительные приборы для одновременного мониторинга ответных вибраций оборудования по всем трем входным осям прямоугольной системы координат в тех точках конструкции, где отклик оборудования характеризует целостность его конструкции и функциональность. Эти данные могут быть полезными для анализа конструктивного исполнения, анализа функциональных отказов, внесения изменений в проект или принятия решения о замене устройств, определения спектров отклика конструкций и других применений. Расположение датчиков вибрации и систем(ы) функционального мониторинга должно быть задокументировано.

9.1.4 Нагрузки

При квалификационных испытаниях на сейсмостойкость оборудование необходимо подвергнуть испытаниям при нормальных условиях эксплуатации (электрических, механических, тепловых нагрузках, давлении и др.), а также при других проектных условиях, которые могут оказывать негативное влияние на функцию безопасности. При моделировании таких нагрузок их значение должно быть обосновано. Если влияние нагрузок не включено в программу испытания, это также должно быть обосновано.

9.1.5 Восстановительный ремонт

9.1.5.1 Общие положения

Любые действия по восстановлению оборудования, выполняемые в ходе реализации программы испытаний, могут быть подразделены на техническое обслуживание или ремонт в зависимости от их сложности и значимости. Примерами технического обслуживания являются калибровка реле и повторная затяжка креплений технических средств. Примерами ремонта являются сварка или повторная сварка частей оборудования, замена поврежденных компонентов, таких как срезанные болты, и повторная затяжка незакрепленных электрических клемм.

Устройства, показавшие неудовлетворительные результаты испытаний, необходимо отремонтировать, модифицировать или заменить, но в любом случае испытание оборудования следует повторить в полном объеме и результаты повторных испытаний должны быть удовлетворительными, если не обосновано иное. В случае замены устройств во время проведения испытания данные устройства следует заменить и при необходимости состарить в соответствии с общими критериями, приведенными в IEC/IEEE 60780-323.

9.1.5.2 Инспекционный контроль

В начале и в процессе всего испытания осуществляют инспекционный контроль с целью подтверждения того, что испытуемый(е) образец(ы) не был поврежден при транспортировке, обращении с ним персонала или проведении испытаний, а также для проверки соответствия образца(ов) спецификациям. Если для проведения надлежащего инспекционного контроля необходимо провести демонтаж, то при этом следует принять соответствующие меры предосторожности. Описание физического состояния оборудования отображают в квалификационной документации. При этом необходимо задокументировать состояние электрической изоляции, механических частей, подшипников, смазочных материалов, электрических контактов, электропроводки, зубчатых передач, соединений и других составных частей.

По завершении испытаний оборудование должно пройти визуальный осмотр, включая, если это необходимо, демонтаж. При этом в квалификационную документацию следует включить описание физического состояния оборудования и результаты контроля его параметров.

9.1.5.3 Техническое обслуживание

При необходимости проведения технического обслуживания серьезность имеющейся проблемы определяют и подробно описывают в отчете об испытании. После проведения технического обслуживания испытание может быть продолжено. Когда техническое обслуживание проводят при испытании на воздействие ПЗ/S1, такое обслуживание становится частью проверок и процедур, выполняемых в отношении оборудования на месте после сейсмического события.

9.1.5.4 Ремонт

При необходимости проведения ремонта в ходе испытания на воздействие ПЗ/S1 после его проведения испытание повторяют, если не указано иное. При необходимости проведения ремонта в ходе или после испытания на воздействие МРЗ/S2 повторное испытание следует проводить в соответствии с общим требованием, если не указано иное. Если во время испытания оборудования на воздействие МРЗ/S2 возникает состояние, требующее ремонта, но не препятствующее выполнению функции безопасности в процессе или после испытания, а воздействие МРЗ/S2 не носит нарастающего характера, связанного с испытаниями по другим осям, и не приводит к неприемлемому повреждению оборудования, делающему невозможными последующие квалификационные испытания [например, к аварии с потерей теплоносителя (LOCA)], то допускается продолжить испытание, не повторяя его сначала. Если ремонт заключается в изменении конструкции, оборудование должно пройти повторное испытание, если не допускается иное. Подробную информацию о проведенных ремонтных работах необходимо включить в отчет об испытании.

9.1.6 Предварительные исследовательские испытания

9.1.6.1 Общие положения

Предварительные исследовательские испытания, такие как испытания, направленные на поиск резонанса с целью определения собственной частоты колебаний и эффекта демпфирования оборудования, могут быть проведены до испытаний на вибрационное старение и после сейсмических испытаний по определению ухудшения характеристик оборудования. Полученные данные могут быть использованы для улучшения конструктивного исполнения оборудования и для уменьшения количества дополнительных испытаний при его квалификации.

Предварительные вибрационные испытания, как правило, не входят в состав требований к квалификации оборудования на сейсмостойкость, но могут помочь в определении наилучшего метода испытаний для квалификации или в установлении динамических характеристик оборудования. Такие исследовательские испытания с низким уровнем колебаний на входе обычно называют поисками резонансных частот. Их, как правило, проводят с использованием вибраций на входе, уровень которых значительно ниже требуемого уровня вибраций при квалификации по сейсмостойкости. Данные испытания могут быть проведены несколькими способами. Наиболее распространенным методом предварительных вибрационных испытаний является поиск резонансных частот, осуществляемый путем однонаправленного возбуждения медленно распространяющихся синусоидальных колебаний. Отклики оборудования регистрируют по двум или трем осям для определения резонансных частот и перекрестных взаимодействий. Второй метод заключается в воздействии контролируемого импульса на оборудование в критических точках конструкции, сборе данных об импульсе и отклике на него и компьютерной обработке собранных данных с целью получения функции перехода между импульсом и откликами в разных местах. На выходе получают функцию перехода и связанную с данным аспектом информацию. Третий метод заключается в использовании широкополосного случайного входного сигнала и одновременном измерении отклика в требуемых местах.

9.1.6.2 Поиск резонансных частот по базовому возбуждению

Преимуществом данного метода предварительных исследовательских испытаний является возможность их проведения на вибрационном оборудовании того же типа, которое используют для квалификационных вибрационных испытаний. Поиск резонансных частот обычно проводят непосредственно перед квалификационным испытанием на сейсмостойкость, так как полученная при поиске информация может оказаться полезной для испытания. Резонансные частоты определяют путем оснащения конструкции акселерометрами в месте применения входного возбуждающего сигнала и в местах, где требуется зарегистрировать отклик конструкции. Как правило, используют медленно распространяющуюся синусоидальную вибрацию низкого уровня. Скорость качания частоты должна составлять две октавы в минуту или меньше, что обеспечивает возможность формирования резонанса. Общепринятый пиковый

уровень входного колебания равен 0,2 g, но данное значение может быть уменьшено во избежание повреждения оборудования или увеличено для учета нелинейных характеристик. Для получения данных о динамических характеристиках оборудования, которые могут быть полезными для обоснования квалификации по другим динамическим нагрузкам, рекомендуется проводить поиск резонансных частот в области, находящейся выше предельной частоты RRS с коэффициентом не менее 1,5.

Необходимо принять к сведению, что в случае если для проведения поиска резонансных частот оборудование установлено не на своем рабочем основании, масса и жесткость конструкции используемого основания могут оказать значительное влияние на точность получаемых результатов.

Для испытания на стенде крупногабаритного оборудования могут быть использованы спаренные модели стенд/оборудование, которые не следует трактовать как модели оборудования. Имеет место взаимодействие колебаний этих двух спаренных систем, поскольку они соединены друг с другом и энергия может передаваться от одной системы к другой. Могут быть проведены отдельные независимые друг от друга пробные вибрационные испытания оборудования и вибрационного стенда для определения их динамических характеристик.

Резонансные частоты конструкции, как правило, обнаруживают при получении усилений входных колебаний в испытуемом изделии. Фазовое соотношение между входным синусоидальным сигналом и откликом конструкции в точке измерения может также помочь в установлении резонансных частот. Более высокая степень достоверности при установлении резонанса достигается путем объединения данных об усилении и фазах колебаний. Сопоставимые результаты могут быть получены при использовании базового возбуждения широкополосным случайным колебанием низкого уровня. В этом случае функции перехода и данные о фазах получают путем анализа временных зависимостей возбуждения и отклика на основе БПФ. Следует проявлять осторожность при принятии решения о том, что необходимый объем данных получен и разрешение спектра частот по ширине полос соответствует желаемой точности функции перехода. При использовании данного метода обычно применяют анализатор на основе БПФ.

9.1.6.3 Поиск резонансных частот методами импедансов

Поиск резонансных частот методами импедансов может быть выполнен путем возбуждения колебаний конструкции при помощи небольшого портативного вибрационного устройства или в ходе ударных испытаний. Возникающим в таких условиях колебаниям обычно присуща малая амплитуда. Применять результаты таких испытаний для исследования отклика в условиях сейсмической активности большой амплитуды следует с большой осторожностью. Более подробная информация по данной теме приведена в 12.2.

9.1.6.4 Применение данных поиска резонансных частот

Все резонансные частоты необходимо задокументировать для дальнейшего возможного применения в качестве:

a) проектной информации;

b) необходимых данных для определенных методов испытания;

c) данных для использования в потенциальных квалификационных мероприятиях.

В случаях, когда можно показать отсутствие у оборудования резонанса при частотах ниже предельной частоты RRS, оборудование можно считать стойким и анализировать или испытывать его соответствующим образом. С другой стороны, при наличии резонансных частот или в случаях, когда оборудование имеет такую конфигурацию, при которой невозможно установить предельные резонансные частоты в силу сложности оборудования или недоступности критически важных частей, испытания оборудования необходимо проводить одним из нескольких методов, указанных в 9.6, или другим обоснованным методом.

Следует отметить, что вследствие нелинейного характера резонансные отклики на высоких уровнях могут отличаться по частоте и демпфированию от резонансных откликов на низких уровнях, а также что на низких уровнях резонансный отклик может вообще не возникнуть. Таким образом, предварительные исследовательские испытания на низких уровнях могут оказаться неубедительными для установления динамического отклика оборудования или для вывода об отсутствии резонансных состояний. При подозрении на нелинейность может потребоваться проведение предварительных испытаний более чем на одном уровне воздействующего ускорения.

9.1.7 Старение при сейсмической активности (ПЗ/S1)

Проведению квалификационных испытаний на сейсмостойкость, предназначенных для демонстрации надлежащего функционирования оборудования в ходе и/или после MP3/S2, должны предшествовать испытания, в рамках которых воспроизводят усталостные явления, эквивалентные эффекту

от такого числа ПЗ/S1, которое установлено для каждой площадки, а также эквивалентные эффекту от собственной вибрации АС, возникающей при нормальных и переходных режимах эксплуатации. Испытания на воздействие ПЗ/S1 и МРЗ/S2 должны воспроизводить число эквивалентных циклов максимальной амплитуды (как минимум, как указано в 9.6.5), установленное для каждого заданного сейсмического события. Например, одно МРЗ/S2 может быть эквивалентно нескольким ПЗ/S1 и быть использовано вместо нескольких ПЗ/S1. Условия площадки, как правило, соответствуют сроку службы размещенного на ней объекта, но при испытании на старение от сейсмической активности необходимо, как минимум, достичь усталостного эффекта, эквивалентного аттестованному сроку службы оборудования. Число ПЗ/S1 должно быть обосновано для каждой площадки, а в отсутствие таких указаний при испытании осуществляют воздействие, эквивалентное пяти ПЗ/S1.

9.2 Контрольные и общие испытания

Проведение контрольного испытания используют для квалификации оборудования на соответствие конкретному требованию. В качестве контрольного испытания проводят испытание оборудования одним из методов, описанных в 9.6. В ходе испытания контролируют конкретный спектр отклика, временную зависимость или другие параметры, определяемые местом монтажа данного оборудования. При этом нет необходимости предпринимать попытки исследования пороговых состояний, которые могут приводить к отказу оборудования. В связи с вышесказанным контрольное испытание требует разработки подробной спецификации. Оборудование испытывают на соответствие заданному эксплуатационному требованию, а не на установление его предельных возможностей. Общее испытание можно рассматривать как частный случай контрольного испытания. В спецификацию обычно вносят большую часть или все имеющиеся требования. Целью является квалификация оборудования для различных вариантов применения в ходе одного испытания. Итоговый общий RRS, как правило, охватывает широкий диапазон частот с относительно высокими уровнями ускорения. Необходимо принять к сведению, что охват в одном испытании широкого круга требований может привести к очень серьезным разночтениям в интерпретации результатов испытания.

В общем случае моделирование формы сейсмических волн в процессе контрольных или общих испытаний должно позволять:

a) получить испытательный спектр отклика (TRS), целиком перекрывающий требуемый спектр отклика (RRS), используя входной возбуждающий сигнал одной или нескольких частот, в соответствии с требованием, касающимся обеспечения консервативного (но не слишком) колебания испытательного вибрационного стенда;

b) иметь пиковое ускорение, равное или превышающее УНП RSS;

c) не иметь частотных составляющих выше асимптоты УНП RSS;

d) иметь продолжительность в соответствии с требованиями, указанными в 9.6.5.

Следует также уделять должное внимание выбору испытаний по одной или по нескольким осям, как указано в 9.6.6, и допусков, как указано в 7.2.

9.3 Испытания на условную вероятность отказа при сейсмическом воздействии

Испытания на условную вероятность отказа при сейсмическом воздействии проводят с целью определения предельных возможностей оборудования. Такая информация впоследствии может быть использована для подтверждения соответствия определенному требованию или пригодности к определенному применению.

Испытания следует проводить таким образом, чтобы полученные данные можно было соотнести и сравнить с любыми требованиями для различных установок, предъявленными любыми надзорными органами.

Для подтверждения соответствия некоторым требованиям наилучшим способом определения характеристик оборудования является демонстрация отклика оборудования на возбуждение синусоидального (или переходного) типа. Для сопоставления с другими требованиями характеристики могут быть определены путем демонстрации отклика оборудования на постоянное синусоидальное возбуждение. Наконец, некоторые характеристики оборудования можно определить путем демонстрации его отклика на многочастотные волнообразные колебания. Измерение уровня условной вероятности отказа оборудования при определенных видах импульсного возбуждения позволяет продемонстрировать предельную способность оборудования к выполнению требуемых функций безопасности в условиях данного возбуждения.

Доказано, что на уровень условной вероятности отказа оборудования или системы влияют изменения параметров сейсмической обстановки. Одним из таких параметров является направление возбуждения. Также к параметрам сейсмической обстановки относятся характеристики ударных, переходных или установившихся колебаний. Для получения данных об условной вероятности отказа при сейсмическом воздействии можно использовать методы испытаний, перечисленные в 9.6, где также приведены рекомендации по их применению (дополнительные сведения об испытаниях на условную вероятность отказа при сейсмическом воздействии приведены в приложении D).

9.4 Испытания компонентов

Компоненты следует испытывать путем моделирования эксплуатационных условий, заданных требованиями ожидаемой эксплуатации, или условий, соответствующих уровню предельных возможностей. Компоненты должны быть закреплены на вибрационном стенде таким способом, который по своим динамическим свойствам соответствует рекомендуемому способу монтажа. Если компонент предназначен для установки на панели, данную панель включают в состав испытуемой сборки или при испытании сборки (см. 9.5) регистрируют отклик в месте установки устройства. Во втором случае устройство может быть позже смонтировано непосредственно на вибрационном стенде для моделирования возбуждения в условиях эксплуатации.

9.5 Испытания оборудования в сборе

9.5.1 Общие положения

9.5.1.1 Краткое описание

Предпочтительно проводить испытания больших сложных узлов (оборудования) в сборе, чтобы была возможность моделировать и контролировать условия эксплуатации при полноценном функционировании. Однако для такого оборудования, как панели управления, распределительные устройства, системы управления электродвигателями и т. д., в состав которых входит множество субкомпонентов, не всегда целесообразно моделировать все условия одновременно. Квалификация на сейсмостойкость любого субкомпонента, важного для безопасности и не подвергающегося сейсмическому испытанию в составе сборки, должна быть подтверждена по отдельной программе. Испытания можно проводить в два этапа:

- первый этап — сейсмические испытания сборки: испытывают всю конструкцию в сборе, включая столько субкомпонентов, сколько можно установить, и обеспечивают контроль функциональности в соответствии с программой начальных сейсмических испытаний;
- второй этап — сейсмические испытания субкомпонентов: сейсмическим испытаниям подвергают те субкомпоненты, которые не вошли в программу испытаний первого этапа, на предмет выполнения назначенных им функций безопасности.

9.5.1.2 Первый этап — сейсмическое испытание сборки

Общий (основной) узел в сборе испытывают на предмет сохранения конструкционной целостности и местоположения. При наличии иных функциональных требований к конструкции в целом проводят также испытания для подтверждения их соблюдения. Для имитации локального воздействия отсутствующих субкомпонентов следует использовать грузы, если отсутствие данных субкомпонентов значительно меняет общий и местный динамический отклик оборудования. В местах, где предполагается установка отсутствующих субкомпонентов, размещают акселерометры с целью регистрации RRS конструкции на ПЗ/S1 и МРЗ/S2, чтобы использовать их в соответствии с программой второго этапа испытаний.

Реальные субкомпоненты или их модели устанавливают на сборке и/или внутри нее и проводят сейсмическое испытание, заключающееся в прохождении сборкой максимального числа циклов смещение/воздействие [имитирующие грузы, конструкции, конфигурация и крепежная арматура не должны изменять динамическое поведение сборки (например, вследствие изменения массы и жесткости) в связи с упрощенным подходом]. Такой способ проведения испытаний гарантирует, что регистрируемые собственные резонансные частоты сборки останутся неизменными после установки недостающих субкомпонентов. В ходе сейсмических испытаний на воздействие ПЗ/S1 и МРЗ/S2 необходимо получить спектры отклика конструкции в местах расположения компонентов путем прямых измерений ответных откликов во времени или с использованием функции перехода от данных с места расположения акселерометра, контролирующего сборку, к данным с мест установки отдельных субкомпонентов. Спектры отклика конструкции в местах размещения субкомпонентов (локальные TRS) должны охватывать раз-

ные возможности приложения возбуждающих нагрузок к оборудованию по каждой оси, чтобы на следующем этапе испытания устанавливать характеристики RRS субкомпонентов.

9.5.1.3 Второй этап — сейсмическое испытание субкомпонента

Различные субкомпоненты, не вошедшие в объем испытаний первого этапа, монтируют на вибрационном стенде с учетом правильной ориентации относительно силы тяжести. TRS, полученные в результате воздействия ПЗ/S1 и МРЗ/S2, должны охватывать RRS субкомпонентов на ПЗ/S1 и МРЗ/S2, как указано в описании первого этапа испытаний. В данных сейсмических испытаниях RRS на воздействие ПЗ/S1 и МРЗ/S2 являются производными от спектров отклика конструкции, полученных на первом этапе испытаний, рассчитанных на основании показаний акселерометров в местах установки этих субкомпонентов. Промежуточные конструкции, на которых крепят оборудование, могут повышать уровень возбуждения оборудования. В таких случаях повышение возбуждения необходимо учесть при установлении характеристик TRS.

В обоих случаях можно использовать методы испытаний, описанные в 9.6, или другие обоснованные методы. В ходе испытаний (при необходимости) и по окончании программы испытаний сборку и отдельные компоненты необходимо осмотреть на предмет сохранения конструктивной и функциональной целостности.

Примечание — Следует отметить, что при испытании сборок с реальной и/или имитированной установкой устройств TRS место размещения устройства может быть неадекватным в силу характера самого испытания сборки, поскольку нецелесообразно получать все RRS путем вибрации стенда в местах, близко расположенных друг к другу.

9.6 Методы испытаний

9.6.1 Общие положения

9.6.1.1 Категории испытаний

Настоящие методы испытаний обычно делят на три основные категории: контрольные испытания (см. 9.2), общие испытания (см. 9.2) и испытания на условную вероятность отказа (см. 9.3). Колебания, наилучшим образом имитирующие постулированное сейсмическое воздействие, делят на две категории: одночастотные и многочастотные. Выбор метода зависит от характера предполагаемого вибрационного воздействия, а также в определенной степени от особенностей оборудования. Различные технические требования, подходящие для каждого метода испытания, могут быть предпочтительными в конкретных случаях.

9.6.1.2 Искусственно расширенные спектры отклика

Для колебаний на уровне пола в RRS может преобладать один резонансный отклик конструкции. В таких случаях RRS обычно расширяют, чтобы он охватывал всю область неопределенности частот колебаний конструкций здания. В результате требуемый спектр отклика искусственно делается консервативным, поскольку пик отклика может возникать только на определенной частоте, а не во всем расширенном диапазоне. В этом случае допускается описанная ниже процедура испытаний.

Если центральная частота в расширенной области равна f_c, испытания могут быть проведены на этой частоте, а также на частотах $f_c \pm \Delta f_c$, $f_c \pm 2\Delta f_c$, ..., $f_c \pm n\Delta f_c$, где Δf_c соответствует допустимому интервалу (обычно от 1/6 до 1/3 октавы), позволяющему охватить всю расширенную область. TRS, сформированный в ходе каждого отдельного испытания, должен иметь такую же форму и ширину, как изначальный узкополосный спектр отклика (аналогично изображению на рисунке 3). В спецификации данный случай необходимо специально отметить, чтобы не путать расширенный спектр с RRS, полученным в условиях реального диапазона частот колебаний.

9.6.1.3 Анализ испытательного спектра отклика

TRS, полученный для интересующего диапазона частот, обрабатывают либо посредством обоснованных аналитических методов, либо с применением оборудования для анализа спектра отклика. Для формирования достаточного объема данных в интересующем диапазоне частот рекомендуется проводить расчет спектра с дискретностью ширины полосы частот 1/6 октавы или уже. Любое фильтрование частот сигнала ускорения в исследуемом диапазоне должно быть обнаружено и учтено.

9.6.1.4 Выбор демпфирования

У RRS обычно отмечают несколько уровней критического демпфирования. Если это возможно, в испытаниях рекомендуется использовать RRS с критическим демпфированием 5 %. Применение демпфирования при испытании описано в 5.8.2.

9.6.2 Испытание с применением одной частоты

9.6.2.1 Общие положения

Если сейсмические колебания грунта испытывают эффект фильтрования вследствие наличия у конструкции одной преобладающей частоты, то конечные колебания пола также могут иметь одну преобладающую частоту. В этом случае в качестве входного возбуждающего сигнала для оборудования может быть применена кратковременная установившаяся вибрация. Другими словами, для определения (или подтверждения) резонансных частот и степени демпфирования оборудования можно использовать испытание с одной частотой. Если есть достоверная информация о том, что у оборудования резонансы отсутствуют, что у него имеется только одна резонансная частота или есть резонансные частоты, разнесенные по ширине и не взаимодействующие друг с другом, а также если есть иные обоснованные указания, то для полного испытания оборудования может быть использовано испытание с одной частотой.

TRS при испытании с одной частотой получают для каждой отдельной частоты и при отсутствии иных обоснований он не может быть сформирован путем объединения каким-либо способом спектров нескольких неодновременно проведенных испытаний с одной частотой.

9.6.2.2 Создание входного возбуждающего сигнала при испытаниях

9.6.2.2.1 Общие положения

При любой форме волнового импульса колебания вибрационного стенда на частоте проведения испытания должны формировать TRS с ускорением, по крайней мере равным ускорению, заданному RRS. Пиковое значение ускорения входного сигнала должно быть как минимум равным ускорению нулевого периода RRS, за исключением входного сигнала низких частот, где RRS опускается и соответствующее ему ускорение нулевого периода также становится ниже. Руководство по выбору числа осей, в направлении которых должно быть изучено поведение оборудования при испытании, приведено в 9.6.6. Условия, указанные в 9.6.2, могут быть трудновыполнимыми при испытании нежесткого оборудования более чем с одной преобладающей частотой, а также если RRS имеет характеристики многочастотного широкополосного спектра отклика. В частности, может оказаться бесполезной попытка продемонстрировать отсутствие взаимодействия колебаний, которое сужает границы сейсмической устойчивости оборудования. В этом случае можно использовать испытания с применением одной частоты согласно 9.6.2.2.3, исходя из ожидаемого поведения или непрочности оборудования в условиях воздействия вибрации, применяемой при его сейсмической квалификации.

9.6.2.2.2 Оценка эксплуатационных характеристик оборудования только по конструктивной целостности

Если эксплуатационные свойства оборудования можно оценить только по конструктивной целостности, имея в виду напряжения и деформации конструкций, электростатических или пассивных устройств, то такую оценочную характеристику как максимальный отклик оборудования можно рассматривать, не учитывая точную природу вибрации или состав частот возбуждающего импульса. Колебания вибрационного стенда должны приводить к возникновению TRS при частоте испытания, в 1,5 раза превышающей частоту пика RRS, если не обосновано меньшее значение. По консервативной оценке, это позволяет получить комбинированный многомодовый отклик. Выбор упомянутого выше коэффициента зависит от формы RRS, и его наибольшее значение (1,5) применимо к широкополосному RRS. В связи с этим нет необходимости в том, чтобы TRS полностью охватывал RRS. В качестве альтернативы, если в ходе реальных испытаний могут быть точно установлены все резонансы оборудования, то достаточно, чтобы одночастотный TRS охватывал RRS только в области резонансов оборудования при одночастотном входном сигнале.

9.6.2.2.3 Оценка эксплуатационных характеристик оборудования по конструктивной целостности и работоспособности

Если характеристики оборудования, например электромеханических устройств (таких как реле или измерительные приборы), необходимо оценить как по конструктивной целостности, так и по работоспособности, то природа вибрации и состав частот возбуждающего импульса будут влиять на отклики оборудования, определяющие его вибростойкость. Следует привести обоснование того, что коэффициент 1,5 (см. 9.6.2.2.2) достаточен для получения комбинированного многомодового отклика и создания таких колебаний, которые адекватно моделируют эффекты воздействия предполагаемых многочастотных колебаний на характеристики оборудования. Выбор коэффициента зависит от типа оборудования и формы RRS, которая в случае наибольших значений частоты пика может потребовать коэффициента более 1,5, применимого к широкополосному RRS. Следовательно, при условии надлежащего обоснования TRS не обязательно должен полностью охватывать RRS. Кроме того, испытания необходимо про-

водить при всех резонансах оборудования, а регистрируемые частоты следует разносить не более чем на 1/2—1/3 октавы, вплоть до частоты 33 Гц, если не указано иное. Если резонансы оборудования наблюдаются при частотах, превышающих 33 Гц, то в этой области проводят испытания, сужая интервалы частот до 1/6 октавы или менее. В качестве альтернативы, если в ходе реальных испытаний могут быть точно установлены все резонансы оборудования, то достаточно, чтобы одночастотный TRS охватывал RRS только в области резонансов оборудования при одночастотном входном сигнале.

9.6.2.3 Испытания методом непрерывной синусоиды

Испытание при любой частоте заключается в воздействии на оборудование непрерывных синусоидальных колебаний с интересующей частотой и амплитудой. Продолжительность воздействия и условия потенциальной малоцикловой усталости при любой частоте должны по крайней мере соответствовать приведенным в 9.6.5. Интересующие испытательные частоты — это частоты, соответствующие резонансам испытуемого оборудования, а также другие частоты, указанные в 9.6.2.2. Максимальное ускорение, соответствующее ускорению, для которого должна быть проведена квалификация оборудования, должно как минимум вызывать максимальное ускорение отклика согласно 9.6.2.2.

9.6.2.4 Испытание методом синусоидальных импульсов

Испытание при любой частоте заключается в применении серии как минимум из пяти синусоидальных импульсов с паузой между каждым, достаточной, чтобы избежать существенного наложения колебательных откликов оборудования. Синусоидальные импульсы представляют собой синусоиды интересующей частоты и амплитуды, как показано на рисунке 1. Каждый синусоидальный импульс должен состоять из ряда циклов смещений (обычно 5 или 10) для получения TRS ускорений в соответствии с критериями, приведенными в 9.6.2.2. Интересующими испытательными частотами являются частоты, соответствующие резонансам испытуемого оборудования, а также другие частоты, указанные в 9.6.2.2. Общая продолжительность воздействия и условия потенциальной малоцикловой усталости при любой частоте должны по крайней мере соответствовать приведенным в 9.6.5.

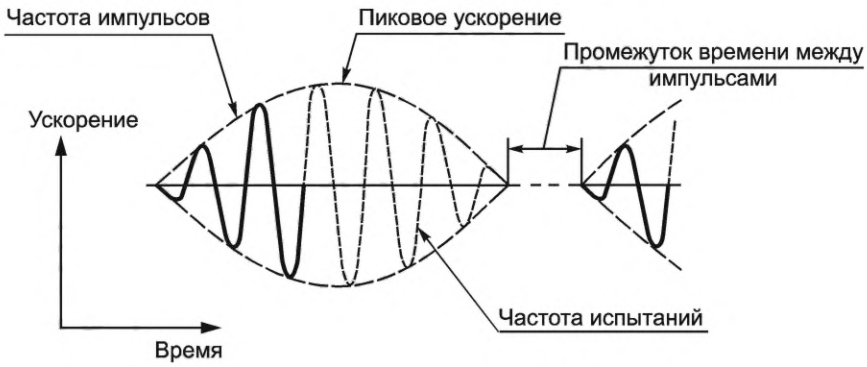


Рисунок 1 — Синусоидальные импульсы

Для заданной амплитуды пика пульсации степень консерватизма испытания будет увеличиваться по мере увеличения числа циклов в импульсе до тех пор, пока консерватизм не приблизится к консерватизму синусоидальной формы волнового импульса, как указано в 9.6.2.3.

Примечание 1 — В соответствии с настоящим стандартом амплитуды синусоид представляют собой ускорение, а модулированная частота — частоту приложенного сейсмического воздействия.

Примечание 2 — Импульсы обычно рассматривают как результат суммирования двух синусоид, частоты которых немного отличаются, причем частоты в пределах импульсов являются средними из двух частот, а частота пульсации — половиной их разности. Однако в данном контексте синусоидальные пульсации могут быть амплитудно-модулированными синусоидами с паузами между импульсами.

9.6.2.5 Испытание методом затухающей синусоиды

Испытание на любой частоте проводят с использованием как минимум пяти затухающих синусоидальных импульсов с заданными частотой и амплитудой, а также паузой между синусоидальными импульсами, достаточной для исключения значительного наложения колебательных откликов оборудования. Общая продолжительность воздействия и условия потенциальной малоцикловой усталости при любой частоте должны по крайней мере соответствовать приведенным в 9.6.5. Затухающие сину-

соидальные импульсы имеют одну частоту и убывающую по экспоненте амплитуду, как показано на рисунке 2. Интересующие при испытании частоты — это частоты, соответствующие резонансам испытуемого оборудования, а также другие частоты, указанные в 9.6.2.2. Пиковое ускорение синусоидального импульса соответствует значению, используемому при квалификации оборудования, и должно как минимум вызывать максимальное ускорение отклика согласно 9.6.2.2. Для заданной пиковой амплитуды степень консерватизма испытания будет увеличиваться по мере уменьшения скорости затухания до тех пор, пока не приблизится к степени консерватизма синусоидальной формы волнового импульса, как указано в 9.6.2.3.



Рисунок 2 — Затухающий синусоидальный импульс

9.6.2.6 Испытание методом качания частоты синусоидальной вибрации

При испытании данным методом к оборудованию применяют на входе воздействие синусоидального характера с непрерывно меняющейся частотой. Полоса частот должна охватывать диапазон, требуемый для квалификации оборудования, включая резонансы оборудования и другие частоты в соответствии с 9.6.2.2. С точки зрения получения максимального отклика такой подход по степени консерватизма приближен к испытаниям методом непрерывной синусоиды. Полученный процент установившегося резонансного отклика зависит от скорости качания частоты и степени затухания колебаний оборудования (демпфирования). Для скорости качания частоты две октавы в минуту или меньше и для типичного демпфирования оборудования установившийся резонансный отклик превышает 90 %. Максимальный отклик необходимо получить отдельно на каждой частоте в диапазоне испытания. Следовательно, данное испытание обеспечивает наиболее тщательный поиск всех резонансных частот и его обычно используют с такой целью в качестве поискового испытания с низким уровнем входного воздействия, например 0,2 g.

Для квалификации оборудования общая продолжительность испытания методом качания частоты синусоидальной вибрации и эквивалентные циклы максимальных амплитуд для любой частоты должны как минимум соответствовать указанным в 9.6.5. Максимальное ускорение соответствует ускорению, при котором предполагают проводить квалификационные испытания оборудования, и должно как минимум вызывать максимальное ускорение отклика согласно 9.6.2.2. TRS не может представлять собой комбинированный отклик на весь диапазон качания частоты. Каждый спектр отклика, полученный в данном испытании, отражает отклик только на одну частоту диапазона.

9.6.3 Многочастотные испытания

9.6.3.1 Общие положения

Признано, что энергия сейсмических колебаний грунта имеет многочастотный характер, преимущественно с частотой приблизительно до 33 Гц, за исключением регионов с твердыми породами в центральной и восточной части США и в некоторых других частях мира, где наблюдались сейсмические колебания частотой до 100 Гц. Если такие относительно широкополосные колебания грунта не фильтруются в значительной степени зданиями, почвой или тем и другим вместе, то результирующие колебания пола, которые оказывают влияние на оборудование, имеют тенденцию к сохранению исходных широкополосных характеристик. Более того, даже при наличии сильной фильтрации, но обусловленной двумя или более отдельными характеристиками здания, колебания пола будут содержать набор волн со своими доминирующими частотами для каждого здания или почвы, или для того и другого вместе.

В этих случаях для квалификации оборудования применимы многочастотные испытания. Возбуждение конкретного вибрационного стенда включает случайные или сложные во временной зависимости колебания, соответствующие распределению частот, необходимому для имитации требуемых колебаний пола. Цель состоит в том, чтобы создать колебания стенда, которые достаточно адекватно воспроизводят предполагаемые колебания установочной плиты оборудования в условиях конкретного землетрясения.

Многочастотное испытание предназначено для создания широкополосного испытательного колебания, которое особенно подходит для получения одновременного отклика от всех составляющих системы с несколькими степенями свободы, неисправность которой может быть вызвана взаимодействием собственных форм колебаний. Многочастотное испытание обеспечивает более точное моделирование типичных сейсмических колебаний без введения более высокой степени консерватизма.

Существует ряд доступных форм волнового импульса, которые можно использовать в качестве испытательных колебаний для имитации конкретного сейсмического возбуждения установочной плиты оборудования. Несколько типов многочастотных испытаний с использованием подобных различных форм волнового импульса приведены в 9.6.3.3—9.6.3.5. Некоторые типы испытаний лучше других подходят для моделирования условий воздействия определенного типа на оборудование, при этом степень консерватизма при проведении испытаний разного типа будет различна. Выбор типа испытания, при котором необходимо провести возбуждение оборудования, находящегося на определенном этаже здания, будет зависеть от степени фильтрации колебания грунта за счет динамических характеристик здания или почвы, или обоих факторов. Другие формы волнового импульса или типы многочастотных испытаний, не рассматриваемые в настоящем разделе, также можно использовать при условии, что они обладают аналогичными характеристиками, имеющими отношение к возбуждению испытуемого оборудования. Для обоснования корректности проводимых испытаний обычно используют критерии получения начальных испытательных колебаний, описанные в 9.6.3.2.

9.6.3.2 Получение начальных испытательных колебаний

Инициируют порцию сильных волнообразных колебаний, которая должна продемонстрировать соответствие требованиям, указанным в 5.6.2. При любой применяемой форме волны вибрационный стенд должен быть настроен таким образом, чтобы:

a) TRS перекрывал весь диапазон частот RRS, на который рассчитано конкретное испытание. При этом RRS должен включать допуск на испытание, как указано в IEC/IEEE 60780-323;

b) расчет TRS происходил с использованием соответствующих значений демпфирования, указанных в 5.8.2, 5.8.2.2 и 9.6.1.4, причем для расчета TRS критический уровень демпфирования должен быть равен или превышать уровень демпфирования для RRS;

c) максимальное пиковое ускорение вибрационного стенда как минимум соответствовало УНП RRS (предлагаемые методы измерения УНП приведены в приложении В);

d) общая продолжительность испытания и условия потенциальной малоцикловой усталости соответствовали указаниям по 9.6.5;

e) анализ временной зависимости показывал, что ширина частотного диапазона по меньшей мере соответствует расширенному диапазону RRS;

f) временная зависимость волнообразных колебаний была стационарна, т. е. статистические параметры (такие как вероятностное распределение частот и амплитуд) существенно не изменялись в ходе испытания.

Чтобы подтвердить выполнение требований, указанных в перечислениях a)—f), необходимо показать, что состав частот испытательного волнообразного колебания по ширине как минимум соответствует составу частот расширенного диапазона RRS [может быть за исключением низкочастотной области вследствие ограничений, действующих для вибрационных испытаний оборудования, чему посвящены следующие перечисления j) и m)]. Существует несколько способов такой демонстрации, например показать, что:

g) охват TRS диапазона RRS получен при аналогичных формах спектра, что приводит к аналогичным усилениям существенных пиков спектра в расширенных диапазонах спектров;

h) частотная составляющая преобразования Фурье испытательного волнообразного колебания совместима с расширенной частью RRS;

i) частотная составляющая спектральной плотности мощности (PSD) испытательного волнообразного колебания совместима с расширенной частью RRS.

Также предполагается, что на участке испытательного волнообразного колебания с сильными колебаниями присутствует стационарность. Это можно подтвердить, показав, что частотная/амплитудная

составляющая формы волны статистически постоянна во времени (подробные сведения о частотной составляющей и стационарности приведены в приложении С). Иногда RRS требует высоких уровней ускорения на самых низких частотах, что требует чрезвычайно высокой способности испытательного стенда к смещению. Общее требование по охвату RRS испытательным спектром отклика может быть изменено в соответствии со следующими критериями (за исключением основных собственных частот оборудования):

j) в тех случаях, когда путем поиска резонанса можно продемонстрировать, что при частоте ниже 5 Гц явление резонансного отклика отсутствует, можно внести изменение, требующее охвата RRS не ниже чем до 3,5 Гц. При этом необходимо продолжать возбуждение в диапазоне от 1 до 3,5 Гц, поддерживая полную функциональность испытательной установки;

k) если резонансные явления присутствуют при частотах ниже 5 Гц, необходимо охватить RRS лишь до уровня 70 % самой низкой частоты резонанса;

l) если отсутствие резонансного отклика или нарушение функционирования оборудования при частотах ниже 5 Гц не могут быть признаны допустимыми, применяют общее требование охвата низких частот RRS до 1 Гц;

m) в любом случае отсутствие охвата RRS на уровне частот 3,5 Гц или выше должно быть обосновано.

При выполнении программы испытаний TRS может в отдельных случаях не полностью охватить RRS. Допускается не проводить повторное испытание при соблюдении следующих критериев:

n) точка TRS может оказаться ниже диапазона RRS на 10 % или менее, при условии, что точки смежного диапазона шириной 1/6 октавы по меньшей мере соответствуют RRS, а точки смежного диапазона шириной 1/3 октавы как минимум на 10 % выше;

o) максимум пять точек анализируемого диапазона шириной 1/6 октавы могут быть ниже RRS, как в пункте n), при условии, что они разнесены по меньшей мере на одну октаву.

Фазирование начальной вибрации должно быть случайным, а амплитуду выбирают так, чтобы обеспечить выполнение RRS. Когда генерируют временные зависимости для их использования в испытаниях с возбуждением по двум или трем осям, а также для использования в анализе, важно, чтобы частоты соответствующей формы волны в каждом взаимно перпендикулярном направлении немного отличались, иначе возможна высокая когерентность временных зависимостей. Например, при использовании синусоидальных колебаний в частотном диапазоне шириной 1/12 октавы сдвиг частоты на 1/24 октавы между соответствующими синусоидами разных временных зависимостей значительно снизит когерентность.

9.6.3.3 Испытание на динамику изменений

Испытание на динамику изменений может быть проведено путем применения к оборудованию изменяющегося во времени возбуждения, синтезированного с целью имитации сейсмического воздействия. Необходимо убедиться, что фактическая вибрация стенда не менее (или более) интенсивна, чем требуемая вибрация. Это можно сделать непосредственным сравнением изменяющейся во времени вибрации стенда с заданной вибрацией при помощи осциллоскопа или записи осциллографа (осциллограммы). Сравнение также можно провести, используя спектры отклика заданной вибрации и вибрации стенда. В последнем случае спектр отклика заданной вибрации (RRS) получают с учетом критического демпфирования, значение которого устанавливают в соответствии с 5.7. После этого генерируют вибрацию стенда так, чтобы получить TRS, который охватывает RRS в соответствии с общими критериями, указанными в 9.6.3.2.

Следует признать, что эти два метода сравнения могут существенно отличаться по чувствительности и, следовательно, иметь разную степень пригодности для испытаний на различные физические воздействия. Например, когда важны очень низкие частоты, полезно прямое сравнение смещения временных зависимостей. В то же время, если важны частоты от средних до высоких, то более полезно сравнение ускорений или расчет спектров отклика.

9.6.3.4 Испытание на случайную вибрацию

Испытание может быть выполнено посредством применения к оборудованию возбуждения случайного характера, амплитуду которого регулируют вручную или автоматически в широком диапазоне частот. Для создания входного сигнала могут быть использованы различные аналоговые устройства и цифровые формы. Выбор точной ширины отдельных используемых диапазонов остается на усмотрение инженера по испытаниям. При использовании устройств аналогового синтеза обычно рассматривают диапазоны шириной 1/3 октавы или менее. Устройства цифрового синтеза могут потребовать более узких диапазонов или интервалов. Однако в определенных случаях, когда предполагается вибрация

без фильтров на уровне грунта, эффективным может оказаться использование более широких диапазонов. С другой стороны, может потребоваться применение очень узких диапазонов (1/6 октавы и менее), если предполагается фильтрация входного возбуждающего сигнала за счет резонансов здания. В любом случае процесс подразумевает использование совокупности узкополосных сигналов, подаваемых на вибрационный стенд, причем каждую полосу регулируют до тех пор, пока TRS не охватит RRS в соответствии с критериями, указанными в 9.6.3.2. Для системы синтеза аналоговых сигналов многополосным источником частот может служить как генератор случайных шумов в сочетании с многоканальным фильтром, так и множество сигналов, записанных на отдельные каналы аналогового магнитофона. Третьей системой синтеза сигналов, применяемой на практике, является компьютерная программа, способная вычислять обратную передаточную функцию системы виброгенератора и применять ее к желаемой зависимости колебаний вибрационного стенда от времени. При использовании источников сигналов всех типов постепенное нарастание, поддерживание и затухание сигналов обеспечивают реалистичное моделирование сейсмического события.

9.6.3.5 Испытание на сложную вибрацию

9.6.3.5.1 Общие положения

Во многих случаях требуемая вибрация представляет собой колебания грунта, существенно отфильтрованные одним или более острым резонансом здания или почвы, либо резонансом обоих. Соответствующий RRS может иметь усиления от среднего до низкого уровня в широком диапазоне частот с наибольшим усилением в узкополосных интервалах, связанных с каждым резонансом здания. В этих случаях испытание на случайную вибрацию (даже с хорошим разрешением узкополосных интервалов частот) может потребовать неприемлемо высокого максимального пикового значения входного сигнала, чтобы соответствовать более высокому усилению, связанному с резонансами здания. Допускается синтезировать сложный сигнал, содержащий совокупность нескольких отдельных узкополосных компонентов различных типов, перекрывающих на нижнем уровне широкую полосу случайной вибрации. Такой подход обеспечивает большую вероятность получить колебание стенда, TRS которого будет охватывать RRS в соответствии с критериями по 9.6.3.2, не прибегая к введению чрезмерно высоких уровней УНП. Описание нескольких стандартных методик синтеза сложных сигналов представлено в 9.6.3.5.2—9.6.3.5.6. При применении каждой из этих методик необходимо соответствие критериям, приведенным в 9.6.3.2. Успех применения любого из этих методов зависит от типа доступного оборудования, подлежащего испытанию, точной формы RRS и опыта исполнителя испытания. Представленные ниже методы применяют достаточно широко, чтобы уделить им особое внимание. Однако при необходимости получения требуемого движения стенда могут применяться комбинации указанных и других компонентов сигнала.

9.6.3.5.2 Случайная вибрация с задержками синусоиды

Обеспечение соответствия RRS, который включает умеренно высокое пиковое значение случайного возбуждения, может потребовать неоправданно высокого пикового значения входного сигнала. В этом случае сначала синтезируют широкополосную случайную вибрацию в соответствии с описанием по 9.6.3.4. Уровни отдельных частотных диапазонов регулируют до тех пор, пока весь RRS или нижний уровень широкополосной части RRS не будет охвачен TRS, применяя с этой целью пиковое ускорение входного сигнала, которое как минимум соответствует требуемому УНП, но существенно не превышает его. Затем используют задержку синусоиды при каждой частоте, соответствующей резкому пику RRS, до тех пор пока TRS не охватит RRS в соответствии с критериями, приведенными в 9.6.3.2. Продолжительность задержки синусоиды равна общей продолжительности испытания. Если задержка синусоиды необходима более чем на одной частоте, все они должны быть инициированы одновременно и продолжаться на протяжении всего испытания (в случае искусственно расширенных в соответствии с 9.6.1.2 спектров проводят серию испытаний с разными частотами задержки синусоиды с целью охвата расширенной области). Такая методика обычно позволяет получить максимально возможное значение усиления для конкретного узкого диапазона частот RRS.

9.6.3.5.3 Случайная вибрация с синусоидальными пульсациями

Данная вибрация аналогична вибрации, описанной в 9.6.3.5.2, но вместо задержек синусоид применяют синусоидальные пульсации. В данном виде испытания применяют те же критерии для синтеза колебаний, продолжительности испытания и инициирования одновременных синусоидальных пульсаций (в случае искусственно расширенных в соответствии с 9.6.1.2 спектров проводят серию испытаний с синусоидальными пульсациями на разных частотах с целью охвата расширенной области (см. рисунок 3). Множественные синусоидальные пульсации, распределенные на всем протяжении испытания, применяют для каждой требуемой частоты. Число циклов на пульсацию является дополнительным

параметром, который можно менять для достижения наилучших результатов охвата в соответствии с критериями по 9.6.3.2. Оптимальное число циклов на пульсацию может быть определено из рисунка 4, на котором показаны резонансные усиления синусоидальных пульсаций для разного числа циклов на пульсацию при разных значениях демпфирования.

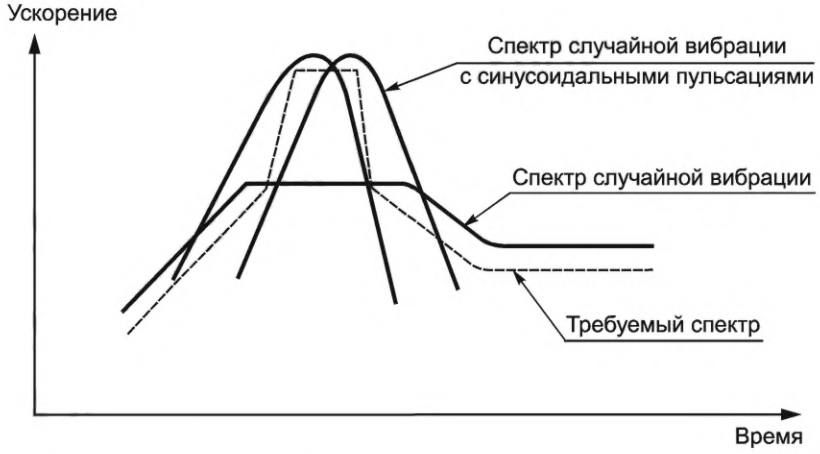


Рисунок 3 — Спектр случайной вибрации с наложенными синусоидальными пульсациями

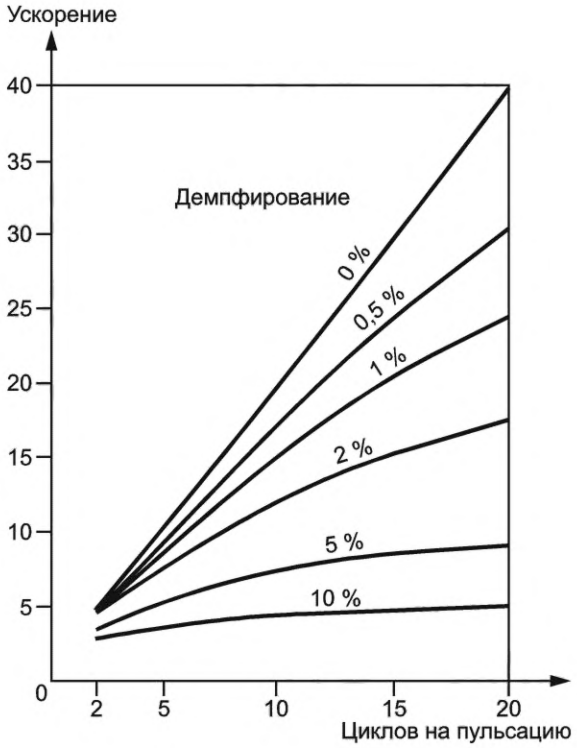


Рисунок 4 — Резонансное усиление в зависимости от числа циклов на пульсацию

9.6.3.5.4 Сочетание нескольких синусоидальных колебаний

Эта вибрация представляет собой совокупность нескольких синусоидальных волновых колебаний (синусоид) с разными частотами, включающими резонансные частоты оборудования, вплоть до предельной частоты. Обычно частоты синусоид разнесены с интервалом в 1/3 октавы или меньше для обеспечения охвата в соответствии с критериями, изложенными в 9.6.3.2. Все синусоиды должны инициироваться одновременно и сохраняться в течение всего испытания. Каждая частота должна иметь отдельный регулятор амплитуды и фазы. При сочетании множества синусоид с различными частотами

результат приближается к широкополосной случайной вибрации. Этот метод удобно использовать для цифрового синтеза требуемых колебаний стенда.

9.6.3.5.5 Сочетание нескольких синусоидальных пульсаций

Эта вибрация аналогична вибрации, описанной в 9.6.3.5.4, но вместо синусоид применяют серию синусоидальных пульсаций на каждой отдельной частоте. В этом типе испытаний применимы те же критерии, что указаны в 9.6.3.5.4 в отношении испытательных частот, октавного интервала, одновременной инициации синусоидальных пульсаций, а также непрерывной повторяемости и продолжительности испытания. Как и в 9.6.3.5.3, число циклов на пульсацию можно регулировать для получения максимального соответствия критериям охвата, приведенным в 9.6.3.2. Как и в методе, использующем сочетание нескольких синусоид, при объединении множества синусоидальных пульсаций с разными частотами получаемый результат приближается к широкополосному случайному колебанию.

9.6.3.5.6 Сочетание нескольких затухающих синусоид

В некоторых случаях для генерации среднеполосного TRS с достаточно низким УНП может применяться сложная волна, состоящая из множества затухающих синусоид. Как правило, интервал между частотами составных сигналов составляет 1/3 октавы или менее для достижения соответствия критериям охвата, изложенным в 9.6.3.2. Затухающие синусоиды должны иметь отдельные регуляторы скорости затухания в диапазоне демпфирования от 0,5 до 10 %. Каждая частота должна иметь отдельный регулятор амплитуды и фазы. Все частоты необходимо инициировать одновременно, а затем постоянно перезапускать в течение всего испытания. Желательно варьировать скорость затухания и амплитуду каждой частоты, чтобы оптимизировать соответствие TRS и RRS. Получающаяся в результате вибрация должна быть способной представлять сильный толчок от MP3/S2.

9.6.4 Прочие испытания

Испытания, описанные в 9.6.2 и 9.6.3, могут быть заменены другими испытаниями, если они в той же степени обоснованы и так же адекватно моделируют ожидаемые сейсмические условия.

Для подтверждения приемлемости метода, используемого при сейсмической квалификации оборудования, необходимо учитывать следующие факторы:

a) ширину RRS в сравнении с шириной TRS, а также характеристики и отклики оборудования;

b) продолжительность испытания в сравнении с определенным сейсмическим событием;

c) пиковое ускорение входного сигнала при испытании и наблюдаемое усиление (т. е. отображаемое распределение частот на входе);

d) собственные формы и частоты вибрации оборудования;

e) свойственное испытуемому оборудованию демпфирование;

f) уровни условной вероятности отказа при сейсмическом воздействии;

g) потенциал малоцикловой усталости.

В любом случае TRS должен охватывать RRS в соответствии с критериями, приведенными в 9.6.3.2.

9.6.5 Продолжительность испытаний и потенциал малоцикловой усталости

Для надлежащего учета вибрации здания и эффектов малоцикловой усталости необходимо установить продолжительность сигнала в форме волны на входе и его свойства, вызывающие усталость.

Продолжительность сильных колебаний в каждом испытании должна быть по крайней мере эквивалентна продолжительности сильных колебаний исходной временной зависимости, используемой для вычисления RRS, и указана в спецификации испытания. Если эта продолжительность не указана, то продолжительность сильных колебаний при сейсмических испытаниях должна составлять не менее 15 с. Для многочастотных испытаний стационарная часть испытания определяет долю сильных колебаний в одной используемой форме многочастотной волны. Для одночастотных испытаний продолжительность сильных колебаний представляет собой сумму продолжительностей сильных колебаний для всех отдельных частот на протяжении всего испытания (за исключением пауз между импульсами). Необходимо отметить, что длительность отдельных испытаний при любой одиночной частоте должна быть достаточной для формирования ускорения TRS в соответствии с критериями, приведенными в 9.6.2.2.

Потенциальный эффект усталости, вызываемый испытательным сигналом в форме волны, должен быть по меньшей мере эквивалентен такому эффекту от сильных колебаний отклика на землетрясение в опорной плите оборудования. Данная эквивалентность для многочастотных испытаний может быть подтверждена путем демонстрации того, что испытательный волновой сигнал независим от времени так же, как колебательный отклик на сейсмическое возбуждение, или что испытательный волновой сигнал генерирует число циклов пиковых напряжений, аналогичное этому числу при возбуждении

данной резонансной частоты конструкции. Для имитации усталости на нижнем уровне может быть использован ряд циклов пиковых напряжений, превышающих необходимую пороговую величину, при условии соблюдения прочих критериев испытания.

Дальнейшее обсуждение длительности испытаний и эквивалентного числа циклов пиковых напряжений приведено в приложении Е. Для проверки возможности эффекта малоцикловой усталости могут быть использованы иные обоснованные методы, помимо указанных в приложении Е.

9.6.6 Испытания с воздействием по разным осям

9.6.6.1 Общие положения

Сейсмические колебания грунта происходят одновременно по всем направлениям в произвольном порядке. Тем не менее для испытаний оборудования на сейсмостойкость допускается проводить испытания по одной, двум и трем осям. Испытания по одной или двум осям в моделируемой 3D-среде следует проводить в консервативной форме с учетом отсутствия входных колебаний по иному(ым) ортогональному(ым) направлению(ям). Одним из факторов, который должен быть учтен, является 3D-характеристика входных колебаний. К другим факторам относятся динамические характеристики оборудования, его гибкость или жесткость, а также степень перекрестного взаимодействия отклика в пространстве. Испытания по одной или двум осям применяют для обеспечения адекватных уровней воздействия на оборудование при наличии существенного перекрестного взаимодействия, а также для минимизации возможности избыточного воздействия до уровня, когда перекрестное взаимодействие не имеет значения. Для выявления потенциальных отказов разного вида применяют испытания по одной и двум осям в соответствии с 9.6.6.2 и 9.6.6.3. Предполагается, что с точки зрения общей продолжительности и возникающей усталости данные испытания консервативны. Оборудование, крепящееся к конструкциям здания, рекомендуется подвергать испытаниям по двум или трем осям.

Испытание с воздействием по многим осям требует особого внимания к проекту и установке испытательного вибростенда, а также к контролю, чтобы при проведении испытаний на сейсмостойкость крен и качание стенда были незначительными. Если данные явления проигнорировать, то они могут повлиять на результаты испытаний вследствие взаимного влияния оборудования и вибрационного стенда (смещения в частотном отклике оборудования, изменения демпфирования, несоответствия критериям охвата).

9.6.6.2 Испытания с возбуждением по одной оси

Испытания с возбуждением по одной оси должны по меньшей мере отражать воздействие сейсмического события на места монтажа оборудования, но имея при этом в виду отсутствие движения в иных ортогональных направлениях. Испытания с возбуждением по одной оси обоснованы в тех случаях, когда может быть удостоверено, что входной сигнал фактически действует в одном направлении или что испытуемое оборудование может иметь независимый отклик по каждой из трех осей. Первый случай характерен в ситуациях, когда устройство монтируют на панели, которая усиливает движение в одном направлении, когда ограничивают перемещение только одним направлением или когда отклик на воздействие в одном направлении не вызывает в том же месте напряжений, формирующих отклик в любом другом ортогональном направлении. Последний случай характерен для ситуаций, когда оборудование имеет очень низкую перекрестную взаимосвязь по всем осям, а также в некоторых других случаях, которые могут быть обоснованы.

Испытания с возбуждением по одной оси допускается выполнять путем воздействия сигнала, адекватного заданному ПЗ/S1, за которым следует МРЗ/S2, по каждой из осей последовательно или любыми другими обоснованными методами в тех случаях, когда может быть подтверждено достаточное старение под воздействием ПЗ/S1.

9.6.6.3 Испытания с возбуждением по двум осям

Испытания с возбуждением по двум осям должны по возможности имитировать сейсмическое событие в месте установки оборудования. Они должны учитывать отсутствие движения по одной из ортогональных осей при независимых входных сигналах по двум другим осям или отсутствие движения по двум ортогональным осям при использовании зависимых входных сигналов. Факторы, которые необходимо учитывать, включают направленный характер входного возмущения, а также наличие перекрестных взаимодействий внутри оборудования. Испытания с воздействием по двум осям выполняют путем одновременного приложения входных возбуждений по горизонтальной и вертикальной осям. При наличии перекрестных взаимодействий следует применять коэффициент усиления (коэффициент безопасности), равный квадратному корню суммы квадратов (SRSS) спектров отклика по двум основным горизонтальным направлениям либо $\sqrt{2}$, если спектры отклика по обоим горизонтальным направлениям одинаковы. В качестве горизонтальной оси может быть выбрана как основная ось, так и другая, со-

ответствующая направлению воздействия, в котором испытуемое оборудование может быть наиболее подвержено различным видам отказа.

Предпочтение должно быть отдано независимым произвольным входным воздействиям. Также при использовании данного метода испытание следует проводить в два этапа с поворотом оборудования на втором этапе на 90° вокруг вертикальной оси. Для обеспечения статистически независимых моделируемых движений колебания вибрационного стенда как функции времени должны иметь значения когерентности менее 0,5, что вычислено с использованием по меньшей мере 12 выборок данных. В качестве варианта может быть использован коэффициент корреляции с абсолютным значением менее 0,3 для всех задержек по времени (более подробные объяснения приведены в приложении F). Допускается выполнять испытание путем воздействия сигнала, адекватного заданному ПЗ/S1, за которым следует МРЗ/S2 на первом этапе, повторяя ту же последовательность на втором этапе, или любыми другими обоснованными методами в тех случаях, когда может быть подтверждено достаточное старение под воздействием ПЗ/S1.

В тех случаях, когда не используют независимые произвольные входные воздействия, необходимо выполнить четыре испытания в следующей последовательности:

a) с двумя синхронными входными воздействиями;

b) с одним входным воздействием, смещенным по фазе на 180° относительно другого;

c) на оборудовании, повернутом на 90° вокруг вертикальной оси, с двумя синхронными входными воздействиями;

d) на оборудовании в том же положении, что в перечислении c), но с одним входным воздействием, смещенным по фазе на 180° относительно другого.

Допускается прилагать воздействие, адекватное заданному ПЗ/S1, за которым следует воздействие, равное МРЗ/S2, в качестве испытания по перечислению a), после чего с той же последовательностью воздействий выполнить испытания по перечислениям b), c) и d) или применять любые другие обоснованные методы в тех случаях, когда может быть подтверждено достаточное старение под воздействием ПЗ/S1.

9.6.6.4 Испытания с возбуждением по трем осям

Данные испытания необходимо проводить с использование имитатора, способного воспроизводить независимые колебания во всех трех ортогональных направлениях. Для обеспечения статистически независимых имитируемых движений колебания вибрационного стенда как функции времени должны иметь значения когерентности менее 0,5, что вычислено с использованием по меньшей мере 12 выборок данных. В качестве варианта может быть использован коэффициент корреляции с абсолютным значением менее 0,3 для всех задержек по времени (более подробные объяснения приведены в приложении F).

9.6.7 Испытания оборудования, установленного на одной линии

После фильтрации сейсмических колебаний грунта вследствие одной преобладающей конструктивной особенности ответные колебания оборудования, смонтированного на одном полу (плите) или на одной линии, могут иметь одну преобладающую частоту. В этом случае в качестве консервативного входного возбуждения оборудования может быть использована кратковременная установившаяся вибрация. Для дальнейшего определения (или подтверждения) резонансных частот и степени демпфирования оборудования может быть проведено испытание с применением одной частоты. Если можно показать, что у оборудования резонансы отсутствуют, есть только один резонанс или есть широко разнесенные резонансы, которые не взаимодействуют, а также в иных обоснованных случаях испытание с одной частотой может быть использовано в качестве полного испытания оборудования.

Особое внимание следует уделить квалификации на сейсмостойкость компонентов оборудования, устанавливаемых на одной линии, таких как компоненты СКУ, устройства, исполнительные механизмы систем ОВКВ, а также исполнительные механизмы клапанов и прикрепленные к ним функциональные приспособления, работоспособность которых должна быть подтверждена. При определении программы испытаний для сейсмической квалификации такого оборудования необходимо помнить о том, что наиболее критические состояния находящихся под сейсмической нагрузкой компонентов, установленных на одной линии, будут возникать в результате отклика линии (например, системы трубопроводов или воздуховодов), в которой размещен компонент. Сейсмическая нагрузка на оборудование (компоненты), имеющее электрические и трубопроводные соединения, именно вследствие подключения к кабель-каналу и трубопроводу должна быть приложена вплоть до первой крепежной опоры. Такое наиболее критическое состояние формирует входное воздействие на компонент преимущественно одной частоты, а именно собственной частоты линии в непосредственной близости от компонента.

К оборудованию АС, установленному на одной линии, применяют следующий метод испытаний, учитывающий требования к сейсмической квалификации в условиях MP3/S2.

Оборудование, установленное на одной линии, подвергают серии одночастотных испытаний на резонансных частотах оборудования с приращениями частоты на 1/3 октавы в диапазоне от 2 до 32 Гц или выше, если необходимо учитывать и гидродинамические нагрузки. При испытаниях на воздействие частот более 32 Гц, необходимых для регионов с грунтом из твердых пород, расстояние между частотами свыше 32 Гц следует сузить до 1/6 октавы или меньше вплоть до предельной частоты. На каждой испытательной частоте амплитуда входного воздействия должна соответствовать уровням, установленным проектировщиками системы. Данная амплитуда может не зависеть от направления воздействия. Следовательно, возбуждающее воздействие необходимо прикладывать с одинаковыми частотой и ускорением по каждому из трех ортогональных направлений отдельно. Должно быть подтверждено, что испытательная амплитуда обусловлена только рассматриваемой частотой. Стандартные методы, которые могут быть применены, включают использование полосы пропускания или следящих полосовых фильтров. Продолжительность испытания на каждой частоте должна составлять отрезок времени, необходимый для установления полной работоспособности оборудования, и быть определена с учетом требований конкретной площадки. Продолжительность испытания указывают в программе испытаний. Если продолжительность сильных колебаний не указана, то при сейсмических испытаниях она должна составлять не менее 15 с.

Процедуру испытаний необходимо дополнить оценкой влияния на оборудование всевозможных реакций трубопроводов на нагрузки, испытываемые патрубками. Процедура оценки нагрузок на патрубки не входит в область применения настоящего стандарта и далее не рассматривается.

Более подробные пояснения и руководящие указания могут быть получены из IEEE Std 382™.

9.6.8 Дополнительные испытания

После испытания на сейсмостойкость могут быть выполнены исследовательские испытания на сохранение работоспособности оборудования при конкретных дополнительных нагрузках. Данные испытания можно использовать для определения предельных потенциальных возможностей оборудования. Уровень условной вероятности отказа при сейсмическом воздействии — это максимальный уровень входного возбуждения, выраженный в виде функции входной частоты, ускорения и продолжительности испытания, при котором оборудование остается способным удовлетворять предъявляемым эксплуатационным требованиям. В связи с тем, что такие испытания носят разрушительный характер и их рассматривают как дополнительное доказательство механической прочности оборудования, их, как правило, проводят по инициативе поставщика после испытаний на сейсмостойкость. Испытания проводят при повышенных уровнях спектра отклика на MP3/S2 или при частотах, близких к частотам собственных колебаний оборудования, которые были подтверждены в ходе испытаний па воздействие MP3/S2. Данный подход позволяет пользователю получить уверенность в функциональной надежности оборудования. Более того, в некоторых случаях он может позволить лучше охарактеризовать состояния отказа оборудования и, как следствие, улучшить его проект.

9.7 Документация к испытанию

Требования к документации, сопровождающей испытания, приведены в разделе 13.

10 Квалификация по сходству

10.1 Общие положения

В тех случаях, когда квалификацию элемента оборудования нужно провести путем экстраполяции результатов предыдущей квалификации с допуском на само испытание, анализ или на то и другое вместе, такая экстраполяция должна быть основана на сходстве и учитывать характер воздействия, физическую систему и функцию безопасности. При определении сходства необходимо продемонстрировать свидетельство того, что анализируемое оборудование будет выполнять назначенную ему функцию безопасности и будет признано эквивалентным референтному оборудованию.

10.2 Характер воздействия

Сходство воздействия при испытании заключается в подобии следующих параметров: спектральные характеристики, продолжительность, направления осей возбуждения и расположение мест измеряемого отклика для колебаний, связанных с узлами крепления оборудования. Данные параметры

должны быть одинаковыми или почти одинаковыми при сравнении воздействий, сходство которых необходимо установить.

10.3 Физические системы

Сходство оборудования устанавливают для сборки оборудования, для устройства или для того и другого вместе, для узла (включая крепления) в зависимости от конфигурации нового оборудования, которое подлежит квалификации. Для полной сборки сходство может быть подтверждено путем сравнения типа, модели и серийных номеров, принимая при этом во внимание динамические свойства и конструкцию.

Так как конечная цель квалификации по сходству включает получение сведений об ожидаемом динамическом отклике, для установления сходства динамических свойств конструкционной системы может быть использован рациональный подход путем исследования физических параметров систем оборудования. Это может быть выполнено путем сравнения преобладающих резонансных частот и форм колебаний. Эти динамические характеристики зависят от следующих параметров:

a) физических габаритов оборудования;

b) массы оборудования, ее распределения и центра тяжести;

c) характеристик передачи нагрузки в конструкционной системе оборудования и ее жесткости с точки зрения устойчивости к сейсмическому воздействию;

d) прочности крепления основания оборудования и его жесткости с точки зрения обеспечения конструкционной целостности и адекватных пограничных состояний;

e) интерфейсов оборудования с соседними объектами или соединительными приспособлениями, такими как кабели и кабель-каналы.

Относительное расхождение всех физических параметров, указанных в приведенном выше перечне, должно быть разумным образом ограничено, чтобы можно было с уверенностью говорить о существовании достаточной степени сходства между сборками оборудования. Должно быть получено подтверждение того, что отличия данного оборудования от оборудования, прошедшего квалификацию ранее, не приведут к изменениям характеристик динамического отклика проходящего квалификацию объекта по сравнению с объектом, сходство с которым устанавливают, и не станут причиной появления новых механизмов возникновения неисправности. К оборудованию, проходящему квалификацию, должны быть применены ограничения и пределы, вытекающие из сравнения с ранее квалифицированным оборудованием, свидетельствующие о сходстве, если не указано иное.

Если квалификация оборудования на сейсмостойкость может быть проведена путем демонстрации того, что отдельные устройства должным образом выполняют назначенные им функции безопасности во время землетрясения, то для квалификации такого оборудования может быть рассмотрена возможность применения метода оценки сходства устройства или сборочного узла. Для отдельных устройств решают вопрос о сходстве физических систем. В этом случае обоснование сходства заключается в тщательном изучении динамических характеристик, креплений к опоре, а также принципов работы механической или электрической систем, или той и другой вместе. Подтверждение сходства поведения исследуемого оборудования и оборудования, прошедшего квалификацию ранее, должно быть основано на сходстве физических параметров. Сходство сложных устройств, обладающих существенными различиями, не может быть подтверждено путем анализа. В таких случаях предпочтение следует отдать проведению испытаний.

10.4 Функция безопасности

Рассмотрение сходства должно обеспечивать достаточную уверенность в том, что оборудование способно сохранять функциональность и будет выполнять назначенную функцию безопасности во время и/или после сейсмического события, эквивалентного MP3/S2. Должны быть проверены все эксплуатационные состояния оборудования, касающиеся функций безопасности, включая изменения состояния во время события, если есть такая необходимость. Функция безопасности зависит не только от самого оборудования, выполняющего данную функцию, но также и от назначения системы АС, в которой это оборудование работает. Дополнительные требования к функции безопасности приведены в 7.1.

11 Анализ

11.1 Общие положения

Аналитический метод не рекомендуется использовать для квалификации сложного оборудования, которое не может быть смоделировано с целью корректного прогнозирования его функционального/эксплуатационного отклика. Метод анализа без испытаний допустим только в том случае, если для подтверждения назначенной проектом функции оборудования достаточна лишь его конструкционная целостность.

Анализ должен показывать, что условия крепления оборудования к опорной плите и монтирования приемлемы с учетом допуска и гарантируют, что при создании конструкционной модели приняты во внимание физические воздействия и возможное смещение, а анкерное крепление остается неизменным. Оборудование должно быть смоделировано таким образом и с такой ориентацией, чтобы условия анкерного крепления и монтирования оборудования имитировали рекомендуемые рабочие условия установки. Условия анкерного крепления зависят от механических соединений между строительной конструкцией и оборудованием.

Анализ не должен применяться в тех случаях, когда в конструкционной модели не может быть отражен значительный износ. Применение аналитических методов возможно при наличии доказательств того, что износ, не отраженный при моделировании, незначителен.

При проведении анализа создают математическую модель оборудования с целью прогнозирования его реакции на динамические нагрузки, ожидаемые во время эксплуатации и сейсмического события. В разделе 11 представлены методы, которые могут быть использованы для квалификации оборудования на сейсмостойкость путем проведения анализа отклика на несколько ПЗ/S1 и следующее за ними МРЗ/S2. Описываемые методы включают наиболее часто используемые методы статического и динамического анализа. Иные методы также могут быть использованы при условии их обоснования. На блок-схеме, представленной на рисунке G.3, показан процесс, которому надлежит следовать для подтверждения квалификации на сейсмостойкость методом анализа. Общий порядок действий следующий:

a) осмотреть оборудование для оценки динамических характеристик;

b) определить отклик, используя один или более из нескольких методов, описанных в 11.2—11.6;

c) на основании полученного отклика определить нагрузки и смещения;

d) сравнить рассчитанные отклики с допустимыми значениями для подтверждения соответствия проектным требованиям.

На этапе осмотра следует получить представление о сложности оборудования и адекватности аналитических методов для корректного прогнозирования выполнения оборудованием функций безопасности под воздействием сейсмического события. При осмотре необходимо определить, какой метод может наиболее точно представить эксплуатационные характеристики оборудования в сейсмически активных условиях. Этап анализа, заключающийся в определении отклика, может состоять из нескольких шагов, первый из которых определяют как выбор между методом статического коэффициента (см. 11.2.3) и методом динамического анализа (см. 11.2.4). В общем, выбор основывается на предполагаемом запасе прочности оборудования, поскольку метод статического коэффициента хотя и является более простым и экономичным, в целом предусматривает больший запас.

Метод динамического анализа или испытаний может показать, является оборудование жестким или гибким. Для жесткого оборудования применяют метод статического анализа и сейсмическое ускорение, соответствующее местоположению опорной плиты (см. 11.2.2). Гибкое оборудование может быть проанализировано методом статического коэффициента (см. 11.2.3) или с использованием динамического отклика, вычисленного на основании спектра отклика и его зависимости от времени, а также другими методами (см. 11.2.4).

Математические модели, используемые для анализа, могут быть основаны на рассчитанных значениях параметров конструкции, на значениях, полученных при помощи испытаний, или на сочетании тех и других. В тех случаях, когда сложные математические модели основаны только на рассчитанных параметрах конструкции, рекомендуется проведение верификационных испытаний для валидации модели (см. раздел 12). Значение демпфирования, используемое в такой модели, должно соответствовать фактическому рассеянию энергии в оборудовании, чтобы можно было точно спрогнозировать отклик. Демпфирование, используемое при анализе, должно иметь ссылку, например, на отчет об анализе безопасности, спецификацию или испытания.

Квалификация с использованием математической модели должна пройти надлежащую валидацию. Следует вычислить и учесть факторы конструкционного старения (факторы напряжения). Необходимо продемонстрировать, что на механические характеристики не влияют действующие в совокупности и не поддающиеся моделированию факторы старения (например, тепловые и электрические нагрузки, давление, химическая коррозия и т. д.), осуществив это путем оценки отдельных видов старения, и что структурным анализом учтены все динамические нагрузки, которым может быть подвержено оборудование во время эксплуатации. Валидация модели может потребовать проведения испытаний на старение или экспертизы бывшего в эксплуатации оборудования для доказательства отсутствия старения.

Как правило, большинство режимов работы систем допускает демпфирование за счет вязкого трения, однако некоторые шкафы или корпуса оборудования могут показывать демпфирование другого характера. Решение такой проблемы является аналитически сложным и должно проводиться с использованием соответствующих методов. Во многих случаях в таких ситуациях более предпочтительной является квалификация путем проведения испытаний, так как необходима валидация многих допущений, сделанных при моделировании, которую осуществляют путем проведения специфических испытаний. Если значение демпфирования не определено, то оно может быть установлено любыми способами при условии обоснования в отчете о квалификации. Использование значения демпфирования при анализе описано в 5.8.3.

Оценка воздействия расчетных нагрузок и деформаций на механическую прочность, а также, при возможности, на функциональность, может быть выполнена с использованием вычисленного динамического отклика. Чтобы проверить наличие помех, необходимо рассчитать максимальные смещения для компонента по состоянию на момент монтажа. Для проверки достаточности прочности оборудования к рабочим нагрузкам оборудования следует добавить сейсмическую нагрузку.

11.2 Методы сейсмического анализа

11.2.1 Общие положения

Оборудование и любые вспомогательные опорные конструкции необходимо моделировать таким образом, чтобы их распределение массы и характеристики жесткости были представлены корректно. Такую модель можно использовать для проведения анализа методом нормальных (характеристических) волн с целью установления жесткости или гибкости оборудования. К жесткому оборудованию (что определяют посредством испытания или анализа) применяют статический анализ. В отношении гибкого оборудования проводят анализ методом статического коэффициента или динамический анализ.

11.2.2 Статический анализ

Оборудование считают жестким, если его наименьшая резонансная частота превышает предельную частоту RRS и ее можно подвергнуть статическому анализу. Сейсмические нагрузки на каждый компонент оборудования вычисляют умножением распределенной массы на соответствующее максимальное ускорение пола (УНП).

11.2.3 Анализ методом статического коэффициента

Данный альтернативный метод анализа гибкого оборудования позволяет использовать более простую методику за счет увеличения консерватизма. Определения собственных частот не требуется. Ускорение отклика оборудования принимают равным максимальному ускорению в усиленной области RRS (пиковому ускорению спектра) при взятом с запасом (консервативном) приемлемом значении демпфирования. Статический коэффициент 1,5 установлен на основе опыта с целью учета эффектов многочастотного возбуждения и многомодового отклика для линейных структур, имеющих физическое сходство с балками и колоннами, которые могут быть представлены простой моделью. При должном обосновании допускается использовать более низкий статический коэффициент. При анализе методом статического коэффициента сейсмические нагрузки на каждый компонент оборудования вычисляют умножением значений массы на максимальное спектральное ускорение RRS и на статический коэффициент. Полученную нагрузку распределяют на компонент пропорционально распределению его массы. Затем методом квадратного корня из суммы квадратов (ККСК) можно определить напряжение в любой точке оборудования путем объединения напряжений в этой точке, возникающих вследствие вызванных землетрясением нагрузок в каждом направлении.

Если известна собственная частота оборудования, и она находится выше частоты пикового спектрального ускорения, то можно вместо пикового спектрального ускорения использовать спектральное ускорение на данной частоте. Если же известная собственная частота оборудования расположена ниже

частоты пикового спектрального ускорения, то следует использовать пиковое спектральное ускорение, за исключением случаев, когда очевидно отсутствие значимого отклика в высших модах. В любом случае в отношении спектрального ускорения при многочастотном возбуждении и многомодовом отклике необходимо применять статический коэффициент 1,5 (см. 9.6.2.2.2).

11.2.4 Динамический анализ

11.2.4.1 Общие положения

В отношении гибкого оборудования модель можно подвергнуть анализу спектра отклика или анализу временных зависимостей (динамики изменений). Следует обратить внимание, что если динамическая модель показывает, что оборудование является жестким, то вместо анализа спектра отклика или анализа динамики изменений можно применить статический анализ (11.2.2).

11.2.4.2 Анализ спектра отклика

Анализ спектра отклика (RSA) позволяет определять интересующий отклик, будь то отклонение, напряжение или ускорение, путем комбинирования откликов каждого вида (модальных откликов) с учетом всех значимых мод. Для обеспечения адекватного представления о динамической реакции оборудования и связанной с ней реакцией опор следует включить значимые моды (модальные массы). Приемлемым критерием значимости является тот факт, что включение дополнительных мод не приводит к увеличению отклика более чем на 10 %. Отклик определяют путем комбинирования индивидуальных модальных откликов и включения отклика остаточной жесткости. Также отклик можно определить путем объединения откликов каждого вида методом ККСК или другим подходящим методом. При близко расположенных частотах метод ККСК неприменим. Близко расположенными являются частоты, отличающиеся на 10 % или менее от следующей более низкой частоты. Дополнительные инструкции по решению проблем недостающей массы и комбинирования модальных откликов можно найти в Руководстве 1.92 [2] Комиссии по ядерному регулированию США (U.S NRC) и в документе ASCE 4 [1] соответственно.

При анализе с использованием отдельных 3D-составляющих землетрясения отклики (ускорение, смещение, нагрузка, момент) на возбуждения по двум горизонталям и одной вертикали необходимо объединять на последнем этапе, используя метод ККСК. При обосновании могут быть использованы другие методы, такие как метод «100-40-40».

11.2.4.3 Анализ временной зависимости

При анализе временной зависимости интересующий отклик обрабатывают на компьютере, используя программу интегрирования по времени уравнения колебаний. В отношении линейных конструкций можно использовать модальный анализ. В отношении нелинейных конструкций используют метод прямого интегрирования.

Если при анализе временной зависимости вводят одновременно трехмерные статистически независимые (со своей динамикой изменений) сейсмические колебания, то при каждом приращении времени отклики можно комбинировать алгебраическим способом. Достаточную статистическую независимость можно подтвердить тем фактом, что такие искусственно созданные сейсмические колебания, как функции времени, имеют значения когерентности менее 0,5 (значения, вычисленного при обработке по меньшей мере 12 выборок данных). В качестве альтернативы в отношении всех задержек по времени допускается использовать коэффициент корреляции с абсолютным значением менее 0,3 (более подробные пояснения приведены в приложении F).

Для точного определения приложенных динамических нагрузок, а также гарантии стабильности и сходимости решения временной интервал (ΔT) решения должен быть достаточно малым. Приемлемым критерием достаточности является факт того, что применение интервала $1/2\Delta T$ не приводит к изменению отклика более чем на 10 %. Как правило, временные интервалы выбирают в пределах от 1/5 до 1/15 интересующего периода, при этом интересующий период не должен быть меньше обратной величины предельной частоты. Дополнительную информацию относительно максимальных временных интервалов для часто используемых интеграционных методов можно найти в ASCE 4 [1].

11.3 Нелинейный отклик оборудования

Нелинейность отклика может быть обусловлена не только демпфированием. Подобные эффекты могут иметь геометрическую природу, например вследствие закрытия проемов, функционирования соединений и дрожания компонентов, или иметь материальный характер, например являться следствием локализованной деформации. Эти эффекты могут привести к изменению характеристик жесткости с увеличением нагрузки. Поскольку частота также является функцией жесткости, при увеличении нагруз-

ки частоты также могут изменяться. Если система демонстрирует значительную нелинейность, этот факт следует распознать и учитывать в любом последующем анализе, чтобы точно прогнозировать отклик системы. В случае невозможности корректного моделирования нелинейности следует рассмотреть альтернативный метод проведения квалификации из числа методов, описанных в разделах 9, 12 и приложении А.

Нелинейность также может возникать в результате локальных колебаний конструкций оборудования. В качестве примера можно привести высокочастотную вибрацию ненадежно закрепленных дверей электрического шкафа. При наличии таких условий, а также если признано, что на работоспособность установленных устройств влияет данный тип нелинейного поведения оборудования, процедура анализа должна учитывать это поведение и быть надлежащим образом согласована.

11.4 Прочие динамические нагрузки

Методика анализа, описанная в 11.2 в отношении сейсмической нагрузки, в равной степени применима к другим динамическим нагрузкам, таким как гидродинамические нагрузки или удары вследствие прерывания цепи. Дополнительные инструкции по гидродинамическим нагрузкам приведены в 8.6.3.

11.5 Результаты сейсмического анализа

С использованием вышеупомянутых методов проводят оценку напряжений и смещений для каждого условия нагружения. Для проверки любых взаимодействий необходимо рассчитать максимальные смещения для компонента в установленном состоянии. Чтобы проверить оборудование на предмет достаточной прочности, к рабочим нагрузкам оборудования следует добавить сейсмическую нагрузку.

Параметры рассчитанных откликов сравнивают с допустимыми значениями для демонстрации соответствия проектным требованиям. Тщательно задокументированные процедура и результаты сравнения должны продемонстрировать приемлемость механических рабочих нагрузок оборудования, оценка воздействия которых проведена на основе напряжений и смещений, возникающих в результате сейсмического события.

Анализ проводят, используя один из ранее описанных методов, с заданным числом ПЗ/S1 (которое обосновывают для каждого местоположения объекта или принимают равным пяти ПЗ/S1). Каждое ПЗ/S1 должно иметь потенциал наведения усталости, сходный с тем, что имеет смещение опорной плиты оборудования, вызванное землетрясением. Для оборудования, размещенного на каком-либо этаже здания, приблизительный расчет должен показать, что каждый возбуждающий импульс в форме волны вызывает отклик, включающий эквивалент не менее 10 циклов максимального пикового напряжения. Для возбуждения на уровне поверхности земли количество эквивалентных циклов пикового напряжения может быть другим (см. приложение Е). Число ПЗ/S1 и потенциал наведения усталости на одно ПЗ/S1 важны только для оборудования, не имеющего устойчивости к малоцикловой усталости. Анализ должен установить, что при воздействии ПЗ/S1 в сочетании с другими применяемыми нагрузками сохраняется структурная целостность оборудования. Анализ должен показать, что события ПЗ/S1, за которыми следует МРЗ/S2, не приводят к отказу оборудования выполнять назначенные функции безопасности. В отношении сложного электрического оборудования это может оказаться особенно трудной задачей, и в этом случае следует рассмотреть альтернативные методы квалификации из числа тех, что описаны в разделах 9, 12 и приложении А.

11.6 Документирование анализа

Процедуру квалификации методом анализа необходимо задокументировать с включением требований к применению или спецификациям оборудования, результатов проведенной квалификации, а также обоснований того, что использованные методы правомочны подтверждать способность оборудования выполнять свои функции безопасности (см. раздел 13).

12 Объединение анализа и испытания

12.1 Общие положения

Для некоторых типов оборудования практически невозможно провести квалификацию, используя только анализ или только испытания. Это может быть связано с габаритами оборудования, его сложностью или большим количеством сходных конфигураций. Сейсмические испытания при всех уровнях

ускорения для такого крупного оборудования, как двигатели, генераторы, многосекционные каркасы и пульты, могут оказаться невыполнимыми вследствие ограниченных возможностей оборудования для вибрационных испытаний. Данный раздел посвящен квалификации такого крупного или сложного оборудования. На блок-схеме, представленной на рисунке G.4, показан процесс, которому надлежит следовать для подтверждения квалификации сборок с устройствами по критерию сейсмостойкости путем анализа и испытаний.

12.2 Модальные испытания

12.2.1 Общие положения

Модальные испытания и анализ могут помочь при квалификации больших и сложных систем, которые не могут быть квалифицированы методами, приведенными в разделе 9. Модальное испытание целесообразно для определения резонансных частот и форм колебаний, а часто и для снижения границ демпфирования колебаний. Являясь частью процесса верификации модели сложной конструкции или оборудования, модальное испытание может быть проведено для корреляции частот и форм колебаний, определенных путем анализа и полученных при измерении отклика сложной системы. В настоящее время используют два принципиально разных метода модальных испытаний. Их обычно называют методом собственных колебаний и методом передаточной функции. Метод собственных колебаний заключается в установке генераторов вибрации на испытуемой конструкции и возбуждении этой конструкции в режиме одной моды за один раз. Метод передаточной функции заключается в одновременном возбуждении всех мод в определенном диапазоне частот, вычислении передаточной функции между точками возбуждения и откликом и использовании компьютерных методов для определения резонансных частот, демпфирования и форм колебаний в данном диапазоне.

12.2.2 Метод собственных колебаний

Подлежащее испытанию оборудование монтируют, моделируя реальные условия монтажа, и крепят к конструкции портативные генераторы вибрации в заранее определенных точках, чтобы наиболее эффективно возбудить моды колебаний для дальнейшего их анализа. Конструкция должна быть оснащена акселерометрами, датчиками перемещений или другими устройствами для отслеживания движений, обладающими достаточным диапазоном измеряемых частот, с целью определения отклика конструкции. На подготовленную конструкцию оказывают воздействие медленно распространяющейся синусоидальной вибрацией в требуемом диапазоне частот.

12.2.3 Метод передаточной функции

Метод передаточной функции основан на использовании технологий обработки цифровых сигналов и алгоритма БПФ для определения функции, переходной между входным возбуждающим сигналом и откликом в разных точках конструкции. Передаточные функции получают путем возбуждения конструкции импульсом вибрации синусоидального или случайного характера, используя для этого такие же генераторы вибрации, как в методе собственных колебаний. Следует с большим вниманием относиться к выбору места возбуждения оборудования. Передаточную функцию получают путем измерения воздействия на входе и соответствующего отклика с последующим делением Фурье-образа отклика на Фурье-образ входного воздействия. Модальные параметры определяют путем компьютерной обработки передаточной функции в каждой точке до тех пор, пока не будет получено достаточно данных для точного описания форм колебаний и других модальных параметров. Необходимо следить, чтобы количество полученных средних значений соответствовало желаемой точности передаточной функции.

12.2.4 Методы анализа данных, полученных при испытаниях

Существуют различные варианты анализа данных, полученных при испытаниях. Измеренные значения параметров динамического отклика, такие как резонансные частоты, формы колебаний и амплитуда, могут быть использованы для верификации расчетных значений параметров предложенных для анализа моделей оборудования. Как вариант, измеренные формы колебаний могут быть использованы непосредственно при анализе спектра отклика или временной зависимости. В частности, измеряемое отклонение между точками сравниваемых форм колебаний можно увеличить в соответствии с отклонением моды в заданном спектре отклика. И наконец, математические методы позволяют разрабатывать модели непосредственно по результатам параметрических измерений. Матрицу массы и механической жесткости можно получить из данных с помощью ряда формул, включающих матрицу форм колебаний и векторы модальной массы, жесткости и характеристических частот. Такие матрицы массы и механической жесткости определяют математическую модель конструкции, которая воспроизводит измеренные характеристические данные отклика.

Если конструкция демонстрирует значительную степень нелинейности в своем отклике как функцию уровня возбуждения, то при испытаниях с использованием низкоуровневого возбуждения необходимо соблюдать осторожность в отношении параметрических измерений.

12.2.5 Квалификация

Методы, комбинирующие анализ и испытание, позволяют провести адекватную оценку оборудования. Такие методы могут быть использованы для установления требований к отклику на входное возбуждение в местах расположения субкомпонентов. Квалификация субкомпонента подразумевает полномасштабные испытания данного компонента на уровне, равном или превышающем установленный отклик в данном месте.

12.3 Экстраполяция для аналогичного оборудования

12.3.1 Общие положения

Квалификация сложного оборудования только путем анализа без соответствующего обоснования не рекомендуется из-за возникновения серьезных трудностей при разработке точной модели оборудования и получении показателей, описывающих физические параметры модели (см. раздел 9). Однако существует много образцов оборудования того же типа, что и прошедшие квалификацию образцы, отличающихся от них только размерами или наличием в сборке или конструкции конкретных квалифицированных устройств. В таких случаях подвергать испытаниям каждый вариант базовой версии с квалифицированными устройствами не представляется практичным или необходимым. В таких ситуациях применяют квалификацию по сходству с использованием опытных данных и/или анализа. Экстраполяция для аналогичного оборудования на основе опыта описана в приложении А.

12.3.2 Метод испытаний

Испытания по полной программе, как описано в 9.6, и предварительные исследовательские испытания (поиск резонансных частот), описанные в 9.1.6, проводят на типичной единице оборудования. Необходимо получить и зафиксировать данные о модальных частотах, демпфировании и откликах во всех частях оборудования.

12.3.3 Анализ

Если показано, что в интересующем диапазоне частот резонансы отсутствуют, то оборудование можно подвергнуть анализу как жесткое оборудование (см. 11.2). При осуществлении поиска резонанса необходима гарантия того, что для подтверждения отсутствия резонансных частот использованы адекватные методики испытаний. Кроме того, следует убедиться, что отличия от первоначально испытанного оборудования не привели к образованию ранее не существовавших резонансов. Это можно осуществить, проведя упрощенные испытания или анализ.

Если оборудование не является жестким, то последствия отличий следует проанализировать с использованием методов, указанных в 11.2, или другими подходящими способами. При квалификации очень сложного оборудования необходимо знать его достаточно хорошо, чтобы включить в программу значимые параметры конструкции, которые обеспечат возможность расчета откликов во всех интересующих точках.

Результаты испытаний в сочетании с предварительным анализом позволяют провести коррекцию модели аналогичного оборудования с учетом измененных параметров и пересмотреть анализ модальных частот аналогичного оборудования. Результатом будет являться верифицированная аналитическая модель, которую можно использовать для квалификации аналогичного оборудования.

12.4 Испытания на ударопрочность

Лабораторные испытания на ударопрочность выполняют в соответствии с различными военными нормами (например, MIL-S-901D-1989 [8]), и они заключаются в воздействии на компонент мощных импульсных нагрузок ударного типа (ускорений). Эти ускорения должны быть достаточно большими (значительно превышающими уровни землетрясения) и достаточно продолжительными, иначе без проведения дополнительных вибрационных испытаний испытания на ударопрочность нельзя считать адекватным моделированием сейсмического события. Поскольку основной целью испытаний является проверка надлежащей сейсмической устойчивости компонентов, использование данных о стойкости к ударным нагрузкам может лишь приблизительно свидетельствовать о должном соответствии испытуемого оборудования. Это объясняется сложностью сопоставления спектра частот и продолжительности ударных воздействий с теми же параметрами сейсмических воздействий.

12.5 Экстраполяция для многокорпусных сборок

Во многих случаях проведение испытаний сборок из нескольких подобных корпусов нецелесообразно вследствие ограниченных размеров испытательного оборудования. Без надлежащего обоснования нельзя распространить квалификацию одного или нескольких соединенных вместе корпусов на большее число корпусов, соединенных в одну линию. Данный факт обусловлен следующими причинами:

a) отдельные корпуса сборки могут иметь разную массовую нагрузку или распределение массы, разную жесткость конструкции или то и другое вместе;

b) соединенные корпуса могут иметь разный динамический отклик, например разные крутильные колебания, отличающиеся от колебаний ранее квалифицированных сборок с меньшим числом корпусов;

c) отклик субкомпонентов, установленных в другом месте, может измениться.

Подходы, приведенные в 12.3, могут быть использованы для обоснования возможности экстраполяции результатов испытаний одного корпуса или небольшого количества соединенных корпусов на квалификационные испытания сборки.

12.6 Прочие испытания/анализ

В дополнение к вариантам использования, изложенным в 12.2—12.5, анализ может быть применен:

a) для объяснения причин непредвиденных ситуаций во время проведения испытаний;

b) лучшего понимания динамического поведения оборудования с целью правильного выбора метода испытаний;

c) получения расчетных характеристик ожидаемого отклика перед проведением испытаний.

13 Документация

13.1 Общие положения

Документация по квалификации оборудования на сейсмостойкость должна включать спецификацию на квалификацию и отчет о квалификации, как описано в разделе 6 и подразделе 13.2 соответственно. В документации необходимо отразить, что оборудование, прошедшее квалификацию, выполняет свои функции безопасности после воздействия сейсмических колебаний, которому оборудование было подвергнуто при квалификации.

Информация, являющаяся чьей-либо собственностью, может быть исключена из отчета о квалификации при условии наличия ссылок на первоисточники, доступные для аудита.

13.2 Отчет о квалификации на сейсмостойкость

13.2.1 Общие положения

Отчет о квалификации на сейсмостойкость должен содержать следующую информацию:

a) идентификацию оборудования, подлежащего квалификации. Для сложного оборудования идентифицируют каждый компонент с указанием предъявляемых к нему функциональных требований. Пакет квалификационной документации должен включать или содержать ссылки на протокол проведенных испытаний, отчет об анализе или отчет о применении опыта, либо их комбинацию, если при квалификации использован более чем один метод. Документация должна включать ссылки на все графические материалы, перечень использованных материалов, инструкции по проведению работ и прочие документы, необходимые для получения адекватного представления о проведении квалификации;

b) уровни RRS;

c) подробное описание квалификационного испытания, процедуры анализа, использованных данных опыта и результатов (включая относящиеся к делу аномалии и их характер). Если компонент или подсистема оборудования проходили квалификацию отдельно, использованные при этом процедуры должны быть кратко описаны;

d) сопоставление требований спецификации на квалификацию с результатами квалификации и заключение;

e) необходимые подписи и даты.

В зависимости от используемого метода квалификации необходимо предоставить дополнительную информацию, приведенную в 13.2.2—13.2.4.

13.2.2 Анализ

При выполнении анализа информацию об использованных методе и данных, а также о рассмотренных видах отказов следует предоставить в формате, легко доступном специалистам, опытным в проведении такого анализа. Необходимо четко определить граничные условия, включая анкерные крепления и другие соединения. В отчет о квалификации следует включить или привести ссылку на входные/выходные данные, необходимые для подтверждения заявленных эксплуатационных характеристик, а также на проведенное верификационное испытание математической модели. Также следует привести информацию о силе(ах) противодействия на стыковочном(ых) соединении(ях) с опорной конструкцией.

Следует составить акт, подтверждающий, что все использованные компьютерные программы были проверены на компьютерном оборудовании, на котором выполнялась программа. Необходимо указать все компьютерные программы, опции, номера версий, даты и используемые системы.

13.2.3 Испытания

Если квалификацию проводят методом испытаний, отчет о квалификации на сейсмостойкость должен содержать следующую информацию:

a) квалифицируемое оборудование:
   1) идентификацию квалифицируемого оборудования (включая устройства);
   2) функциональные характеристики квалифицируемого оборудования;
   3) настройки квалифицируемого оборудования и ограничения, при необходимости;
b) испытательный стенд, включая:
   1) местоположение;
   2) оборудование для проведения испытаний, а также его калибровку;
c) метод и процедуры испытания, включая контроль функциональности и критериев приемлемости;
d) особенности монтажа оборудования, включая все разъемы и соединения;
e) данные испытания (включая подтверждение работоспособности, изображения TRS, временные зависимости, PSD или анализ на основе БПФ, необходимые независимые статистические проверки, число примененных ПЗ/S1 и МРЗ/S2, продолжительность и т. д.), тип использованного многочастотного испытания, а также, в дополнение к TRS, временная зависимость ускорения входных колебаний. Как минимум для одного испытания в каждом из трех направлений возбуждения следует предоставить временную зависимость (динамику изменений) движения стенда при воздействии МРЗ/S2;
f) результаты испытания и заключения, включая констатацию любых аномалий.

Оценка работоспособности оборудования должна быть основана на предварительно установленных критериях приемлемости. Любой пересмотр или корректировку критериев после сбоя испытания или испытания с наблюдавшимися аномалиями необходимо задокументировать и обосновать. Описание аномалии, обнаруженной во время испытания, следует внести в отчет. Если оборудование не подвергалось модификации с целью устранения аномалии, то использование этого оборудования должно быть обосновано, и это обоснование необходимо внести в отчет о квалификации оборудования. Любой восстановительный ремонт оборудования, проведенный во время испытаний, следует зафиксировать в протоколе испытаний и привести в соответствие с требованиями по 9.1.5.

Что касается конструкций и монтажа вибростендов, обеспечивающих воздействие по нескольким осям, в отчет об испытаниях необходимо внести результаты оценки, подтверждающие, что использованный во время испытаний стенд соответствовал требованиям данного испытания, а наклон и вращение стенда во время испытания были незначительны.

13.2.4 Комбинация анализа и испытания или квалификация по сходству

Если подтверждение эксплуатационных характеристик проводят комбинированным методом анализа и испытания или путем экстраполяции данных испытания аналогичного оборудования, в отчет о сейсмической квалификации должны входить:

a) ссылка на конкретный использованный комбинированный метод анализа и испытания;
b) описание использованного оборудования;
c) данные анализа;
d) данные испытания;
e) обоснование результатов.

При проведении экстраполяции данных испытания аналогичного оборудования необходимо описать различия между его используемыми экземплярами. В отчет следует включить обоснование того, что различия не ухудшают сейсмическую устойчивость ниже допустимых пределов (может потребоваться проведение дополнительного анализа или испытаний), а также любые дополнительные подтверждающие данные.

Приложение А
(обязательное)

Квалификация на сейсмостойкость на основании опыта

А.1 Общие положения

Настоящее приложение содержит руководящие указания по квалификации оборудования на сейсмостойкость путем сопоставления с опытными данными, полученными для класса референтного оборудования, подвергнутого воздействию землетрясений или испытаниям, дополненными в случае необходимости анализом. Использование опыта может быть пригодным не для всех случаев. Ограничения приведены в А.4.2.

А.2 Экспериментальные сейсмические данные

А.2.1 Общие положения

Экспериментальные сейсмические данные могут быть получены от оборудования на объектах, подвергавшихся воздействию естественных землетрясений.

Квалификация по критерию сейсмостойкости на основании экспериментальных сейсмических данных включает пять этапов:

a) характеристику колебаний при землетрясении, воздействовавших на референтное оборудование (см. А.2.2);

b) определение сейсмостойкости класса референтного оборудования на основании опытных данных, полученных при землетрясении (см. А.2.3);

c) характеристику класса референтного оборудования, подвергшегося воздействию землетрясения (см. А.2.4);

d) сопоставление оборудования-кандидата и класса референтного оборудования, подвергшегося воздействию землетрясения (см. А.2.5);

e) документирование процесса квалификации (см. раздел А.5).

А.2.2 Характеристика колебаний естественного землетрясения

Землетрясения, выбранные из числа воздействовавших на класс референтного оборудования, характеризуют следующим образом:

a) для установления класса референтного оборудования необходимо иметь зарегистрированные данные или консервативные оценки не менее чем с четырех референтных площадок, на которых было установлено референтное оборудование. Четыре референтные площадки следует выбирать по крайней мере для четырех землетрясений;

b) на каждой референтной площадке места для оценки колебаний грунта устанавливают по зарегистрированным данным для свободной поверхности, диаметр которой равен двум диаметрам конструкций референтной площадки. На месте расположения регистрирующего устройства должны быть такие же геологические/геотехнические условия, как и на месте расположения конструкций референтной площадки. Измерения на поверхности диаметром, равным двум диаметрам конструкций, начинают на периметре фундамента объекта. Допускается использовать расчетные оценки колебаний свободной поверхности референтной площадки, для которой отсутствуют зарегистрированные данные, снятые поблизости, или площадки, находящейся на расстоянии более двух диаметров конструкций от места расположения регистрирующего устройства, при условии, что эти оценки получены и обоснованы консервативным методом. Для выполнения расчетов колебаний грунта в этих двух случаях следует использовать кратность затухания, исходя из закономерности, полученной с использованием зарегистрированных данных о сильных колебаниях, вызванных землетрясениями со схожими тектоническими условиями, свойствами земной коры и сейсмическими параметрами. Диапазоны параметров, используемые для вычисления закономерности затухания, должны охватывать параметры референтной площадки и землетрясения. Подходящий уровень консерватизма при такой оценке в среднем составляет 5 % кратности затухания спектра отклика с критическим демпфированием;

c) спектр отклика грунта референтной площадки определяют как средний из двух горизонтальных ортогональных составляющих спектра отклика для данной площадки с критическим демпфированием, учитывая уровень консерватизма 5 %. Воздействие вертикальных колебаний грунта косвенным образом учитывают при использовании сейсмических экспериментальных данных, поскольку референтные площадки подвергаются воздействию реальных землетрясений с сейсмическими колебаниями во всех трех направлениях. Вертикальную составляющую сейсмических колебаний АС во время постулированного землетрясения не считают более значительной по сравнению с горизонтальными составляющими сейсмических колебаний, чем для референтных площадок. Таким образом, при использовании метода, основанного на экспериментальных сейсмических данных, учитывают только горизонтальные составляющие смещения. Ограничения, касающиеся вертикальной составляющей смещения, приведены в А.4.2, перечисление g);

d) колебания свободной поверхности грунта следует рассматривать в качестве возбуждения, испытываемого всем референтным оборудованием на референтной площадке.

А.2.3 Экспериментальный спектр отклика при землетрясении (EES)

EES является спектром отклика, определяющим сейсмостойкость класса референтного оборудования. EES представляет собой средневзвешенный спектр отклика грунта референтных площадок. Весовой фактор учитывают в соответствии с формулой (А.1). Так, средневзвешенное спектральное ускорение EES при демпфировании 5 % от критического демпфирования и i-й частоте $A_{EES,i}$ вычисляют по формуле

$$A_{EES,i} = \frac{\sum_{n=1}^{m} N_n A_{n,i}}{\sum_{n=1}^{m} N_n}, \quad (A.1)$$

где $A_{n,i}$ — спектральное ускорение при демпфировании 5 % от критического демпфирования и i-й частоте для n-й референтной площадки;

m — число референтных площадок [см. А.2.2, перечисление а), или минимальное число];

N_n — число независимых единиц оборудования на n-й референтной площадке.

А.2.4 Характеристика класса референтного оборудования

А.2.4.1 Общие положения

Класс референтного оборудования — это группа схожего оборудования, имеющего общий диапазон физических, функциональных и динамических характеристик, работоспособность которого при землетрясениях была подтверждена. Сходство референтного оборудования, определяющее класс оборудования, должно основываться на распространении на него принципов подобия, описанных в 10.3 и 10.4. Признаки класса оборудования, число независимых единиц в классе оборудования и функциональность оборудования во время землетрясения описаны в А.2.4.2—А.2.4.4.

А.2.4.2 Признаки класса оборудования

Признаки оборудования, составляющего класс референтного оборудования на основе экспериментальных сейсмических данных, должны определяться таким образом, чтобы можно было установить свойства оборудования, важные для сейсмической прочности, и выявить и исключить любую уязвимость к сейсмическому воздействию оборудования-кандидата. Признаки сейсмической прочности и уязвимости класса референтного оборудования, установленного на основании экспериментальных сейсмических данных, определяют с учетом указанных ниже правил включения и недопустимых характеристик.

а) Правила включения определяют границы оборудования, включенного в класс референтного оборудования. Эти правила устанавливают приемлемый диапазон физических характеристик, проектные особенности, динамические характеристики, а также функции оборудования, для которого сейсмическая прочность подтверждена экспериментальными сейсмическими данными. При выработке правил следует рассматривать и оценивать следующие факторы: тип оборудования, производитель, массу, механические и конструктивные особенности, в том числе внутренние компоненты и конструкции, характеристики, размер и форму, дату выпуска, функции, расчетную производительность, траекторию передачи нагрузки с учетом особенностей монтажа, регулирующие отраслевые стандарты, материалы, собственные частоты, подвижные сборочные узлы, прикрепленные детали или компоненты, а также модификации, необходимые для достижения заданной сейсмостойкости. Не все эти факторы могут быть применимы или важны для конкретного класса оборудования. Суть данного положения состоит в том, что критические сейсмические характеристики определяют и подтверждают на основании экспериментальных данных.

В правилах включения должно быть описано разнообразие характеристик референтного оборудования. В случаях, когда разнообразие ограничено, класс референтного оборудования необходимо ограничить в соответствии с конкретными характеристиками референтного оборудования. Если при распространении класса референтного оборудования на встроенные компоненты распределительных систем (например, электромагнитный клапан в трубопроводной системе) более половины получаемых опытным путем параметров свидетельствуют об отсутствии приращения сейсмической реакции распределительной системы (т. е. встроенный компонент непосредственно примыкает к опоре распределительной системы, что обеспечивает ограничение сейсмической активности), то в правилах включения делают соответствующую оговорку, касающуюся класса референтного оборудования.

b) К недопустимым характеристикам относятся проектные особенности, материалы, конструктивные особенности или характеристики монтажа, приводящие к неспособности оборудования сохранять конструктивную целостность и выполнять заданные функции при сейсмических воздействиях, не превышающих установленный уровень сейсмостойкости оборудования или достигающих его. При определении недопустимых характеристик следует также рассмотреть и проанализировать данные по отказам из других источников (например, данные по нереферентным площадкам, подвергшимся воздействию землетрясений, и результаты испытаний).

Недопустимые характеристики должны включать любые характеристики, которые могут способствовать усталостному отказу в результате малоцикловых нагрузок при сочетании ряда событий ПЗ/S1 и МРЗ/S2. Сведения о малоцикловой усталости приведены в приложении Е.

А.2.4.3 Число независимых единиц

Класс референтного оборудования должен включать минимальное число удовлетворительно функционирующих независимых единиц оборудования. К независимым единицам относятся компоненты и оборудование, которые:

a) имеют разные физические характеристики;

b) подвергаются воздействию разных сейсмических колебаний, например вследствие воздействия разных землетрясений, нахождения на разных площадках или в разных зданиях, разной ориентации/расположения внутри одного здания.

Две или более единицы идентичного оборудования, расположенные рядом друг с другом, следует рассматривать как одну независимую единицу при каждом землетрясении.

Для классов референтного оборудования, установленных на основе экспериментальных сейсмических данных, минимальное число независимых единиц оборудования составляет 30. Если класс референтного оборудования включает менее 30 независимых единиц, то экспериментальный спектр отклика (EES) следует уменьшить, применив понижающий коэффициент, указанный в таблице А.1, чтобы получить такой же статистический уровень спектра, как у класса референтного оборудования, включающего 30 независимых единиц. Если не обосновано иное, число независимых единиц оборудования должно быть не менее 15.

Таблица А.1 — Понижающий коэффициент для EES в зависимости от числа независимых единиц

Число независимых единиц оборудования	Понижающий коэффициент
30	1,0
25	0,9
20	0,8
15	0,7

А.2.4.4 Функциональность класса референтного оборудования

Необходимо определить функции, выполняемые референтным оборудованием во время и/или после землетрясения. Соответствующее подтверждение того, что эти функции были выполнены, следует представить в определении класса референтного оборудования (см. раздел 7).

Такое подтверждение должно демонстрировать одно из следующих положений:

a) все оборудование, определяющее класс референтного оборудования, выполняло заданные функции во время и/или после землетрясения;

b) все оборудование, определяющее класс референтного оборудования, оставалось работоспособным после землетрясения. В случае необходимости следует предоставить количественную оценку функциональности оборудования во время землетрясения, основанную на сведениях о требуемом режиме эксплуатации и результатах рассмотрения вероятных режимов отказов вследствие сейсмического воздействия, которые могут препятствовать функционированию оборудования. Для количественной оценки функциональности допускается использовать данные анализа и/или испытания подобного оборудования (для примера см. разделы 9, 11 или 12).

А.2.5 Квалификация оборудования-кандидата

Квалификация единицы оборудования-кандидата с использованием экспериментальных сейсмических данных должна соответствовать следующим требованиям:

a) EES класса референтного оборудования должен охватывать RRS оборудования-кандидата во всем интересующем диапазоне частот (от 1 Гц до предельной частоты спектров отклика). Невозможность такого охвата должна быть обоснована. Для оборудования, расположенного на одной линии, RRS для возможности их сравнения с EES должны представлять собой спектры отклика конструкций, у которых распределительная система прикреплена к опоре. Следует отметить, что такой подход учитывает усиление колебаний при последовательном расположении только в тех случаях, когда референтное оборудование расположено последовательно, а его распределительная система не прикреплена к опоре [см. А.2.4.2, перечисление a)];

b) минимальный RRS, сравниваемый с EES, должен представлять собой медианный спектр отклика конструкции по горизонтальным осям с демпфированием, равным 5 % от критического демпфирования. Такой RRS в соответствии с требованиями к квалификации необходимо получать в результате моделирования воздействия MP3/S2. Квалификацию оборудования по множественным сейсмическим событиям более низких уровней, чем уровень, соответствующий RRS, таким как пять П3/S1, осуществляют в случае применения оценки единичного охватываемого RRS методами, указанными в разделе А.2, если при рассмотрении числа установленных сейсмических циклов оборудование показывает, что не имеет режимов усталостного отказа под воздействием малоцикловых нагрузок [см. А.2.4.2, перечисление b)];

c) оборудование-кандидата необходимо верифицировать на предмет соответствия правилам включения для класса референтного оборудования [см. А.2.4.2, перечисление a)];

d) оборудование-кандидата необходимо верифицировать на предмет отсутствия недопустимых характеристик для класса референтного оборудования [см. А.2.4.2, перечисление b)];

e) функцию безопасности оборудования-кандидата, в том числе устройств или узлов, вмонтированных в его корпус или прикрепленных к нему, если таковые имеются, во время и/или после землетрясения необходимо продемонстрировать классом референтного оборудования (см. А.2.4.4);

f) монтаж оборудования-кандидата, в том числе устройств или узлов, вмонтированных в его корпус или прикрепленных к нему, следует оценивать в соответствии с требованиями квалификационной спецификации;

g) поскольку производительность оборудования может меняться со временем, оборудование-кандидат, более новое или более старое, чем референтное оборудование, следует оценивать на предмет наличия значительных изменений в проекте, материалах или технологии изготовления, которые могут снизить его сейсмостойкость по сравнению с классом референтного оборудования;

h) квалификацию оборудования-кандидата следует оформлять документально в соответствии с требованиями раздела А.5.

А.3 Экспериментальные данные испытаний

А.3.1 Общие положения

Экспериментальные данные могут быть получены из результатов испытаний предыдущих квалификаций. Чаще всего экспериментальные данные применяют к квалификации на сейсмостойкость класса референтного оборудования, используя при этом результаты испытаний пяти или более отдельных единиц оборудования. Экспериментальные данные испытаний должны соответствовать требованиям 9.2, а также требованиям, относящимся к сейсмическому старению (под воздействием ПЗ), приведенным в 9.1.7. Минимальным требованием должно быть проведение пяти ПЗ/S1. Применение единичного испытания единицы оборудования для квалификации другой единицы оборудования описано в разделе 12.

Квалификация на основании экспериментальных данных включает пять этапов, которые могут быть описаны следующим образом:

a) характеристика воздействующих колебаний при испытаниях референтного оборудования (см. А.3.2);

b) установление сейсмостойкости класса референтного оборудования на основании испытаний (см. А.3.3);

c) характеристика класса референтного оборудования, подвергшегося испытаниям (см. А.3.4);

d) сопоставление оборудования-кандидата и класса референтного оборудования, подвергшегося испытаниям (см. А.3.5);

e) документирование процесса квалификации (см. раздел А.5).

А.3.2 Характеристика входных колебаний при испытаниях

Входные колебания, используемые в качестве базисных при испытаниях референтного оборудования, характеризуют следующим образом:

a) входные колебания должны быть многочастотными и удовлетворять соответствующим требованиям, указанным в 9.6.3;

b) входные колебания характеризуют полученными при испытаниях спектрами отклика в прямом, поперечном и вертикальном направлениях;

c) входные колебания необходимо регистрировать в точке монтажа оборудования;

d) входные колебания должны иметь форму широкополосного спектра отклика с шириной диапазона в одну октаву или более. Если TRS имеет узкий диапазон частот, пиковое спектральное ускорение в узком диапазоне снижают путем применения коэффициента 0,7;

e) входные колебания должны быть двух- или трехосными. Если оборудование чувствительно к эффектам перекрестного взаимодействия, допускается использовать понижающий коэффициент 0,7 для получения двухосного спектра отклика.

А.3.3 Экспериментальные спектры отклика (TES)

TES определяют сейсмостойкость класса референтного оборудования по отношению к МРЗ/S2 в прямом, поперечном и вертикальном направлениях. TES представляет собой средний по частоте спектр из спектров отклика, полученных в результате успешных испытаний без отказа функционирования оборудования. TES должен располагаться ниже нижнего спектра, охватывающего спектры отклика испытаний, приводящих к отказам. Однако в некоторых случаях спектры отклика испытаний с отказами могут иметь диапазоны с низкой спектральной амплитудой, которые вряд ли повлияли на режим отказа. Таким образом, в отдельных случаях TES может располагаться выше некоторых частей нижнего спектра, охватывающего спектры отклика испытаний с отказами. Следует отметить, что итоговый TES не обязательно представляет собой спектр отклика широкого диапазона, по которому было квалифицировано референтное оборудование. TES следует интерпретировать только как предельные значения, с которыми необходимо сравнивать максимально расширенные узкополосные RRS, как этого требует А.3.5, перечисление b).

При испытаниях на воздействие ПЗ/S1 нет необходимости получать TES, если интенсивность ПЗ/S1 составляет не более 1/2 интенсивности МРЗ/S2, поскольку оборудование подвергают воздействию ПЗ/S1 в соответствии с 9.1.7. Если интенсивность ПЗ/S1 превышает 1/2 МРЗ/S2, то при испытании на воздействие ПЗ/S1 необходимо

получать TES до тех пор, пока не будут выявлены и устранены уязвимости к малоцикловой усталости как недопустимые характеристики согласно А.3.4.2, перечисление b).

А.3.4 Характеристика класса референтного оборудования

А.3.4.1 Общие положения

Класс референтного оборудования — это группа схожего оборудования, имеющего общий узкий диапазон физических, функциональных и динамических характеристик, работоспособность которого подтверждена при испытаниях. Сходство референтного оборудования, определяющее класс оборудования, должно быть основано на расширенном принципе подобия в соответствии с 10.3 и 10.4. Класс референтного оборудования может включать более одного производителя или более одной серии продукции, когда все единицы продукции сконструированы одинаковым общим образом, содержат одинаковые основные подкомпоненты и дают динамический отклик схожего характера. Например, значимые собственные частоты референтного оборудования находятся приблизительно в рамках 1/3 октавы. Признаки класса оборудования, число независимых объектов в классе оборудования и функциональность оборудования во время испытаний описаны в А.3.4.2—А.3.4.4.

А.3.4.2 Признаки класса оборудования

Признаки оборудования, составляющего класс референтного оборудования на основании испытаний, определяют таким образом, чтобы можно было установить свойства, важные для сейсмической прочности, а также выявить и исключить любую уязвимость к сейсмическому воздействию оборудования-кандидата. Эти признаки, касающиеся сейсмической прочности и сейсмической уязвимости класса референтного оборудования, должны определяться с учетом приведенных ниже правил включения и недопустимых характеристик.

a) Правила включения определяют границы оборудования, включенного в класс референтного оборудования. Эти правила устанавливают приемлемый диапазон физических характеристик, проектных особенностей, динамических характеристик, а также функции, для соответствия которым необходимо подтвердить сейсмическую прочность экспериментальными данными испытаний. При разработке правил включения следует рассмотреть и оценить следующие факторы: тип оборудования, производителя, массу, механические и конструктивные особенности, в том числе внутренние компоненты и конструкции, характеристики, размер и форму, дату выпуска, функции, расчетную производительность, траекторию передачи нагрузки, включая особенности монтажа, регулирующие отраслевые стандарты, материалы, собственные частоты, подвижные сборочные узлы, прикрепленные детали или компоненты, а также модификации, необходимые для достижения заданной сейсмостойкости. Не все эти факторы могут быть применимы или важны для конкретного класса оборудования. Смысл данного положения заключается в том, что критические сейсмические характеристики устанавливают и подтверждают экспериментальными данными. Одно из правил включения состоит в том, что статус производителя классифицированного оборудования может получить только производитель, участвующий в производстве референтного оборудования.

b) К недопустимым характеристикам относятся проектные особенности, материалы, конструктивные особенности или характеристики монтажа, приводящие к неспособности оборудования сохранять конструктивную целостность и выполнять заданные функции при испытательном возбуждающем сигнале, не превышающем или достигающем заданный уровень сейсмостойкости. Основанием для решения проблем с отклонениями при испытаниях должна служить разработка перечня недопустимых характеристик. Также для определения недопустимых характеристик следует анализировать и учитывать данные по отказам из других источников (например, экспериментальные данные реальных землетрясений).

Недопустимые характеристики должны включать любые признаки, которые могут способствовать усталостному отказу в результате малоцикловых нагрузок при сочетании ряда ПЗ/S1 и МРЗ/S2. Сведения о малоцикловой усталости приведены в приложении Е. Следует отметить, что экспериментальные данные испытаний, используемые для определения класса референтного оборудования на основании испытаний, включают данные испытаний на воздействие ПЗ/S1. Эти данные позволяют определить, имеет ли референтное оборудование признаки чувствительности к малоцикловой усталости. Альтернативный способ обнаружения признаков чувствительности к малоцикловой усталости предполагает получение TES в ответ на ПЗ/S1 таким же образом, как указано в А.3.3, для получения TES в ответ на МРЗ/S2.

А.3.4.3 Число независимых объектов

Класс референтного оборудования должен включать как минимум пять независимых удовлетворительно функционирующих единиц оборудования. К независимым единицам оборудования относят компоненты и оборудование, которые:

a) имеют разные физические характеристики;

b) подвергались воздействию различных сейсмических колебаний.

Например, две или более единицы идентичного оборудования, подвергшиеся при испытании воздействию одного и того же возмущающего сигнала, следует рассматривать как один независимый объект. Число независимых объектов должно быть достаточным для подтверждения того, что при испытаниях был продемонстрирован полный диапазон параметров динамического отклика, присущих определенному классу оборудования.

А.3.4.4 Функциональность класса референтного оборудования

Необходимо определить функции, которые должно выполнять референтное оборудование во время и/или после испытаний. Соответствующее обоснование того, что эти функции выполнялись, следует представить в определении класса референтного оборудования (см. раздел 7).

А.3.5 Квалификация оборудования-кандидата

К процедуре квалификации единицы оборудования-кандидата с использованием экспериментальных данных испытаний предъявляют следующие требования:

a) RRS должен быть охвачен TES класса референтного оборудования во всем интересующем диапазоне частот (от 1 Гц до предельной частоты спектров отклика). Невозможность полного охвата RRS экспериментальным спектром отклика следует обосновать;

b) RRS, используемый для сравнения с TES, должен представлять собой спектр отклика конструкций на месте монтажа оборудования-кандидата. Данный RRS, как указано в квалификационной спецификации, должен быть получен в качестве реакции на MP3/S2. Если RRS максимально расширен с целью учета неопределенности или изменчивости места расположения, следует указать, что фактический спектр отклика в месте монтажа представлен узкой полосой спектра (см. А.3.3);

c) RRS, используемый для сравнения с TES, следует вычислять с учетом того же значения критического демпфирования, который соответствовал TES. Если значения демпфирования для RRS и TES отличаются, то для их сравнения следует использовать рекомендации, приведенные в 5.8.2.2;

d) оборудование-кандидата необходимо верифицировать на предмет соответствия правилам включения для класса референтного оборудования [см. А.3.4.2, перечисление a)];

e) оборудование-кандидат должно быть верифицировано с целью исключения недопустимых характеристик класса референтного оборудования [см. А.3.4.2, перечисление b)];

f) функция безопасности оборудования-кандидата, в том числе устройств или узлов в его составе или присоединенных к нему, если таковые имеются, выполняемая во время и/или после сейсмических испытаний, должна быть продемонстрирована классом референтного оборудования (см. А.3.4.4);

g) крепежную арматуру оборудования необходимо оценить в соответствии с требованиями квалификационной спецификации;

h) поскольку производительность оборудования может меняться со временем, оборудование-кандидат более поздней или более ранней даты выпуска, чем референтное оборудование, должно быть оценено на предмет наличия существенных изменений в конструкции, материалах или технологии изготовления, которые могли снизить сейсмостойкость по сравнению с классом референтного оборудования;

i) квалификация оборудования-кандидата должна быть оформлена документально в соответствии с требованиями, указанными в разделе А.5.

А.4 Особые аспекты

А.4.1 Оборудование, прочное по своей природе

Опыт показывает, что определенные типы оборудования обладают высокой устойчивостью к сейсмическим инерционным нагрузкам. Это может быть результатом собственных характеристик, необходимых для выдерживания эксплуатационных или транспортных нагрузок, и применения подробно разработанных стандартов на проектирование. Такое оборудование является прочным изначально. Если природная сейсмическая прочность установлена путем анализа, испытаний или на основе экспериментальных сейсмических данных, или если сейсмические нагрузки составляют лишь небольшую часть эксплуатационных нагрузок, можно упростить и сократить правила для характеристики класса референтного оборудования (такие, как признаки класса и число независимых объектов, описанные в А.2.4 и А.3.4) и процедуру определения сейсмостойкости класса референтного оборудования (за счет EES и TES, описанных в А.2.3 и А.3.3). В этом случае характеристику класса референтного оборудования и техническое обоснование установленного уровня сейсмостойкости (по EES или TES) осуществляют и оформляют документально как справочные данные для этого особого случая.

А.4.2 Ограничения

Квалификация на основании экспериментальных данных, полученных при реальном землетрясении или испытании, может иметь некоторые ограничения. Если таковые ограничения имеют место, то следует применять методы квалификации на сейсмостойкость, описанные в разделах 9, 11 или 12, или дополнить методы квалификации на основании опыта другими методами. О таких случаях сказано ниже.

a) Некоторые типы оборудования имеют сложные конструктивные особенности, или их конструкция значительно меняется со временем. Такое оборудование требует более детального рассмотрения возможных изменений конструкции, что может сделать нецелесообразным применение экспериментальных данных (например, микропроцессорная система). В таких случаях следует применять другие методы квалификации.

b) В некоторых случаях ограничения связаны с необходимостью использования во время землетрясения функциональных возможностей оборудования и устройств, например:

1) функционирования переключающих устройств или электромеханического оборудования, когда инерционные нагрузки могут вызвать непредусмотренные изменения состояния (например, реле, контакторов, выключателей и прерывателей);

2) функционирования оборудования в условиях пониженного напряжения или тока и временны́х требований. Чрезвычайно трудно установить функциональные возможности во время события по экспериментальным сейсмическим данным, как указано в А.2.4.4. В этих случаях следует применять другие методы квалификации.

c) Если числа и/или разнообразия независимых объектов или числа референтных площадок недостаточно для адекватного определения класса референтного оборудования по экспериментальным сейсмическим данным, то следует применять другие методы квалификации.

d) Применение экспериментальных сейсмических данных для подтверждения квалификации оборудования по критерию сейсмостойкости в сочетании с нормальной эксплуатационной нагрузкой: для оборудования, подвергаемого другим параллельным нагрузкам (например, гидродинамическим, сбросам через SRV), следует применять дополнительные методы квалификации, позволяющие учесть влияние параллельных нагрузок.

e) Для компонентов, расположенных в границах контура ядерного реактора, находящегося под давлением, способность компонента выполнять назначенную функцию по поддержанию давления и стойкость к землетрясению следует определять отдельно, применяя соответствующие критерии.

f) Отдельного рассмотрения требует квалификация оборудования, применение которого подразумевает воздействие на него до или во время землетрясения крайне неблагоприятных условий окружающей среды или условий, способствующих старению (см. IEC/IEEE 60780-323). В таких случаях следует применять методы квалификации, отличные от методов, основанных на опыте.

g) Если при квалификации на основании сейсмических экспериментальных данных оказывается, что вертикальная составляющая RRS превышает горизонтальную составляющую и может негативно влиять на функциональность оборудования-кандидата, то следует применять другой метод квалификации по критерию сейсмостойкости.

h) Если оборудование-кандидат содержит элемент, который может дать отказ, связанный с усталостью под воздействием малоцикловых нагрузок (см. приложение Е), этот элемент следует оценивать альтернативным методом, одним из тех, что описаны в 9.6.5 или 11.5.

А.5 Документирование квалификации, основанной на опыте

А.5.1 Общие положения

При использовании для квалификации на сейсмостойкость единицы оборудования-кандидата метода, основанного на опыте, квалификация должна включать соответствующую документацию, указанную в разделе 13, и документацию, содержащую:

a) справочные данные;

b) информацию о квалификации оборудования-кандидата, указанную в А.5.2 и А.5.3.

А.5.2 Справочные данные

Документированные справочные данные, использованные для квалификации на основе опыта, должны соответствовать требованиям, изложенным в приложении А, и включать следующее:

a) характеристику экспериментальных колебаний (см. А.2.2 и А.3.2);

b) формирование EES или TES (см. А.2.3 и А.3.3);

c) характеристику класса референтного оборудования (см. А.2.4 и А.3.4).

Справочные данные могут относиться к квалификации рассматриваемого оборудования или иметь общий характер и входить в документацию посредством ссылки.

Задокументированные экспериментальные сейсмические данные должны содержать результаты обзоров, инспекций или опросов, проведенных вскоре после землетрясения, чтобы подтвердить, что референтное оборудование выполняло свои функции во время и после землетрясения без какого-либо ремонта или корректировок.

Следует обратить особое внимание на документацию по предыдущим землетрясениям, касающуюся оборудования, которая могла быть составлена спустя значительный период времени после землетрясения, чтобы установить ее корректность и применимость. Обоснование применения и приемлемости таких данных следует четко сформулировать в квалификационном отчете.

Задокументированные экспериментальные данные испытаний должны содержать результаты обзоров отчетов о квалификационных сейсмических испытаниях, в том числе, кроме прочего, данные, необходимые для идентификации типа, модели и производителя оборудования, входных колебаний при испытаниях, спектров отклика на МРЗ/S2 и ПЗ/S1, а также функциональной работоспособности.

Документация должна включать идентификацию материалов, комплектующих и компонентов, а также модификации для описания признаков референтного оборудования.

Необходимо фиксировать воздействие любых сбоев и отслеживать их влияние с целью идентификации недопустимых характеристик. Документация должна включать данные о сбоях, ремонтных работах и состоянии референтного оборудования.

А.5.3 Квалификация оборудования-кандидата

Документацию о квалификации на сейсмостойкость оборудования-кандидата для его целевого применения составляют по тому же плану, что и отчет о сейсмической квалификации (см. 13.2), и она включает следующее:

a) документацию со справочными данными или ссылками на них, как указано в А.5.2, которые использованы при сейсмической квалификации оборудования-кандидата;

b) документацию по квалификации оборудования-кандидата, подтверждающую соблюдение требований по А.2.5 или А.3.5.

Необходимо представить обоснование того, что оборудование-кандидат отвечает требованиям, предъявляемым к классу референтного оборудования, с точки зрения соответствия правилам включения и предотвращения недопустимых характеристик. Следует указать различия между референтным оборудованием и оборудованием-кандидатом. Для подтверждения того, что различия не снижают сейсмостойкость ниже допустимого предела, могут потребоваться дополнительные анализ или испытание. Документация должна подтверждать, что референтное оборудование может выполнять заданные функции в условиях, равных условиям, требуемым для оборудования-кандидата, или в более жестких условиях.

Приложение В
(справочное)

Измерение ускорения нулевого периода

Ускорение нулевого периода (УНП) является одним из параметров, который следует измерять, чтобы показать, что TRS должным образом охватывает RRS. Необходимо, чтобы УНП TRS охватывало УНП RRS с учетом изменения во времени только частот колебаний вибростенда, находящихся в области усиления RRS. Для лучшего понимания следующих далее положений можно назвать такое ускорение нулевого периода TRS идеальным.

Значение УНП получают анализом спектра отклика до частоты, превышающей частоты колебаний вибростенда в их временно́й зависимости. Типичные временны́е зависимости колебаний вибростенда обычно содержат частоты, превышающие частоты области усиления RRS. Более высокие частоты могут быть сгенерированы в результате:

a) искажений формы волн под воздействием гидравлических возбудителей вибрации;

b) неплотных креплений и дребезжания, возникающих между вибростендом, крепежными приспособлениями и испытуемым изделием;

c) неплотных креплений и дребезжания, возникающих внутри самого испытуемого изделия.

Любые такие воздействия могут препятствовать точному измерению истинного или фактического УНП спектра отклика при испытании, даже если провести анализ до частот 100 или 200 Гц. Кроме того, даже когда истинное значение УНП TRS получено анализом до достаточно высокой частоты, это не дает прямого способа узнать без дальнейшего анализа, когда величина истинного УНП станет равной идеальному УНП TRS. Для получения истинного и идеального УНП можно применять указанные ниже методы.

Основной TRS должен отражать совокупность волновых колебаний в точке измерения с тем же значением критического демпфирования, что и у RRS. Когда форма TRS сходна с формой RRS, сравнительно точное значение УНП можно получить из высокочастотной асимптоты TRS. Когда TRS имеет тенденцию к повышению в высокочастотном диапазоне, можно выполнить дополнительный анализ при существенно отличающемся значении демпфирования. Истинное значение УНП можно получить в высокочастотной части спектра, где сходятся кривые двух TRS. Когда две кривые не сходятся, истинное значение УНП можно определить только путем анализа до более высокой частоты.

Когда истинное значение УНП TRS показывает, что за пределами области усиления RRS, отражающего временную зависимость, нет высоких частот, то такое значение УНП также можно считать идеальным.

Когда истинное значение УНП TRS показывает присутствие высоких частот, можно выполнить дополнительный анализ формы волны фильтрацией низких частот сигнала на предельной частоте RRS или выше нее. Это покажет значение идеального УНП, которое должно быть равным УНП RRS или превышать его.

Для цифровых систем могут иметь место аппаратные/программные ограничения, связанные с размером блока, частотой выборки и фильтрами защиты от наложения спектров. Рекомендуется проводить анализ только до интересующего максимума частот RRS. После этого УНП определяют следующим образом:

d) по пиковому ускорению, показанному на оцифрованной временной зависимости, полученной с применением фильтров защиты от наложения спектров, установленному при предельной частоте;

e) исследованием записанного спектра отклика во времени, отфильтрованного на предельной частоте.

Следует обратить внимание на то, что выбранная верхняя частота не должна превышать частоту отклика регистрирующего устройства. Альтернативой самописцу может служить осциллограф, имеющий в принципе более высокую частоту отклика. Поскольку значение УНП реагирует на межфазное взаимодействие между различными частотными компонентами, рекомендуется использовать фильтр для установления предельной частоты.

Указанные методы анализа также можно применять в случаях, когда измеряют отклик какой-либо точки с целью использования его в качестве RRS для последующего испытания компонента или устройства. При таком использовании испытания рекомендуется сначала синтезировать волновой импульс отфильтрованного RRS, а потом добавлять более высокие частоты для получения полного RRS. В качестве альтернативы для демонстрации требуемого состава частот можно использовать PSD.

Приложение С
(справочное)

Состав частот и стационарность

Содержание настоящего приложения касается решения двух задач:

a) состава частот;

b) стационарности состава частот.

Целью обеих задач является формирование входного волнового импульса, должным образом имитирующего возбуждение постулированным сейсмическим событием. Даже в случае, когда TRS охватывает RRS, вследствие отличия форм колебаний этих двух спектров состав частот их волновых колебаний может меняться коренным образом. Подобное явление может наблюдаться в отношении одних частот и быть нехарактерным для других. Существует ряд способов, которыми можно воспользоваться, чтобы показать адекватность состава частот синтезированной формы волнового импульса, например, следующим образом:

c) RRS охвачен TRS при аналогичных формах спектров, таким образом подобные усиления приводят к значительным спектральным пикам в диапазонах усиления спектров;

d) состав частот формы волнового импульса при испытании, полученной на основе преобразования Фурье, совместим с областью усиления RRS;

e) состав частот PSD волнового импульса при испытании совместим с усиленной частью RRS.

Показав надлежащий состав частот, необходимо также показать его статистическое постоянство во времени при разумной допустимой погрешности.

Чтобы гарантировать стационарность, все необходимые частоты в многочастотных волновых импульсах должны статистически присутствовать в сильных колебаниях. Один из способов убедиться в стационарности — показать это, получая TRS с временным интервалом. Процедура приведена ниже.

Процедура получения спектра отклика с временны́м интервалом отличается от традиционного анализа спектра отклика тем, что выявление пика откликов осцилляторов с одной степенью свободы происходит как функция временны́х интервалов. Например, промежуток времени, равный 30 с, может быть разделен на пять интервалов по 6 с, каждый из которых имеет соответствующий спектр отклика. Следует отметить, что временна́я зависимость входного сигнала постоянна во всем промежутке времени и не разделена на интервалы. На практике минимальный временной интервал должен составлять некоторую величину, кратную периоду наименьшей частоты. Основание для сравнения можно получить из похожего анализа временны́х зависимостей репрезентативного реального землетрясения.

Другой метод подтверждения стационарности состава частот предполагает использование PSD с временны́м интервалом. Участок временной зависимости ускорения вибростенда с сильными колебаниями делят на несколько интервалов и рассчитывают PSD для каждого интервала. Сопоставление нескольких PSD должно показать, что все частоты статистически присутствуют в одинаковой степени в каждом временно́м интервале. Основание для сравнения можно получить из похожего анализа временны́х зависимостей репрезентативного реального землетрясения.

Еще один метод подтверждения соответствующей стационарности состава частот заключается в представлении временны́х зависимостей входного волнового импульса, используемого при испытании. Это можно сделать, разделив волновой импульс на узкополосные составляющие (например, с интервалом 1/3 октавы) и представив временны́е зависимости для каждого интервала. Каждая частотная составляющая должна быть статистически непрерывной на протяжении всего испытания. При этом вероятностная плотность максимальной амплитуды для каждого интервала волнового импульса шириной 1/3 октавы должна подчиняться распределению Релея. Для подтверждения стационарности можно применять любой другой получивший обоснование метод.

Следует отметить, что для каждого метода синтезирования возбуждающего волнового импульса необходимо продемонстрировать стационарность состава частот хотя бы один раз, т. е. подтверждение стационарности не требуется для каждого испытания.

Приложение D
(справочное)

Испытания на условную вероятность отказа при сейсмическом воздействии

D.1 Общие положения

Испытание на условную вероятность отказа при сейсмическом воздействии (9.3) — это метод, применяемый для определения порогового уровня возбуждения, ниже которого испытуемое оборудование отвечает функциональным и конструктивным требованиям в соответствии с его целевой функцией безопасности. Испытание может быть проведено с использованием различных волновых возбуждающих импульсов, описанных в 9.6, при соблюдении рекомендаций и ограничений, приведенных в настоящем приложении.

Данные испытаний на условную вероятность отказа при сейсмическом воздействии могут быть использованы для разных целей: от установления общих квалификационных уровней до предоставления информации для оценки вероятностного риска систем, в которых должно быть установлено оборудование. Результаты испытаний на условную вероятность отказа при сейсмическом воздействии могут быть ограничены рамками физических способностей имитаторов сейсмического воздействия или общими возможностями оборудования. Другими словами, испытуемое оборудование может быть устойчивым к более сильному возбуждению, чем максимальный входной сигнал, поступающий от вибростенда (т. е. сверх предела стенда).

Обычно программа испытаний на сейсмостойкость предусматривает заданный уровень квалификации (например, конкретное применение при конкретной сейсмической обстановке). Если во время выполнения программы испытаний оборудование демонстрирует несоответствие критериям приемлемости, но не получает повреждений, исключающих дальнейшие испытания, то уровень возбуждения можно постепенно снижать до тех пор, пока не будет достигнут уровень, при котором испытуемое оборудование будет соответствовать критериям приемлемости. И наоборот, если оборудование успешно проходит испытание и соответствует всем критериям приемлемости для заданного уровня квалификации, то уровень возбуждения можно постепенно повышать до тех пор, пока не будет достигнут пороговый уровень, при котором испытуемое оборудование перестанет соответствовать критериям приемлемости. Уровни можно регулировать исходя из практических соображений, чтобы найти максимальный уровень успешных испытаний, который будет считаться уровнем условной вероятности отказа оборудования при сейсмическом воздействии. Следует обратить внимание на то, что испытуемое оборудование должно быть достаточно состарено для проведения необходимого числа испытаний на воздействие ПЗ/S1 до последнего успешного испытания. В приложении Е даны рекомендации по оценке количества циклов нагрузки, прилагаемых к единице испытуемого оборудования.

Кроме того, данные испытаний на условную вероятность отказа при сейсмическом воздействии очень полезны для определения запаса сейсмостойкости, учитывающего работоспособность изделия по истечении времени его целевого применения.

D.2 Возбуждение колебаний

Как было указано выше, испытания на условную вероятность отказа при сейсмическом воздействии можно проводить с использованием различных форм возбуждающего волнового импульса, описанных в 9.6. Например, чтобы определить уровень устойчивости оборудования к кратковременному одночастотному возбуждению, оборудование может быть подвергнуто любому одночастотному возбуждению, например синусоидальным колебаниям. Синусоидальные колебания можно применять в диапазоне частот от 1 Гц до предельной частоты. Синусоидальные колебания применяют последовательно на каждой собственной частоте оборудования, установленной испытанием по поиску резонанса. Однако если резонансные колебания оборудования точно не определены, интервал частот между испытаниями можно сузить до 1/2 октавы или менее для достижения большего консерватизма. С другой стороны, когда из-за нелинейного искажения сигнала внутри оборудования имеет место широкополосный резонансный отклик, частотный интервал можно расширить во избежание нежелательного эффекта усталости. Амплитуду колебаний на каждой частоте увеличивают до тех пор, пока оборудование не перестанет удовлетворять критериям приемлемости. Число колебаний на импульс должно находиться в диапазоне от 5 до 10, а число импульсов зависит от частоты возбуждающего сигнала и продолжительности моделируемого землетрясения. По этим данным можно построить кривые зависимости уровня входного сигнала от частоты. Кроме того, по одночастотным входным данным можно вычислить спектры отклика при условной вероятности отказа с учетом определенных значений демпфирования.

Аналогично способу возбуждения синусоидальным импульсом оборудование может быть подвергнуто возбуждению непрерывными синусоидальными колебаниями такой же частоты. Можно использовать дополнительные частоты для более полного определения нижних точек на графике условной вероятности отказа при сейсмическом воздействии. Кроме того, по данным испытаний с установившимся непрерывным синусоидальным возбуждением можно графически представить серию спектров отклика при условной вероятности отказа с учетом определенных значений демпфирования. Полученные таким образом спектры отклика представляют собой классические резонансные кривые со средним значением тестовых частот.

Для демонстрации уровня условной вероятности отказа оборудования при сейсмическом воздействии многочастотного возбуждения оборудование должно быть подвергнуто воздействию случайного многочастотного сигнала. Общий уровень и форму спектра необходимо откорректировать для установления спектра отклика при условной вероятности отказа при сейсмическом воздействии.

Если имеет место суммарный эффект в случае мультимодального отклика, спектр отклика при условной вероятности отказа при сейсмическом воздействии находится ниже спектра, установленного при одночастотном возбуждении.

D.3 Применение результатов

Ниже представлены рекомендации по использованию данных испытаний на условную вероятность отказа при сейсмическом воздействии.

a) Когда RRS имеет широкий диапазон, многочастотный спектр отклика при условной вероятности отказа вследствие сейсмического воздействия, сформированный с учетом соответствующего критического демпфирования, следует наложить на RRS, и он должен быть выше RRS.

b) Когда требование разрешает проведение испытания с одночастотным возбуждением, допускается для охвата RRS использовать спектр отклика при условной вероятности отказа вследствие сейсмического воздействия, полученный при таком испытании.

c) Когда RRS состоит из высокого узкого пика (например, пик по причине преобладающего горизонтального усиливающегося резонанса), одночастотный спектр отклика при условной вероятности отказа вследствие сейсмического воздействия, полученный при соответствующем критическом демпфировании, следует наложить на RRS, и он должен быть выше RRS.

d) Когда RRS представляет собой сочетание вариантов a), b) и c), лучше всего работоспособность оборудования демонстрирует комбинация данных испытаний на условную вероятность отказа вследствие сейсмического воздействия, при условии, что их использование соответствующим образом обосновано.

Спектр отклика при условной вероятности отказа вследствие сейсмического воздействия может быть использован в качестве входной информации для оценки вероятностного риска системы, в которую должен быть включен испытуемый компонент. В этом случае спектр отклика при условной вероятности отказа сначала преобразовывают в функцию вероятностного отказа, которая характеризует зависимость частоты колебаний испытуемого компонента, приводящей к отказу, от амплитуды возбуждения. По данной теме более подробную информацию можно получить в материалах, посвященных оценке вероятностных рисков.

D.4 Другие аспекты

По сути, испытания на условную вероятность отказа при сейсмическом воздействии представляют собой попытку определить границу между допустимым и недопустимым режимами работы оборудования. В зависимости от формы волнового возбуждения, используемой методики, а также действительной прочности конструкции испытания оборудования на условную вероятность отказа при сейсмическом воздействии могут оказаться в значительной степени избыточными. Это важное соображение, особенно в случае, когда сейсмические испытания являются только частью более широких программ испытаний [например программ, касающихся разрыва первого контура ядерного реактора (HELB), аварий с потерей теплоносителя (LOCA), высоты подпора]. Поэтому при разработке таких программ следует предусматривать возможность использования нескольких образцов, подвергаемых старению в одинаковых режимах, часть из которых (один или более) подлежит испытаниям на условную вероятность отказа при сейсмическом воздействии. Если в ходе испытаний подгруппа испытуемого оборудования достигает чрезмерной степени старения, ставящей под вопрос возможность его использования для последующих испытаний, то оставшиеся ранее состаренные образцы могут быть взяты для выполнения остальной программы испытаний.

Когда испытания на условную вероятность отказа при сейсмическом воздействии выполняют после успешного проверочного испытания путем пошагового увеличения уровня испытания, то обычно устанавливают шаг таким образом, чтобы можно было учитывать старение оборудования при воздействии ПЗ/S1. Например, если уровень ПЗ/S1 принимают равным 1/2 уровня МРЗ/S2, то уровень входных колебаний можно увеличивать с шагом 20 % (т. е. 1,20, 1,40, 1,60) от исходного уровня МРЗ/S2 до тех пор, пока объект не перестанет соответствовать критериям приемлемости или не будет достигнут предел вибростенда. Если уровень ПЗ/S1 принимают равным 2/3 уровня МРЗ/S2, то уровень последовательных испытательных колебаний можно увеличивать с шагом 15 % (т. е. 1,15, 1,30, 1,45) от исходного уровня МРЗ/S2 до тех пор, пока объект не перестанет соответствовать критериям приемлемости или пока не будет достигнут предел вибростенда. Это только рекомендации, и гарантирование адекватного учета старения при воздействии ПЗ/S1 является ответственностью лиц, принимающих решение об использовании оборудования на месте назначения.

При проведении испытаний с многочастотным случайным возбуждением по нескольким осям получают сложные комплексные спектры отклика при условной вероятности отказа вследствие сейсмического воздействия. Это означает, что форма спектра частоты в зависимости от ускорения может влиять на пороговый уровень приемлемости, установленный посредством испытаний на условную вероятность отказа при сейсмическом воздействии. При использовании данных испытаний на условную вероятность отказа для установления уровня квалификации следует применять одинаковые критерии при сравнении TRS и RRS, а также быть уверенным в том, что перед проведением квалификационных испытаний оборудование было должным образом состарено под воздействием ПЗ/S1.

Приложение Е
(справочное)

Продолжительность испытания и число циклов

Только одного такого фактора, как продолжительность воздействия, может быть недостаточно для уверенности в адекватности отклика оборудования, свидетельствующего о малоцикловой усталости. При увеличении диапазона деформаций конструктивных элементов вдвое эффект усталости возрастает многократно, приблизительно в шесть раз. Диапазон деформаций, имеющий значение для оценки малоцикловой усталости, содержит сбой, имеющий место приблизительно в течение 100 циклов или менее. В связи с этим сейсмическое испытание следует проводить в консервативном режиме, придерживаясь при этом адекватной продолжительности и соблюдая требование о том, чтобы входной возбуждающий сигнал вызывал достаточное число циклов ответных сильных колебаний оборудования. Согласно 9.6.5 входной возбуждающий сигнал должен генерировать отклик в любой точке оборудования, достаточный, чтобы вызвать общую усталость, как минимум эквивалентную той, которую обеспечивает входное сейсмическое воздействие в опорной плите оборудования. Число циклов сильных колебаний в отфильтрованном (зданием, полом, шкафом, трубопроводом) отклике, отображенном в виде функции времени, зависит от нескольких факторов, таких как усиление за счет резонанса (грунта, здания, оборудования), демпфирование и место расположения оборудования в здании.

Как правило, отфильтрованный отклик должен включать один или более циклов пиковых значений параметра плюс набор циклов пиков, обусловленных изменяющейся амплитудой данного параметра (циклы пиков фракционной амплитуды, фракционные циклы пиков). Фракционные циклы пиков могут быть преобразованы в эквивалентные циклы пиковых значений параметра с использованием графика на рисунке Е.1, в основе которого лежит усталостная кривая (отношение напряжения и числа циклов, S/N) в степени 2,5. Данную кривую выражают уравнением

$$\text{Фракционные циклы} = \frac{1}{(\text{Процент циклов пиковых значений параметра})^{2,5}}. \qquad (E.1)$$

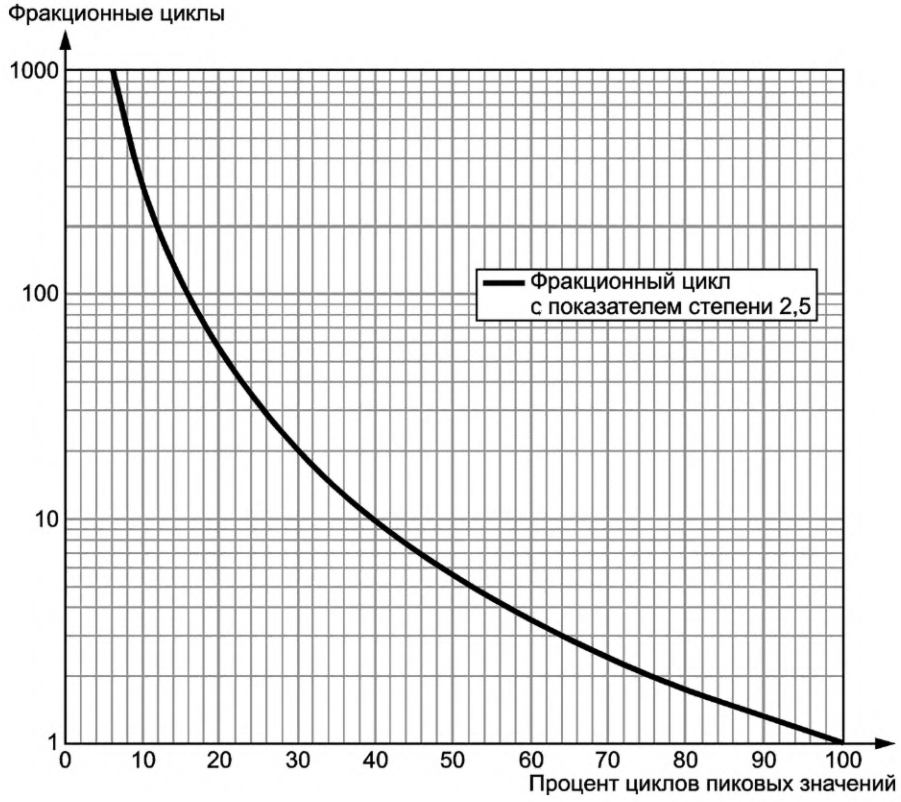


Рисунок Е.1 — Фракционные циклы для получения одного цикла пиковых значений параметра отклика оборудования

Общую форму этого уравнения для определения эквивалентных циклов пиковых значений ($PC_{E_{max}}$) для конструкционной стали выражают формулой

$$PC_{E_{max}} = \text{Число фракционных циклов} \cdot (\text{Процент циклов пиковых значений параметра})^{2,5}. \quad (E.2)$$

На рисунке Е.1 (показывающем число фракционных циклов, требуемых для получения одного цикла пиковых значений параметра колебаний оборудования) приведен график зависимости числа фракционных циклов от процента циклов пиковых значений. Допускается использовать любую комбинацию числа и амплитуды фракционных циклов. Например, для получения пяти эквивалентных циклов пиковых значений пригодна любая из следующих комбинаций:

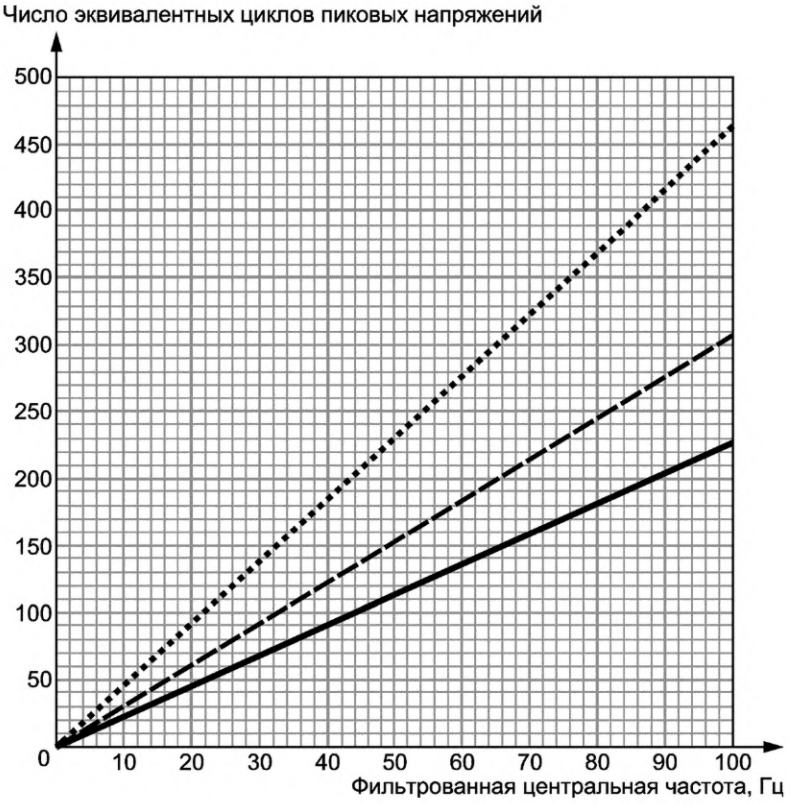
a) 15 фракционных циклов при 65 % циклов пиковых значений;

b) 10 фракционных циклов при 75 % циклов пиковых значений;

c) четыре фракционных цикла при 70 % плюс 10 фракционных циклов при 65 % циклов пиковых значений.

Таким образом, определив распределение пиковых амплитуд в заданном отфильтрованном волновом отклике и используя рисунок Е.1, можно установить общее число эквивалентных циклов пиковых значений. Следует отметить, что показатель степени 2,5 характерен для обычных конструкционных сталей. Для внедрения данного метода оценки малоцикловой усталости на другие материалы следует изменить показатель степени.

Типичный фильтрованный отклик на сильные сейсмические колебания может быть получен из узкополосного спектра случайной вибрации, для которой вероятностное распределение пиковой амплитуды представлено распределением Релея. Это свойство, наряду с центральной частотой и продолжительностью фильтрованных колебаний, позволяет установить число эквивалентных циклов пиковых напряжений с помощью рисунка Е.1. Вытекающее отсюда соотношение между числом эквивалентных циклов пиковых значений и центральной частотой фильтрованных колебаний при воздействии устойчивой случайной вибрации показано на рисунках Е.2 и Е.3 для трех разных продолжительностей сильных колебаний. На рисунке Е.2 представлены центральные частоты до 100 Гц, а на рисунке Е.3 — низкие частоты до 20 Гц для большего разрешения. Таким образом, любой отклик оборудования, возникающий в результате воздействия устойчивой случайной вибрации, должен сблизить эти результаты.



▪▪▪▪▪▪▪▪ — продолжительность 30 с; ▬ ▬ ▬ — продолжительность 20 с; ▬▬▬ — продолжительность 15 с

Рисунок Е.2 — Число эквивалентных циклов пиковых напряжений, вызванных устойчивой случайной вибрацией

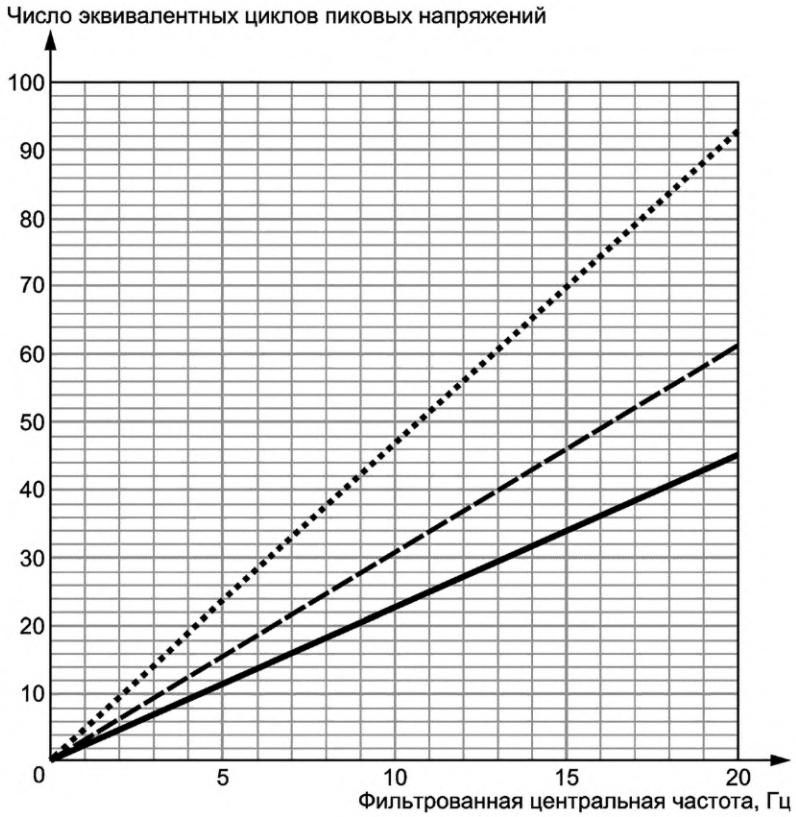


Рисунок Е.3 — Число эквивалентных циклов пиковых напряжений, вызванных устойчивой случайной вибрацией частотой до 20 Гц

При моделировании возбуждения на уровне поверхности земли необходимо включать многочастотную составляющую вплоть до предельной частоты. Эквивалентное число циклов усталости для любых резонансных колебаний оборудования вплоть до предельной частоты можно определить непосредственно по рисункам Е.2 или Е.3. Для оборудования, возбуждаемого колебаниями несущих перекрытий, следует рассматривать только резонансные колебания с частотами из преобладающего диапазона частот здания, поскольку отклик здания вне этого диапазона пренебрежимо мал. В случае, когда преобладающая частота здания составляет 5 Гц, следует применять среднее значение при числе эквивалентных циклов, по крайней мере, 10 и продолжительностью 15 с.

Для некоторых форм входных колебаний, таких как синусоидальный прорыв или синусоидальный импульс, распределение пиков в получаемом фильтрованном отклике конструкции такое же, как в самом входном сигнале. В связи с этим потенциальный цикл пиковых напряжений может быть установлен непосредственно по форме входного волнового сигнала, который в соответствии с 11.5 должен включать как минимум 10 эквивалентных циклов пиков. Для испытаний с воздействием одночастотным синусоидальным импульсом общее число циклов при испытании на любой частоте определяется в 9.6.2.4 числом импульсов и циклов колебаний внутри импульса. Это должно обеспечить по крайней мере пять циклов максимальных пиков (УНП) и несколько циклов других фракционных пиков (менее чем УНП) для испытания на любой частоте. Фракционные циклы могут быть разделены на меньшее число эквивалентных циклов пиковых значений с использованием рисунка Е.1. Например, полные фракционные циклы из пяти синусоидальных импульсов с 10 циклами и из пяти циклов колебаний на один импульс эквивалентны приблизительно 17 и шести циклам пиковых значений соответственно.

Таким образом, для указанных колебаний получают общее число эквивалентных циклов пиковых значений, равное 22 и 11 соответственно. Для других типов возбуждающих колебаний, у которых формы волнового отклика аналогичны форме сигнала возбуждения, выполняют такие же вычисления эквивалентных циклов пиковых значений, используя рисунок Е.1.

Известно, что для узкополосных волновых откликов, сформированных при воздействии синтезированной практически устойчивой случайной вибрации, распределение пиковых амплитуд соответствует распределению Релея. В связи с этим рисунки Е.2 или Е.3 могут быть использованы непосредственно для определения числа эквивалентных циклов пикового напряжения при конкретной фильтрованной частоте и продолжительности. Однако при таком типе возбуждающего сигнала гарантирована вероятностная усталость при условии обеспечения посто-

янства сигнала. В таком случае устанавливать число эквивалентных циклов пиковых напряжений не обязательно, если показано, что соответствующее постоянство сигнала существует. Несмотря на это, процедуру подсчета эквивалентных циклов пикового напряжения допускается использовать в качестве способа контроля постоянства волновых колебаний.

Приложение F
(справочное)

Статистически независимые колебания

Известно, что три ортогональных составляющих сейсмических колебаний (две горизонтальных и одна вертикальная) можно считать статистически независимыми, если их измеряют на расстоянии от эпицентра. Таким образом, искусственно генерируемые меняющиеся во времени колебания, используемые в качестве модели многоосевых колебаний при анализе или испытании, должны обладать аналогичной степенью статистической независимости. Это можно верифицировать, используя функцию когерентности или функцию коэффициента корреляции.

Под когерентностью в данном случае понимают отношение возведенной в квадрат величины взаимной спектральной плотности к произведению двух спектральных плотностей мощности двух временных зависимостей со сравнимой степенью независимости. Таким образом, когерентность является также функцией частоты, принимающей нулевое значение для совершенно независимых сигналов и значение +1,0 — для совершенно зависимых сигналов. Когерентность двух регистрируемых сигналов, воздействующих одновременно, может быть рассчитана разделением их на множество сегментов (выборки данных), вычислением когерентности для каждой соответствующей пары сегментов и нахождением среднего результата. Значения полученной таким образом функции когерентности очень сильно зависят от числа используемых временных сегментов и их продолжительности. Сильные колебания одного смоделированного сейсмического события требуемой минимальной продолжительностью 15 с могут быть для удобства разделены как минимум на 12 таких сегментов. Так можно получить график, максимальное значение на котором будет менее 0,5 для достаточной статистической независимости.

Для временных зависимостей, чье среднее значение равно нулю, коэффициент корреляции в данном случае определяют как отношение функции взаимной корреляции к произведению среднеквадратических значений двух сигналов со сравнимой степенью независимости. Таким образом, корреляция является функцией задержки по времени (или временного сдвига) между двумя сигналами и имеет нулевое значение для независимых сигналов, стремясь к значению +1,0 для зависимых сигналов. Вычисление коэффициента корреляции обычно выполняют для задержек по времени до завершения сильных колебаний. Для сигналов с достаточной статистической независимостью абсолютное значение данной функции составляет менее 0,3.

Ортогональные компоненты колебаний внутри конструкций пола могут быть или не быть статистически независимыми, в зависимости от наличия в здании перекрестных соединений. В этих случаях степень независимости колебаний может изменяться с переменой частоты.

Приложение G
(справочное)

Блок-схемы, иллюстрирующие процедуры квалификации на сейсмостойкость

G.1 Общие положения

В настоящем приложении наглядно показаны структура и программа процесса квалификации оборудования на сейсмостойкость. Стандарт предусматривает следующие методы квалификации:

- испытания;
- анализ;
- сочетание анализа и испытаний, квалификация на основе сходства или на основе опыта.

Основанием для решения о возможности замены испытаний анализом является качественная оценка динамических характеристик и сложности оборудования и устройств.

На блок-схемах показаны различные шаги процесса квалификации.

G.2 Определение сейсмических условий и критериев приемлемости

Независимо от метода квалификации по критерию сейсмостойкости необходимо установить сейсмические условия и критерии приемлемости. Эта процедура, в том числе выбор метода квалификации, показана на рисунке G.1.

G.3 Квалификация методом испытаний

Шаги по выработке детальной спецификации испытаний и выполнению испытаний, описанных в разделе 8, представлены на рисунке G.2.

G.4 Квалификация методом анализа

Шаги и особенности квалификации методом анализа, описанном в разделе 11, представлены на рисунке G.3.

G.5 Квалификация методом сочетания анализа и испытаний

Для некоторых типов оборудования устанавливают процедуру квалификации, сочетая конструктивный анализ сборок и испытания устройств, как описано в разделе 12. Методы испытаний могут быть применены для экспериментального определения динамических свойств всей сборки, которую можно подразделить на субкомпоненты (как показано на рисунке G.2). Затем квалификацию осуществляют отдельно для каждого субкомпонента, при условии, что для каждого определено место воздействия входного сигнала. Обычно некоторые субкомпоненты требуют испытаний на вибростенде, в то время как остальные можно квалифицировать методом анализа (как показано на рисунке G.3).

Квалификация всех субкомпонентов определяет квалификацию целого узла (оборудования). Различные шаги и особенности представлены на рисунке G.4.

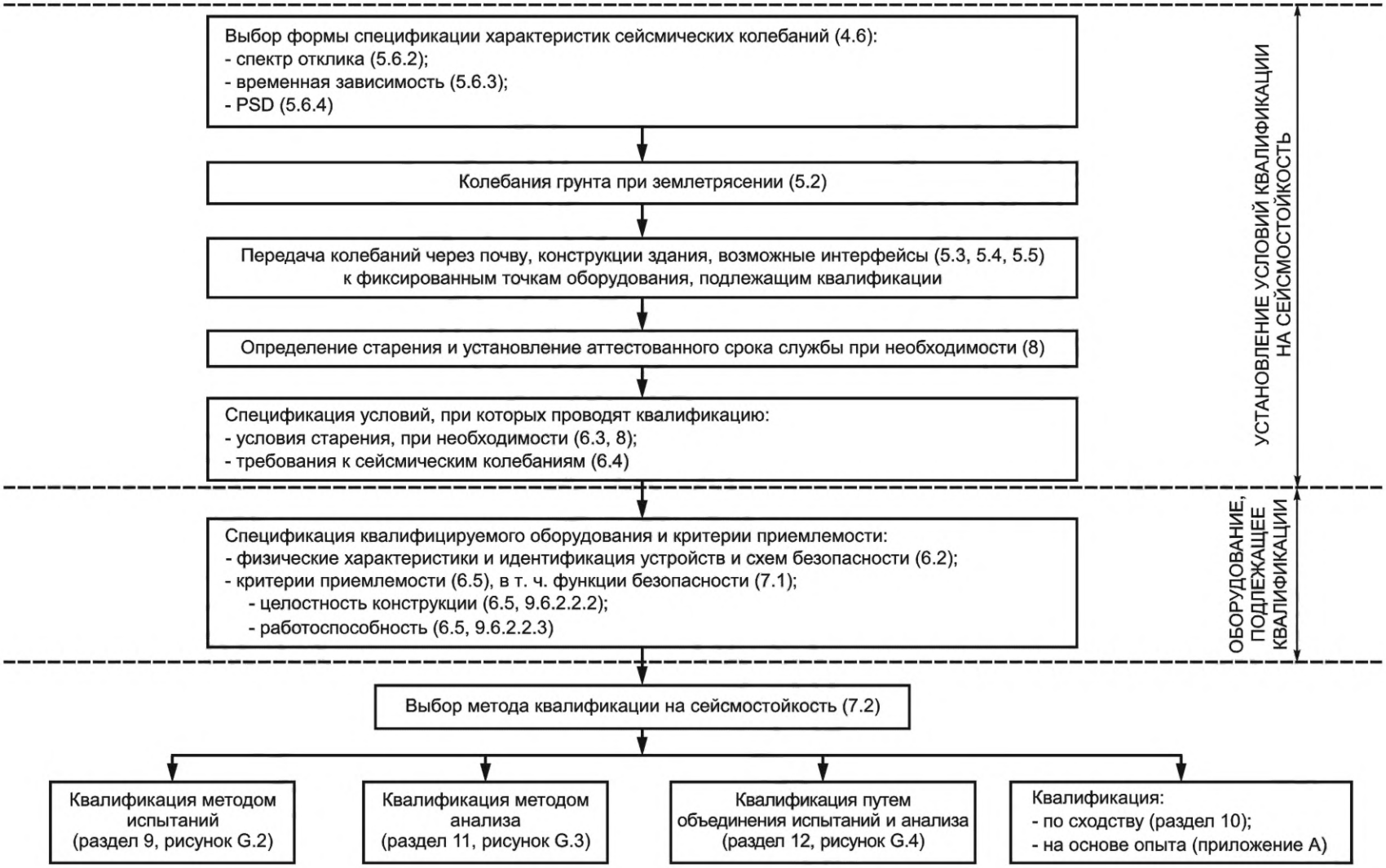


Рисунок G.1 — Блок-схема процедуры квалификации на сейсмостойкость

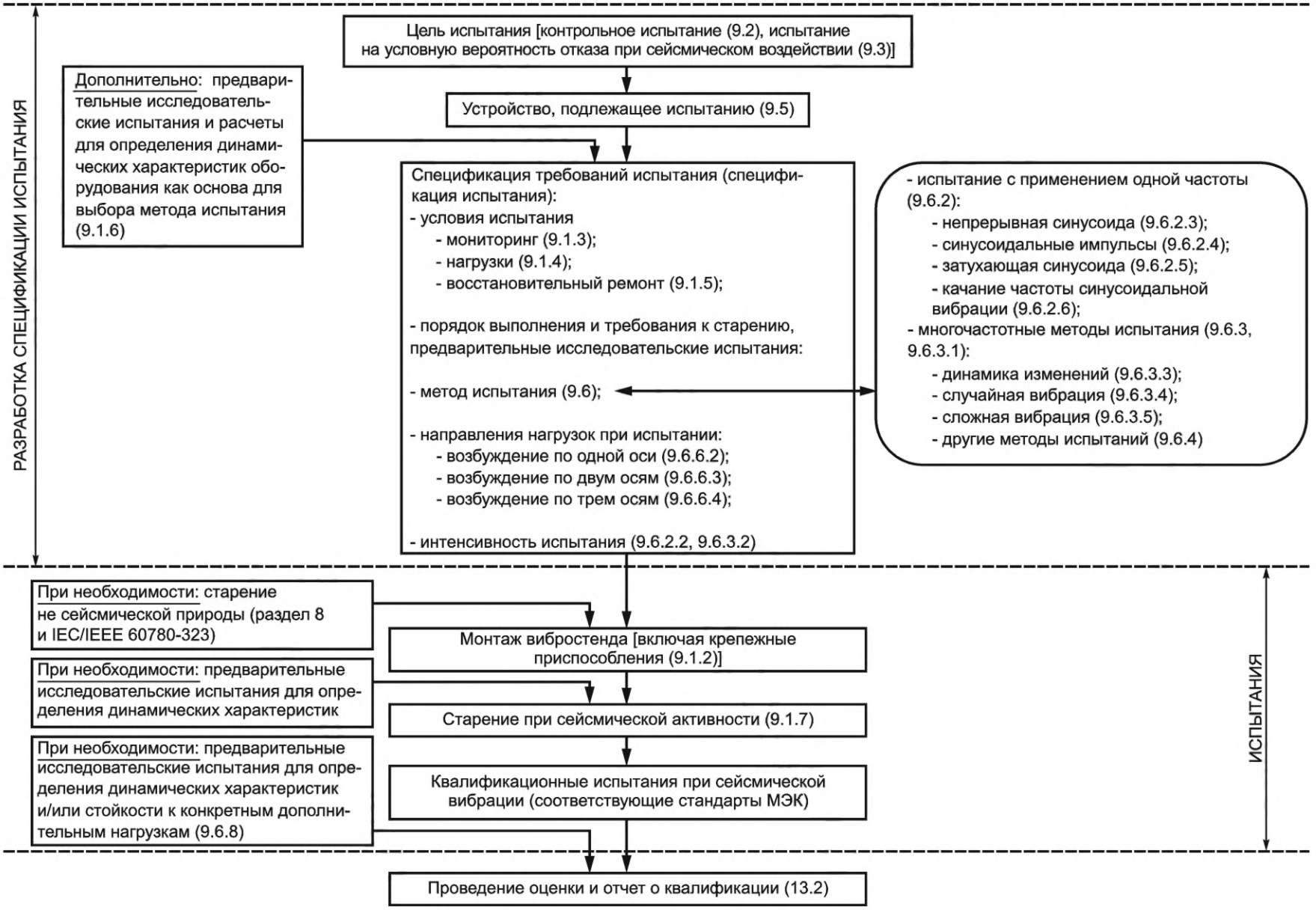


Рисунок G.2 — Блок-схема процедуры квалификации на сейсмостойкость методом испытаний

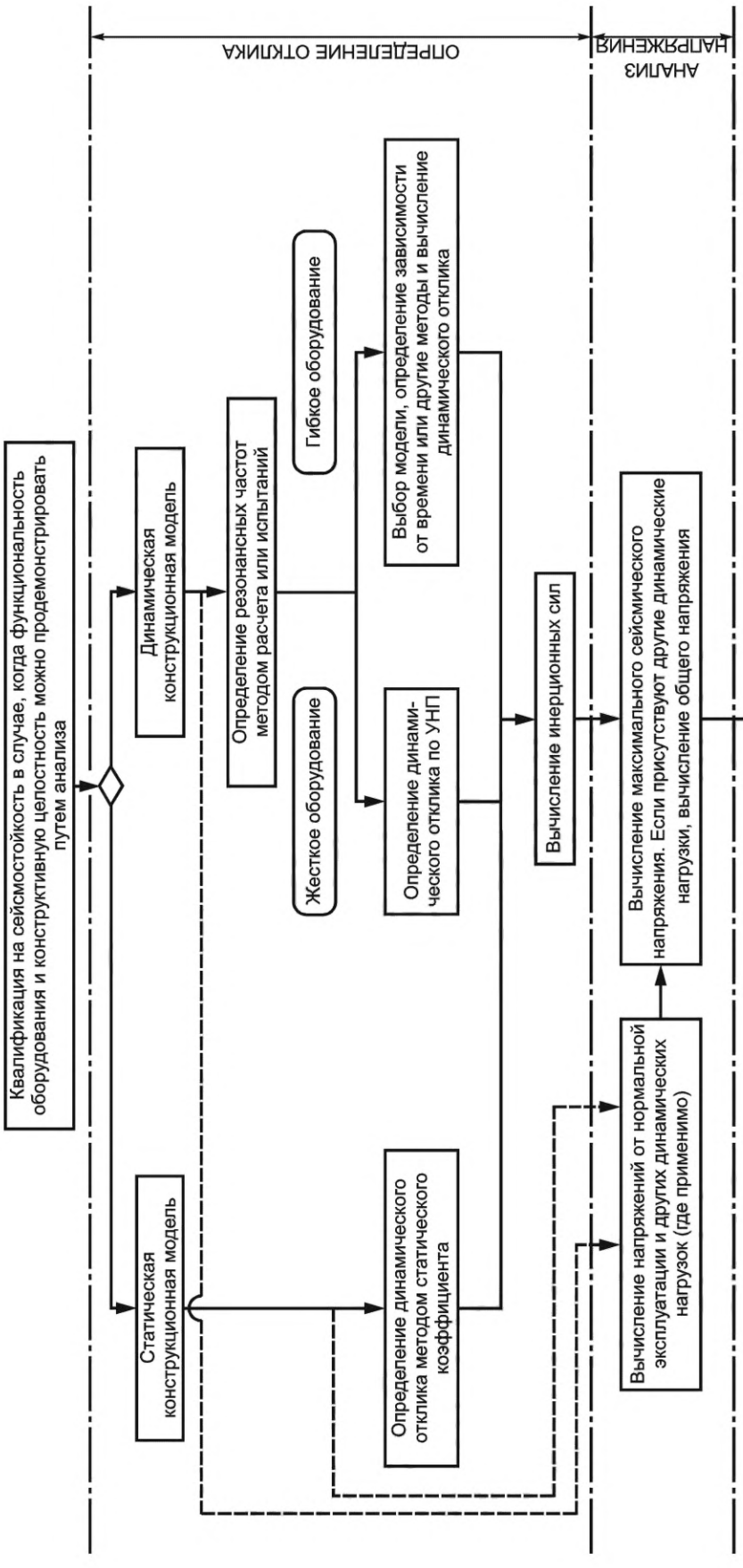


Рисунок G.3 — Блок-схема процедуры квалификации на сейсмостойкость методом анализа

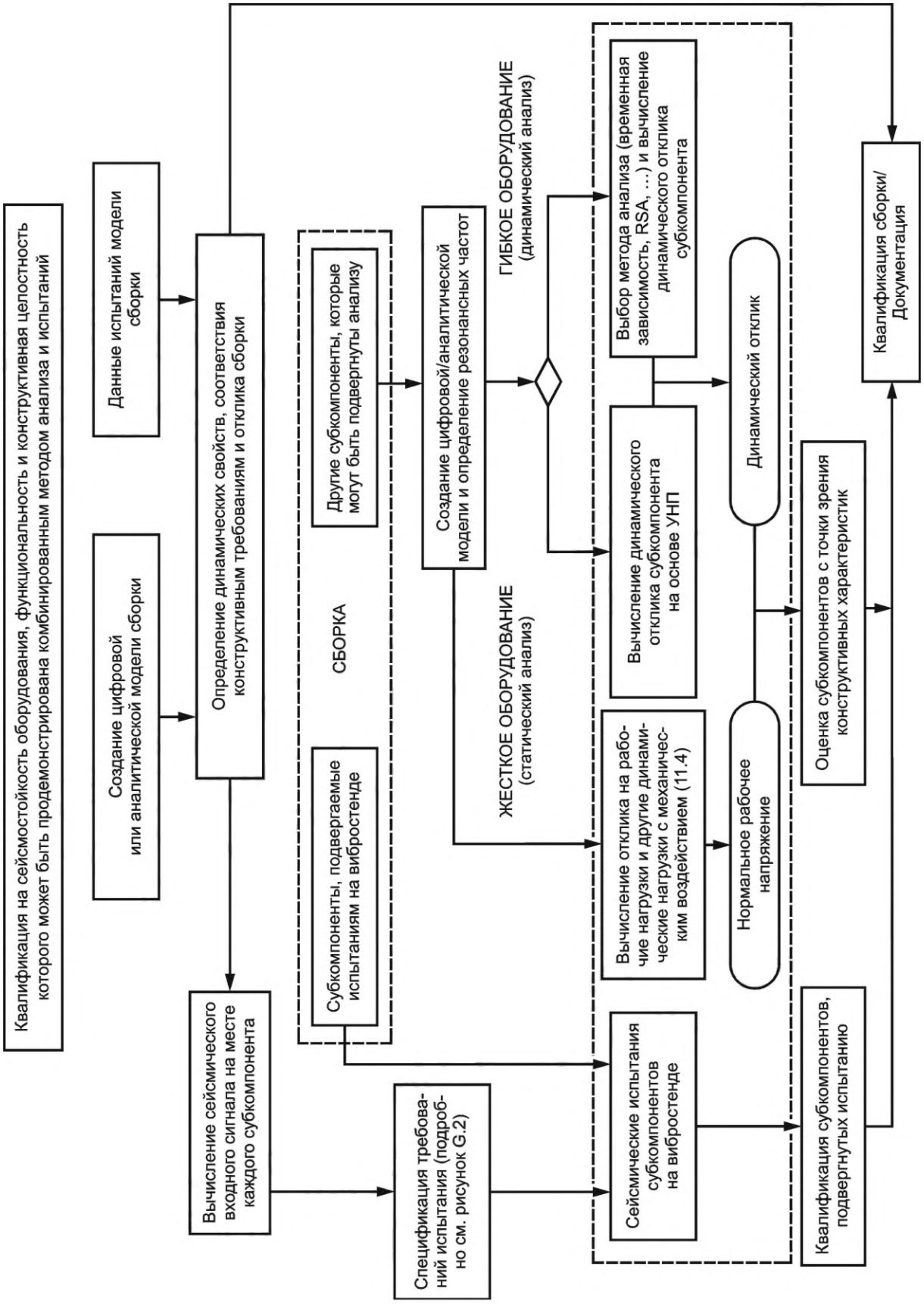


Рисунок G.4 — Блок-схема процедуры квалификации на сейсмостойкость комбинированным методом анализа и испытаний

Приложение ДА
(справочное)

Дополнительная информация к термину «ускорение нулевого периода»

Согласно ГОСТ IEC 60068-2-57—2016, пункт 3.27:

ускорение нулевого периода (zero period acceleration): Значение ускорения, к которому асимптотически стремится кривая спектра отклика в области высоких частот (см. рисунок ДА.1).

Примечание — Данный термин важен с практической точки зрения, поскольку ускорение нулевого периода представляет собой пиковое значение (например, ускорения) возбуждения. Не следует путать его с пиковым значением ускорения в спектре отклика.

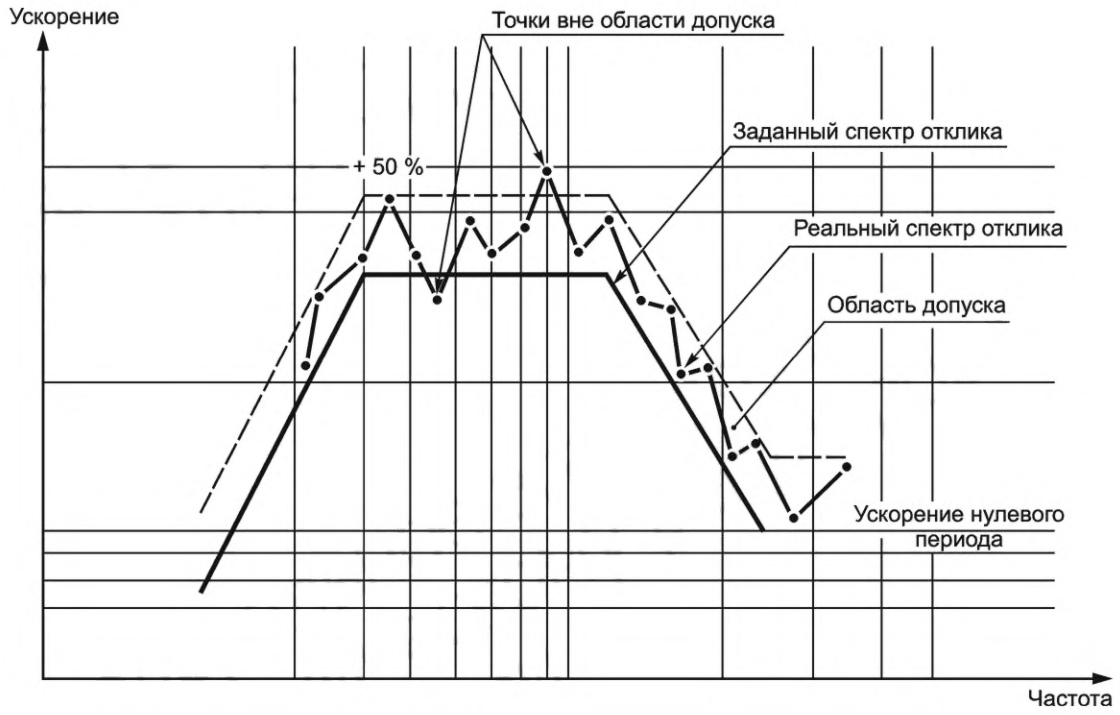


Рисунок ДА.1 — Типичные графики заданного спектра отклика, реального спектра отклика и допуска на сигнал

Приложение ДБ
(справочное)

Сведения о соответствии ссылочных международных стандартов национальным стандартам

Таблица ДБ.1

Обозначение ссылочного международного стандарта	Степень соответствия	Обозначение и наименование соответствующего национального стандарта
IEC 60068-2-6	—	*
IEC/IEEE 60780-323	—	*
IEEE Std 382™	—	*
* Соответствующий национальный стандарт отсутствует. До его принятия рекомендуется использовать перевод на русский язык данного международного стандарта.		

Библиография

[1] ASCE: ASCE-4, Seismic Analysis of Safety-Related Nuclear Structures and Commentary[1)]

[2] United States Nuclear Regulatory Commission (U.S. NRC), Regulatory Guide 1.92, Revision 3, Combining Modal Responses and Spatial Components in Seismic Response Analysis, 2012[2)]

[3] ASME: QME-1, Seismic Qualification of Active Mechanical Equipment Used in Nuclear Facilities, 2017[3)]

[4] IAEA, Safety Guide NS-G-1,6, Seismic design and Qualification for Nuclear Power Plants, Section 4 to 6, 2003[4)]

[5] IEC 60068-3-3, Environmental testing — Part 3-3: Supporting documentation and guidance — Seismic test methods for equipment

[6] IEC 60068-2-81, Environmental testing — Part 2-81: Tests — Test Ei: Shock — Shock response spectrum synthesis

[7] ISO 18431-4:2007, Mechanical vibration and shock — Signal processing — Part 4: Shock-response spectrum analysis

[8] MIL-S-901D-1989, Requirements for Shock Tests, H. I. (High-Impact); Shipboard Machinery, Equipment and Systems[5)]

[9] IEC 60068-2-47, Environmental testing — Part 2-47: Test — Mounting of specimens for vibration, impact and similar dynamic tests

[10] IEC 60068-2-57, Environmental testing — Part 2-57: Tests — Test Ff: Vibration — Time-history and sine-beat method

[11] IAEA Safety Glossary, 2018

---

1) Стандарты Американского общества гражданских инженеров (ASCE) доступны на gost.e-ecolog.ru

2) Публикация доступна на gost.e-ecolog.ru

3) Стандарты Американского общества инженеров-механиков (ASME) доступны на gost.e-ecolog.ru

4) Публикации МАГАТЭ доступны на веб-сайте МАГАТЭ (gost.e-ecolog.ru Pub1158_web.pdf).

5) Публикации по MIL-тестированию доступны на сайте Министерства обороны США (gost.e-ecolog.ru gov/).

УДК 621.311.3.049.75:006.354 ОКС 27.120.20

Ключевые слова: атомные станции, сейсмостойкость, сейсмическая квалификация оборудования, методы квалификации на сейсмостойкость, квалификация на сейсмостойкость методом испытаний, квалификация на сейсмостойкость методом анализа, квалификация на сейсмостойкость по сходству, квалификация на сейсмостойкость на основе опыта, проектное землетрясение, максимальное расчетное землетрясение, моделирование сейсмических колебаний, спектр отклика, демпфирование, вибрационное старение

Редактор *З.А. Лиманская*
Технический редактор *И.Е. Черепкова*
Корректор *И.А. Королева*
Компьютерная верстка *Е.А. Кондрашовой*

Сдано в набор 20.09.2023. Подписано в печать 28.09.2023. Формат 60×84⅛. Гарнитура Ариал.
Усл. печ. л. 9,30. Уч.-изд. л. 8,37.

Подготовлено на основе электронной версии, предоставленной разработчиком стандарта

Создано в единичном исполнении в ФГБУ «Институт стандартизации»
для комплектования Федерального информационного фонда стандартов,
117418
gost.e-ecolog.ru gost.e-ecolog.ru