ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО

ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ГОСТ Р 71836— 2024

МЕТОДЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И ВИРТУАЛИЗАЦИИ ИСПЫТАНИЙ ЭЛЕКТРОННОЙ КОМПОНЕНТНОЙ БАЗЫ И ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ

Издание официальное

Москва
Российский институт стандартизации
2024

gost.e-ecolog.ru

Предисловие

1 РАЗРАБОТАН Обществом с ограниченной ответственностью «Научно-исследовательский институт «АСОНИКА» (ООО «НИИ «АСОНИКА») и Федеральным государственным бюджетным учреждением «Российский институт стандартизации» (ФГБУ «Институт стандартизации»)

2 ВНЕСЕН Техническим комитетом по стандартизации ТК 165 «Системы автоматизированного проектирования электроники»

3 УТВЕРЖДЕН И ВВЕДЕН В ДЕЙСТВИЕ Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 28 ноября 2024 г. № 1788-ст

4 ВВЕДЕН ВПЕРВЫЕ

*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

© Оформление. ФГБУ «Институт стандартизации», 2024

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, определения и сокращения 2
4 Общие положения 3
5 Метод математического моделирования и виртуализации испытаний ЭКБ и ЭА на отсутствие резонансных частот в заданном диапазоне 4
6 Метод математического моделирования и виртуализации испытаний ЭКБ и ЭА на воздействие статических нагрузок (гравитации, давления, распределения температур) 8
7 Метод математического моделирования и виртуализации испытаний ЭКБ и ЭА на виброустойчивость и вибропрочность воздействием синусоидальной или случайной широкополосной вибрации 11
8 Метод математического моделирования и виртуализации испытаний ЭКБ и ЭА на ударную устойчивость и ударную прочность при воздействии одиночного и многократного механического удара 14
9 Метод математического моделирования и виртуализации испытаний ЭКБ и ЭА на воздействие линейного ускорения 18
10 Метод математического моделирования и виртуализации испытаний ЭКБ и ЭА на воздействие акустического шума 19
Приложение А (рекомендуемое) Методика подготовки 3D-модели в CAD-системе для последующего моделирования 22
Приложение Б (рекомендуемое) Методика идентификации физико-механических параметров материалов ЭКБ и ЭА и параметров виброизоляторов 28
Приложение В (справочное) Пример идентификации физико-механических параметров материалов ЭКБ и ЭА 31
Приложение Г (справочное) Пример идентификации параметров виброизоляторов в подсистеме АСОНИКА-В 38
Приложение Д (справочное) Примеры моделирования механических процессов в ЭКБ и ЭА с помощью системы АСОНИКА 41
Приложение Е (справочное) Информация о системе АСОНИКА 50
Библиография 51

Введение

Причиной разработки стандарта является необходимость моделирования электронной компонентной базы (ЭКБ) и электронной аппаратуры (ЭА) на ранних этапах проектирования для снижения затрат на разработку, производство и обслуживание за счет повышения качества разработок. Стандарт является рекомендуемым методическим и не обязывает к применению системы автоматизированного проектирования (САПР), приводимой в качестве примера в настоящем стандарте. Применение стандарта при проектировании РЭА на основе ЭКБ отечественного производства (ЭКБ ОП) возможно только для ЭКБ, которая снабжена стандартизованными моделями для применения в САПР.

Стандарт распространяется на ЭКБ и ЭА. Его целью является применение математического моделирования и виртуальных испытаний ЭКБ и ЭА на механические воздействия на ранних этапах проектирования, снижение затрат на разработку, производство и обслуживание за счет повышения качества разработок.

Применение математического моделирования и виртуальных испытаний ЭКБ и ЭА на механические воздействия на ранних этапах проектирования до изготовления опытного образца позволит избежать отказов ЭКБ и ЭА или их значительно сократить на этапе испытаний опытного образца, сокращая тем самым количество испытаний опытного образца, возможные итерации по доработке схем и конструкций, затраты на разработку ЭКБ и ЭА при одновременном повышении качества и надежности, в том числе в критических режимах работы, делая ЭКБ и ЭА конкурентоспособными на отечественном и международном рынке (ГОСТ Р 70201 и [1]—[4]).

Использование только натурных испытаний ЭКБ и ЭА на внешние воздействующие факторы (ВВФ) без применения моделирования малоинформативно и неэффективно, так как на этапе проектирования не отслеживается большинство возможных отказов ЭКБ и ЭА; при испытаниях не проверяются критические режимы (либо это технически невозможно, либо дорого из-за возможных отказов испытуемых ЭКБ и ЭА); из-за недоработок проектирования ЭКБ и ЭА, вскрытых путем испытаний, возможно множество итераций: доработка проекта — испытания опытного образца — доработка проекта и так далее, что значительно увеличивает сроки и стоимость разработки; при натурных испытаниях практически невозможно воспроизвести комплексные (одновременно действующие) воздействия; невозможно установить датчики во всех точках конструкции ЭКБ и ЭА и контролировать их поведение, выбор контрольных точек при испытаниях субъективен и опирается в основном на опыт и интуицию.

Настоящий стандарт определяет методы математического моделирования и виртуализации испытаний электронной компонентной базы и электронной аппаратуры на механические воздействия при проектировании.

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

МЕТОДЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И ВИРТУАЛИЗАЦИИ ИСПЫТАНИЙ ЭЛЕКТРОННОЙ КОМПОНЕНТНОЙ БАЗЫ И ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ

Methods of mathematical modeling and virtualization of testing of electronic component base and electronic equipment for mechanical effects during design

Дата введения — 2024—12—01

1 Область применения

1.1 Настоящий стандарт предназначен для применения предприятиями промышленности и организациями при использовании цифровых двойников на ранних этапах проектирования, изготовления и испытаний ЭКБ и ЭА, а также на всех последующих этапах жизненного цикла (ЖЦ) ЭКБ и ЭА.

1.2 На ЭКБ и ЭА оказывают влияние механические воздействия — синусоидальная (гармоническая) вибрация, случайная вибрация, одиночный механический удар, многократный механический удар, линейное ускорение, акустический шум, статические (т. е. постоянные во времени) нагрузки, которые в общем случае могут быть вызваны разностью давления, статической инерционной нагрузкой под действием собственного веса (гравитацией), распределением температур (тепловым расширением), одновременным воздействием всех вышеперечисленных факторов.

Механические воздействия могут приводить к нарушению прочности и устойчивости ЭКБ и ЭА. Настоящий стандарт определяет методы, позволяющие моделировать и проводить виртуальные испытания ЭКБ и ЭА при механических воздействиях с целью обеспечения их устойчивости и прочности.

1.3 Требования настоящего стандарта не распространяются на рассмотрение всех проблем проектирования и обеспечения надежности изделий.

2 Нормативные ссылки

В настоящем стандарте использованы нормативные ссылки на следующие стандарты:

ГОСТ 4.403 Система показателей качества продукции. Машины и приборы для определения механических свойств материалов. Номенклатура показателей

ГОСТ 23.205 Обеспечение износостойкости изделий. Ускоренные ресурсные испытания с периодическим форсированием режима

ГОСТ 25.504 Расчеты и испытания на прочность. Методы расчета характеристик сопротивления усталости

ГОСТ 25.507 Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы испытания на усталость при эксплуатационных режимах нагружения. Общие требования

ГОСТ 16962 Изделия электронной техники и электротехники. Механические и климатические воздействия. Требования и методы испытаний

ГОСТ 17516 Изделия электротехнические. Условия эксплуатации в части воздействия механических факторов внешней среды

ГОСТ 17516.1 Изделия электротехнические. Общие требования в части стойкости к механическим внешним воздействующим факторам

ГОСТ 21964 Внешние воздействующие факторы. Номенклатура и характеристики

ГОСТ 27609 Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Основные положения и требования к проведению и нормативно-техническому обеспечению

ГОСТ 30630.0.0 Методы испытаний на стойкость к внешним воздействующим факторам машин, приборов и других технических изделий. Общие требования

Издание официальное

ГОСТ 30630.1.5 Методы испытаний на стойкость к механическим внешним воздействующим факторам машин, приборов и других технических изделий. Испытания на воздействие акустического шума (вибрация, акустическая составляющая)

ГОСТ 30630.1.9 Методы испытаний на стойкость к механическим внешним воздействующим факторам машин, приборов и других технических изделий. Особенности цифрового управления испытаниями на воздействие широкополосной случайной вибрации

ГОСТ 30630.1.10 Методы испытаний на стойкость к механическим внешним воздействующим факторам машин, приборов и других технических изделий. Удары по оболочке изделия

ГОСТ 30631 Общие требования к машинам, приборам и другим техническим изделиям в части стойкости к механическим внешним воздействующим факторам при эксплуатации

ГОСТ Р 51805 Методы испытаний на стойкость к механическим внешним воздействующим факторам машин, приборов и других технических изделий. Испытания на воздействие линейного ускорения

ГОСТ Р 57188 Численное моделирование физических процессов. Термины и определения

ГОСТ Р 70201 Системы автоматизированного проектирования электроники. Оптимальное сочетание натурных и виртуальных испытаний электроники на надежность и внешние воздействующие факторы. Требования и порядок проведения при выполнении технического задания на НИОКР

Примечание — При пользовании настоящим стандартом целесообразно проверить действие ссылочных стандартов в информационной системе общего пользования — на официальном сайте Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии в сети Интернет или по ежегодному информационному указателю «Национальные стандарты», который опубликован по состоянию на 1 января текущего года, и по выпускам ежемесячного информационного указателя «Национальные стандарты» за текущий год. Если заменен ссылочный стандарт, на который дана недатированная ссылка, то рекомендуется использовать действующую версию этого стандарта с учетом всех внесенных в данную версию изменений. Если заменен ссылочный стандарт, на который дана датированная ссылка, то рекомендуется использовать версию этого стандарта с указанным выше годом утверждения (принятия). Если после утверждения настоящего стандарта в ссылочный стандарт, на который дана датированная ссылка, внесено изменение, затрагивающее положение, на которое дана ссылка, то это положение рекомендуется применять без учета данного изменения. Если ссылочный стандарт отменен без замены, то положение, в котором дана ссылка на него, рекомендуется применять в части, не затрагивающей эту ссылку.

3 Термины, определения и сокращения

3.1 Термины и определения

В настоящем стандарте применены термины по ГОСТ 21964, а также следующие термины с соответствующими определениями:

3.1.1 **вибрация:** Движение точки или механической системы, при котором происходят колебания характеризующих его скалярных величин.

3.1.2 **синусоидальная (гармоническая) вибрация:** Колебания, при которых значения колеблющейся величины (характеризующей вибрацию) изменяются во времени по закону:

$$z(t) = A \sin(\omega t + \varphi),$$

где t — время;

A, ω, φ — постоянные параметры (A — амплитуда; $\omega t + \varphi$ — фаза; φ — начальная фаза; ω — угловая частота).

3.1.3 **случайная вибрация:** Колебания, представляющие собой случайный колебательный процесс, при котором колеблющиеся точки могут совершать нерегулярные и неповторяющиеся циклы движения в пространстве.

3.1.4 **удар:** Движение, при котором имеет место взаимодействие движущихся тел, сопровождающееся частичным или полным переходом кинетической энергии соударяющихся тел в потенциальную энергию упругой деформации и в так называемую внутреннюю энергию тел, увеличение которой приводит к нагреву.

Примечание — Механический удар может быть одиночного и многократного действия.

3.1.5 **линейные ускорения:** Ускорения, возникающие при движении наземных транспортных средств в летательных аппаратах, во вращающихся деталях механизмов, в ракетах и снарядах — во всех движущихся объектах.

Примечание — Линейные ускорения могут возникать при прямолинейном, криволинейном и вращательном движениях.

3.1.6 **акустический шум:** Беспорядочные механические колебания, амплитуды и фазы которых изменяются во времени.

Примечание — Эти колебания распространяются в газообразной, жидкой и твердой средах.

3.2 Сокращения

В настоящем стандарте применены следующие сокращения:

ВВФ — внешние воздействующие факторы;
КМП — коэффициент механических потерь;
ПЭВМ — персональная электронная вычислительная машина;
СПУ — спектральная плотность ускорения;
ТЗ — техническое задание;
ТУ — техническое условие;
ЭА — электронная аппаратура;
ЭВМ — электронная вычислительная машина;
ЭКБ — электронная компонентная база.

4 Общие положения

4.1 Целью настоящего стандарта является оказание методической помощи предприятиям промышленности и организациям в применении моделирования и виртуализации испытаний ЭКБ и ЭА на механические воздействия на ранних этапах проектирования до изготовления опытного образца (ГОСТ 30630.0.0, ГОСТ 17516.1, ГОСТ 17516, ГОСТ 30631, ГОСТ 16962, ГОСТ 4.403, ГОСТ 23.205, ГОСТ 27609).

Для достижения поставленной цели в стандарте решены следующие задачи (ГОСТ Р 70201 и [1]—[4]):

разработаны методы, позволяющие моделировать и проводить виртуальные испытания ЭКБ и ЭА при механических воздействиях с целью обеспечения их устойчивости и прочности (ГОСТ Р 57188);

предложено программное обеспечение для математического моделирования и виртуализации испытаний ЭКБ и ЭА на механические воздействия при проектировании на основе применения ПЭВМ;

установлен порядок применения данных методов и программного обеспечения на стадиях проектирования и изготовления, а также удостоверения заказчика в том, что на стадиях конструирования и производства выполнены оценки возможных вариантов конструктивного исполнения ЭКБ и ЭА с точки зрения достижения заданных ТЗ эксплуатационных характеристик.

4.2 Организация работ по применению методов математического моделирования и виртуализации испытаний ЭКБ и ЭА на механические воздействия при проектировании

4.2.1 Методы математического моделирования и виртуализации испытаний ЭКБ и ЭА на механические воздействия предназначены для использования подразделениями предприятий, на которые возложены соответствующие задачи.

4.2.2 Оценка стойкости ЭКБ и ЭА к механическим воздействиям может быть произведена на основе методов математического моделирования и виртуализации испытаний ЭКБ и ЭА на механические воздействия с использованием ПЭВМ и специализированного программного обеспечения.

4.3 Замена испытаний ЭКБ и ЭА компьютерным моделированием на внешние механические воздействия еще до изготовления является значительной экономией денежных средств и сокращением сроков создания ЭКБ и ЭА при одновременном повышении качества и надежности за счет сокращения количества испытаний.

4.4 Стандарт устанавливает принципы применения математического моделирования изделий в процессе их проектирования с целью анализа и оптимизации принимаемых конструктивно-технологических решений, а также с целью своевременного выявления возможных несоответствий разрабатываемого образца изделия требованиям ТЗ. Включенные в настоящий стандарт принципы применения математического моделирования (и реализующие их системы автоматизированного проектирования) изложены применительно к решению задачи обеспечения стойкости ЭКБ и ЭА к воздействию механических факторов.

4.5 Рекомендации и методы, приведенные в настоящем стандарте, должны использоваться специалистами разработчиками ЭКБ и ЭА в процессе проектирования с целью выбора и предварительной оценки эффективности конструкторских решений в части обеспечения требований стойкости к воздействию механических факторов, а также с целью оптимизации программ испытаний опытных и серийных образцов ЭКБ и ЭА.

5 Метод математического моделирования и виртуализации испытаний ЭКБ и ЭА на отсутствие резонансных частот в заданном диапазоне

5.1 Цель испытаний

Конечной целью испытаний является исключение резонансных частот в заданном диапазоне с применением моделирования механических процессов в ЭКБ и ЭА.

Испытания на обнаружение резонансных частот проводят:

- для определения соответствия требованиям ГОСТ 16962, согласно которым ЭКБ и ЭА без виброизоляторов и их отдельные узлы и детали с различной степенью жесткости (I, II, III) не должны иметь резонансных частот соответственно в следующих диапазонах: до 25, до 40, до 100 Гц;
- определения отсутствия или наличия резонансных частот в ЭА, установленной на виброизоляторах, в диапазоне до 25 Гц;
- определения возможности проведения ускоренных испытаний на вибропрочность и выбора метода этих испытаний;
- получения сведений о резонансных частотах при необходимости включения этих сведений в документы по применению или в справочники.

Испытания на обнаружение резонансных частот проводят с целью проверки способности ЭКБ и ЭА выполнять свои функции и сохранять свои параметры в пределах значений, указанных в стандартах и планах испытаний, в требуемом диапазоне частот с соответствующими перегрузками.

5.2 Общие положения

5.2.1 Резонансными частотами ЭКБ и ЭА считаются частоты, при которых амплитудное значение виброперемещения или виброускорения каких-либо точек ЭКБ и ЭА превышает в два или более раз амплитудное значение виброперемещения или виброускорения точек крепления ЭКБ и ЭА к столу вибратора.

5.2.2 Отдельные ЭКБ и ЭА, элементы и сборочные единицы ЭКБ и ЭА подвергаются испытанию на обнаружение резонанса в трех взаимно перпендикулярных направлениях в требуемом частотном диапазоне и при двукратной перегрузке.

5.2.3 При определении резонансных частот ЭКБ и ЭА подвергаются воздействию гармонической вибрации при пониженных ускорениях, не превышающих 2 g, в диапазоне частот 10 … 150 Гц. Резонансные частоты регистрируются и составляется их спектр.

5.2.4 Метод испытаний

Поиск резонансных частот проводят путем плавного изменения частоты при поддержании постоянного ускорения. Скорость изменения частоты при этом должна быть такой, чтобы обеспечить возможность обнаружения и регистрации резонансов, но не более чем октава в минуту (октавой считается диапазон частот, у которого отношение высшей частоты к низшей равно двум).

5.3 Оцениваемые характеристики и расчетные соотношения

5.3.1 Оцениваемыми характеристиками являются резонансные частоты ЭКБ и ЭА.

5.3.2 Для определения резонансных частот в ЭКБ и ЭА проводится конечно-элементный анализ. Система уравнений движения конструкции ЭКБ и ЭА выглядит следующим образом:

$$[M]\{\ddot{r}\}+[C]\{\dot{r}\}+[K]\{r\}=\{F\},$$

где $\{r\}$ — вектор узловых перемещений;

$[M]$, $[C]$, $[K]$ — матрицы масс, вязкого демпфирования и жесткости соответственно;

$\{F\}$ — вектор внешних воздействий.

5.3.3 Для определения резонансных частот в ЭА, установленной на виброизоляторах, используется система дифференциальных уравнений движения на основе уравнения Лагранжа. Для системы с шестью степенями свободы их записывают в следующем виде:

$$d\left(\partial T/\partial \dot{q}_i\right)/dt - \partial T/\partial q_i + \partial \Pi/\partial q_i = Q_i(t), \quad i = 1, 2, ..., 6,$$

где q_i — i-я обобщенная координата;

$\dot{q}_i$ — i-я обобщенная скорость;

T — кинетическая энергия системы;

Π — потенциальная энергия системы;

$Q_i(t)$ — обобщенная сила, действующая по направлению i-й обобщенной координаты.

5.4 Условия, режимы, порядок, место проведения, виды и этапы испытаний

5.4.1 Условия проведения испытаний

5.4.1.1 Наличие российского программного обеспечения, предназначенного для моделирования ЭКБ и ЭА на воздействие гармонической вибрации, внедренного на ведущих предприятиях Российской Федерации.

5.4.1.2 Наличие корректной 3D-модели ЭКБ и ЭА, отвечающей требованиям, которые приведены в приложении А.

5.4.1.3 Наличие следующих физико-механических параметров материалов ЭКБ и ЭА:

- плотность;
- модуль упругости;
- коэффициент Пуассона;
- коэффициент механических потерь (КМП) для линейного участка зависимости КМП от напряжения изгиба σ_u при $\sigma_u = 0$;
- коэффициент зависимости КМП от напряжения.

Зависимость КМП от напряжения изгиба σ_u на линейном участке имеет вид

$$\gamma = \gamma_0 + k_\sigma \sigma_u,$$

где γ_0 — КМП для линейного участка при $\sigma_u = 0$;

k_σ — коэффициент зависимости КМП от напряжения.

Взаимосвязь тепловых и механических процессов в конструкциях ЭКБ и ЭА обусловлена влиянием тепловых процессов на механические — температурными зависимостями физико-механических параметров — модуля упругости E и КМП γ — для материалов конструкций ЭКБ и ЭА.

С ростом температуры модуль упругости уменьшается, а КМП увеличивается. Зависимости E и γ от температуры могут аппроксимироваться линейными полиномами. Уравнение прямой для зависимости модуля упругости от температуры в этом случае имеет вид

$$E = E^{20} - K_E (T - 20),$$

где T — текущая температура;

E^{20} — модуль упругости при $T = 20$ °С;

K_E — коэффициент пропорциональности.

С изменением температуры меняется как γ_0 в зависимости от температуры, так и k_σ. Уравнения прямых для зависимостей γ_0 и k_σ от температуры имеют вид:

$$\gamma_0 = \gamma_0^{20} + K_\gamma (T - 20), \quad (1)$$

$$k_\sigma = k_\sigma^{20} + K_k (T - 20), \quad (2)$$

где γ_0^{20} — значение γ_0 при $T = 20$ °С;

k_σ^{20} — значение k_σ при $T = 20$ °С;

K_γ, K_k — коэффициенты пропорциональности.

Данные параметры могут быть получены путем идентификации. Методика идентификации физико-механических параметров материалов ЭКБ и ЭА приведена в приложении Б.

5.4.1.4 Наличие следующих параметров виброизоляторов:

- коэффициент жесткости по оси X;
- коэффициент жесткости по оси Y;
- коэффициент жесткости по оси Z;
- КМП по оси X для линейного участка зависимости КМП от напряжения изгиба σ_u при $\sigma_u = 0$;
- КМП по оси Y для линейного участка зависимости КМП от напряжения изгиба σ_u при $\sigma_u = 0$;
- КМП по оси Z для линейного участка зависимости КМП от напряжения растяжения-сжатия $\sigma_{P\text{-}C}$ при $\sigma_{P\text{-}C} = 0$;
- коэффициент зависимости КМП по оси X от напряжения изгиба;
- коэффициент зависимости КМП по оси Y от напряжения изгиба;
- коэффициент зависимости КМП по оси Z от напряжения растяжения-сжатия.

Данные параметры могут быть получены путем идентификации. Методика идентификации параметров виброизоляторов приведена в приложении Б.

5.4.2 Режимы испытаний

Параметры гармонической вибрации:

- ускорение 1 g;
- диапазон частот 10 … 150 Гц.

5.4.3 Порядок проведения испытаний

5.4.3.1 Проводят идентификацию физико-механических параметров материалов ЭКБ и ЭА, указанных в 5.4.1.3, в случае их отсутствия. При этом по результатам натурных испытаний определяют зависимость ускорения от частоты гармонической вибрации в контрольной точке, которая используется при идентификации. Предварительно разрабатывают программу испытаний и изготавливают макеты пластин для испытаний. Пример идентификации с помощью российского программного обеспечения приведен в приложении В.

5.4.3.2 Проводят идентификацию параметров виброизоляторов, указанных в 5.4.1.4, в случае их отсутствия. При этом по результатам натурных испытаний определяют зависимость ускорения от частоты гармонической вибрации системы виброизоляции, которая используется при идентификации. Предварительно разрабатывают программу испытаний и приобретают образцы виброизоляторов для испытаний. Пример идентификации с помощью российского программного обеспечения приведен в приложении Г.

5.4.3.3 Идентифицированные параметры материалов ЭКБ и ЭА и параметры виброизоляторов заносят в базу данных для использования в процессе моделирования.

5.4.3.4 Проводят подготовку моделей:

- 3D-моделей в формате STEP конструкций ЭКБ и ЭА без виброизоляторов в CAD-системах, отвечающих требованиям, которые приведены в приложении А;
- 3D-моделей конструкций ЭА, установленных на виброизоляторах, в специализированных интерфейсах.

5.4.3.5 Проводят импорт моделей в формате IGES или STEP конструкций в системе моделирования ЭКБ и ЭА на механические воздействия.

5.4.3.6 Проводят испытания на отсутствие резонансных частот в заданном диапазоне частот с применением моделирования механических процессов в ЭКБ и ЭА на воздействие гармонической вибрации с помощью российского программного обеспечения. Определяют зависимости ускорения от частоты гармонической вибрации в контрольных точках или в системах виброизоляции, по которым выявляют резонансные частоты. Примеры моделирования механических процессов в ЭКБ и ЭА с помощью российского программного обеспечения приведены в приложении Д.

5.4.3.7 По результатам испытаний составляют отчет, в котором дают информацию о наличии или отсутствии резонансных частот.

5.4.4 Место проведения испытаний

Испытания могут быть проведены:

- самим предприятием при наличии автоматизированной системы;
- Центром компетенций в области моделирования и виртуальных испытаний ЭКБ и ЭА на внешние воздействия по заказу предприятия в случае отсутствия у него автоматизированной системы.

5.5 Обработка, анализ и оценка результатов испытаний

5.5.1 Объем обрабатываемой информации

Используют малый объем выборки $n < 50$.

5.5.2 Методы статистической обработки результатов испытаний, принятые в методике

Вычисляют выборочные числовые характеристики при малом объеме выборки.

Выборочное среднее значение характеристики механических свойств

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^{n} x_i}{n},$$

где x_i — значение характеристики отдельных образцов;

n — число испытанных образцов (объем выборки).

Выборочная дисперсия характеристики механических свойств

$$s^2 = \frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2.$$

Выборочное среднее квадратическое отклонение определяют по формуле

$$s = \sqrt{s^2}.$$

5.5.3 Идентифицированные параметры определяют с учетом их разброса: среднее значение и среднее квадратическое отклонение. Для получения разброса необходимо провести идентификационные испытания 10 макетов пластин и 10 образцов виброизоляторов одного типа.

5.5.4 Резонансные частоты определяют с учетом разброса ускорений. Для каждой резонансной частоты, в случае ее наличия, определяют среднее значение и среднее квадратическое отклонение.

5.5.5 Делают выводы о наличии резонансных частот.

5.6 Материально-техническое обеспечение испытаний

5.6.1 На рабочих станциях пользователей должно быть установлено следующее прикладное программное обеспечение, отвечающее требованиям 5.4.1.1:

подсистема анализа и обеспечения стойкости ЭКБ и ЭА без виброизоляторов, 3D-модели которых созданы в CAD-системах в формате STEP, к механическим воздействиям;

подсистема анализа и обеспечения стойкости ЭА, установленной на виброизоляторах, 3D-модель которой создана в специализированном интерфейсе, к механическим воздействиям;

подсистема идентификации физико-механических параметров моделей ЭКБ и ЭА;

подсистема идентификации физико-механических параметров моделей виброизоляторов.

5.6.2 Перечень моделей, используемых для испытаний:

- 3D-модели конструкций ЭКБ и ЭА без виброизоляторов в формате STEP;
- 3D-модели конструкций ЭА, установленной на виброизоляторах.

5.6.3 Руководства пользователей и обучающие звуковые видеоролики к прикладному программному обеспечению, указанному в 5.6.1.

5.6.4 Необходимая квалификация персонала, специалистов и привлекаемых сил, проводящих испытания.

Аккредитация пользователя прикладного программного обеспечения, указанного в 5.6.1, в Центре компетенций в области моделирования и виртуальных испытаний ЭКБ и ЭА на внешние воздействия.

5.6.5 Испытательное оборудование для проведения натурных испытаний, необходимых для решения задачи идентификации:

- задающий генератор синусоидальных колебаний;
- усилитель мощности;
- вибратор;
- виброизмерительный преобразователь (акселерометр);
- виброизмерительная аппаратура.

5.6.6 Для проведения натурных испытаний, необходимых для решения задачи идентификации, требуются следующие материалы:

- прямоугольные пластины из материалов, для которых требуется идентификация параметров (их количество определяется количеством материалов, для которых неизвестны параметры);
- виброизоляторы, для которых требуется идентификация параметров (их количество определяется количеством виброизоляторов, для которых неизвестны параметры).

5.6.7 Порядок подготовки и использования материально-технических средств в процессе испытаний:

- приобретение и настройка рабочих станций;
- приобретение и установка на рабочих станциях программного обеспечения, отвечающего требованиям 5.4.1.1 и описанного в 5.6.1;
- приобретение и установка испытательного оборудования для проведения натурных испытаний, описанного в 5.6.5;
- изготовление материалов согласно 5.6.6 для проведения натурных испытаний, необходимых для решения задачи идентификации.

5.7 Отчетность

Протокол испытаний должен содержать следующую информацию:

1) описание макета;
2) график входного воздействия гармонической вибрации на макет;
3) график выходного воздействия гармонической вибрации в контрольной точке макета;
4) идентифицированные параметры;
5) график выходного воздействия гармонической вибрации в контрольной точке изделия;
6) выводы о наличии резонансных частот.

6 Метод математического моделирования и виртуализации испытаний ЭКБ и ЭА на воздействие статических нагрузок (гравитации, давления, распределения температур)

6.1 Цель испытаний

Целью испытаний на воздействие статических нагрузок (гравитации, давления, распределения температур) является проверка способности ЭКБ и ЭА выполнять свои функции под действием статических (т. е. постоянных во времени) нагрузок, которые в общем случае могут быть вызваны:

- разностью давления;
- статической инерционной нагрузкой под действием собственного веса (гравитацией);
- распределением температур (тепловым расширением);
- одновременным воздействием всех вышеперечисленных факторов.

6.2 Общие положения

6.2.1 Методы испытаний

Давление: существует два способа задания давления:

- давление для отдельно взятой поверхности;
- давление задается для группы поверхностей.

Гравитация: в большинстве случаев требуется смоделировать действие силы тяжести как частный случай силы гравитации. Для этого нужно задать ось гравитации, совпадающую с вертикальной осью модели, а ускорение задать равным ускорению свободного падения на Земле (9,81 м/с^2). Направление гравитации должно быть против вертикальной оси модели.

Тепловое расширение: задается распределение температур (начальное и конечное).

6.3 Оцениваемые характеристики и расчетные соотношения

6.3.1 Оцениваемыми характеристиками являются перемещения по всем осям и суммарные, а также механические напряжения в конструкциях ЭКБ и ЭА.

6.3.2 Для определения перемещений и механических напряжений в ЭКБ и ЭА без виброизоляторов проводят конечно-элементный анализ. Система уравнений движения конструкции ЭКБ и ЭА выглядит следующим образом:

$$[M]\{\ddot{r}\} + [K]\{r\} = \{F\},$$

где $\{r\}$ — вектор узловых перемещений;

$[M]$, $[K]$ — матрицы масс и жесткости соответственно;

$\{F\}$ — вектор внешних воздействий.

Инерция и демпфирование, вызываемые динамическими (т. е. переменными во времени) нагрузками, здесь не учитываются.

Давление: в конечно-элементном моделировании, если речь идет о трехмерной модели, не имеет особого смысла задавать силовую нагрузку в качестве силы, приложенной в узле. Сила в реальных конструкциях имеет всегда некоторую площадь воздействия. Поэтому основной вид нагрузки для статического анализа — давление, т. е. сила, распределенная по поверхности.

Гравитация: является статической инерционной нагрузкой, прикладываемой ко всей конструкции целиком.

Тепловое расширение: является разновидностью статического механического анализа, где в качестве нагрузки задается распределение температур (начальное и конечное). Таким образом, температуры являются здесь исходными данными, а не результатом расчета, как в тепловых видах анализа.

Если совместить нагрузки, характерные для статического анализа (гравитация, давление), с распределением температур, можно провести комбинированный расчет, в котором напряжения, вызываются как тепловым расширением конструкции, так и статическими нагрузками.

6.4 Условия, режимы, порядок, место проведения, виды и этапы испытаний

6.4.1 Условия проведения испытаний

6.4.1.1 Наличие российского программного обеспечения, предназначенного для моделирования ЭКБ и ЭА на воздействие статических нагрузок (гравитации, давления, распределения температур), внедренного на ведущих предприятиях Российской Федерации.

6.4.1.2 Наличие корректной 3D-модели ЭКБ и ЭА, отвечающей требованиям, которые приведены в приложении А.

6.4.1.3 Наличие следующих физико-механических параметров материалов изделия:

- плотность;
- модуль упругости;
- коэффициент Пуассона;
- коэффициент теплового расширения (для теплового расширения).

Модуль упругости и коэффициент Пуассона могут быть получены путем идентификации. Методика идентификации физико-механических параметров материалов ЭКБ и ЭА приведена в приложении Б.

6.4.2 Режимы испытаний

Давление: на модель задается давление, величина которого задана в ТЗ на разработку изделия, двумя способами:

- давление для отдельно взятой поверхности;
- давление задается для группы поверхностей.

Гравитация: на модель по вертикальной оси действует ускорение свободного падения на Земле (9,81 м/с^2). Направление гравитации должно быть против вертикальной оси модели.

Тепловое расширение: задается распределение температур (начальное и конечное), полученное по результатам испытаний на воздействие повышенной рабочей и предельной температуры среды.

6.4.3 Порядок проведения испытаний

6.4.3.1 Проводят идентификацию физико-механических параметров материалов ЭКБ и ЭА, указанных в 5.4.1.3, в случае их отсутствия. При этом по результатам натурных испытаний определяют зависимость ускорения от частоты гармонической вибрации в контрольной точке, которая используется при идентификации. Предварительно разрабатывают программу испытаний и изготавливают макеты пластин для испытаний. Пример идентификации приведен в приложении В.

6.4.3.2 Идентифицированные параметры материалов изделия заносят в базу данных для использования в процессе моделирования.

6.4.3.3 Проводят подготовку моделей:

- 3D-моделей в формате STEP конструкций ЭКБ и ЭА без виброизоляторов в CAD-системах, отвечающих требованиям, которые приведены в приложении А.

6.4.3.4 Проводят импорт моделей в формате IGES или STEP конструкций в системе моделирования ЭКБ и ЭА на механические воздействия.

6.4.3.5 Проводят испытания на:

- воздействие давления;
- воздействие статической инерционной нагрузки под действием собственного веса (гравитацию);
- тепловое расширение;

- одновременное воздействие всех вышеперечисленных факторов статических нагрузок (гравитации, давления, распределения температур) с применением моделирования ЭКБ и ЭА с помощью российского программного обеспечения.

Определяют перемещения по всем осям и суммарные, а также механические напряжения в конструкциях ЭКБ и ЭА.

6.4.3.6 По результатам испытаний составляют отчет, в котором дают информацию о перемещениях по всем осям и суммарных, а также механических напряжениях в конструкциях ЭКБ и ЭА.

6.4.4 Место проведения испытаний

Испытания могут быть проведены:

- самим предприятием при наличии автоматизированной системы;
- Центром компетенций в области моделирования и виртуальных испытаний ЭКБ и ЭА на внешние воздействия по заказу предприятия в случае отсутствия у него автоматизированной системы.

6.5 Обработка, анализ и оценка результатов испытаний

6.5.1 Объем обрабатываемой информации

Используют малый объем выборки $n < 50$.

6.5.2 См. 5.5.2.

6.5.3 Идентифицированные параметры определяют с учетом их разброса: среднее значение и среднее квадратическое отклонение. Для получения разброса необходимо провести идентификационные испытания 10 макетов пластин одного типа.

6.5.4 Перемещения по всем осям и суммарные, а также механические напряжения в конструкциях ЭКБ и ЭА определяют с учетом разброса параметров материала. Для каждой характеристики определяют среднее значение и среднее квадратическое отклонение.

6.6 Материально-техническое обеспечение испытаний

6.6.1 На рабочих станциях пользователей должно быть установлено следующее прикладное программное обеспечение, отвечающее требованиям 5.4.1.1:

подсистема анализа и обеспечения стойкости ЭКБ и ЭА без виброизоляторов, 3D-модели которых созданы в CAD-системах в формате STEP, к механическим воздействиям;

подсистема идентификации физико-механических параметров моделей ЭКБ и ЭА.

6.6.2 Перечень моделей, используемых для испытаний:

- 3D-модели конструкций ЭКБ и ЭА без виброизоляторов в формате STEP.

6.6.3 Руководства пользователей и обучающие звуковые видеоролики к прикладному программному обеспечению, указанному в 6.6.1.

6.6.4 Необходимая квалификация персонала, специалистов и привлекаемых сил, проводящих испытания.

Аккредитация пользователя прикладного программного обеспечения, указанного в 6.6.1, в Центре компетенций в области моделирования и виртуальных испытаний ЭКБ и ЭА на внешние воздействия.

6.6.5 См. 5.6.5.

6.6.6 Для проведения натурных испытаний, необходимых для решения задачи идентификации, требуются следующие материалы:

- прямоугольные пластины из материалов, для которых требуется идентификация параметров (их количество определяют количеством материалов, для которых неизвестны параметры).

6.6.7 См. 5.6.7.

6.7 Отчетность

Протокол испытаний должен содержать следующую информацию:

1) описание макета;
2) график входного воздействия гармонической вибрации на макет;
3) график выходного воздействия гармонической вибрации в контрольной точке макета;
4) идентифицированные параметры;
5) перемещения по всем осям и суммарные, а также механические напряжения в конструкциях ЭКБ и ЭА.

7 Метод математического моделирования и виртуализации испытаний ЭКБ и ЭА на виброустойчивость и вибропрочность воздействием синусоидальной или случайной широкополосной вибрации

7.1 Цель испытаний

Целью испытаний на воздействие синусоидальной или случайной широкополосной вибрации является определение степени годности ЭКБ и ЭА путем выявления возможных механических повреждений, позволяющих судить о конструктивной прочности ЭКБ и ЭА, а также оценка ухудшения заданных значений параметров ЭКБ и ЭА (ГОСТ 30630.1.9).

В том числе рассматривается математическое моделирование и виртуализации испытаний ЭКБ и ЭА на воздействие синусоидальной вибрации с повышенной амплитудой ускорения и на воздействие случайной широкополосной вибрации с повышенной спектральной плотностью ускорения (в критических режимах, в том числе невоспроизводимых при натурных испытаниях).

7.2 Общие положения

7.2.1 Испытанию ЭКБ и ЭА подвергают в трех взаимно перпендикулярных направлениях.

7.2.2 Методы испытаний

7.2.2.1 Испытания методом фиксированных частот синусоидальной вибрации проводят путем установки заданных значений параметров вибрации на фиксированной частоте. Испытания могут быть проведены на одной частоте, на заранее определенной частоте механического резонанса, на ряде заданных частот.

7.2.2.2 Испытания методом качающейся частоты осуществляют непрерывным изменением (развертыванием — сканированием) частоты сигналов в сторону ее увеличения, а затем уменьшения. Основными параметрами, характеризующими метод качающейся частоты, являются изменения частоты в рабочем диапазоне частот в одном направлении и обратном (время одного цикла качания $T_ц$), скорость изменения частот, а также продолжительность испытаний $T_п$.

Встречающиеся в реальных условиях эксплуатации вибрационные воздействия имеют случайный характер. Испытания на воздействия широкополосной случайной вибрации позволяют лучше, чем при синусоидальной вибрации, моделировать статистический характер воздействия и выявлять механизмы разрушения и повреждения различных ЭКБ и ЭА. Кроме того, одновременное возбуждение механических резонансов отдельных элементов ЭКБ и ЭА позволяет учитывать их взаимное влияние и сокращать срок испытания, приближая их к условиям реальной эксплуатации.

Основной целью испытаний является определение способности ЭКБ и ЭА выдерживать воздействие случайной вибрации заданной степени жесткости, выявлять возможные механические повреждения и (или) ухудшение заданных характеристик изделий и использовать полученные сведения для решения вопроса о пригодности ЭКБ и ЭА.

При испытаниях на воздействие широкополосной случайной вибрации задают СПУ и спектр, определяющий закон изменения СПУ в пределах частотного диапазона.

7.3 Оцениваемые характеристики и расчетные соотношения

7.3.1 Оцениваемыми характеристиками являются резонансные частоты, ускорения, перемещения, механические напряжения в ЭКБ и ЭА, время до усталостного разрушения.

7.3.2 Для определения оцениваемых характеристик ЭКБ и ЭА без виброизоляторов проводят конечно-элементный анализ. Система уравнений движения конструкции выглядит следующим образом:

$$[M]\{\ddot{r}\} + [C]\{\dot{r}\} + [K]\{r\} = \{F\},$$

где $\{r\}$ — вектор узловых перемещений;

$[M]$, $[C]$, $[K]$ — матрицы масс, вязкого демпфирования и жесткости соответственно;

$\{F\}$ — вектор внешних воздействий.

7.3.3 Для определения оцениваемых характеристик ЭА, установленной на виброизоляторах, используется система дифференциальных уравнений движения на основе уравнения Лагранжа. Для системы с шестью степенями свободы их записывают в следующем виде:

$$d\left(\partial T/\partial \dot{q}_i\right)/dt - \partial T/\partial q_i + \partial П/\partial q_i = Q_i(t), \quad i = 1, 2, ..., 6,$$

где q_i — i-я обобщенная координата;

$\dot{q}_i$ — i-я обобщенная скорость;

T — кинетическая энергия системы;

$П$ — потенциальная энергия системы;

$Q_i(t)$ — обобщенная сила, действующая по направлению i-й обобщенной координаты.

7.3.4 Время до усталостного разрушения ЭКБ и ЭА при гармонической вибрации определяют по формуле

$$t_р = N_р/f,$$

где $N_р$ — число циклов напряжений до разрушения;

f — текущая частота колебаний.

Число циклов до усталостного разрушения при гармонической вибрации рассчитывают по формуле

$$N_р = N_в \left(\frac{\sigma_0}{\sigma_{max}} \right)^m,$$

где σ_0 — предел усталости материала вывода;

m — параметр, зависящий от материала, размеров и формы;

$N_в$ — базовое число циклов;

σ_{max} — максимальное механическое напряжение (ГОСТ 25.504, ГОСТ 25.507).

Параметр m характеризует угол наклона кривой усталости. На рисунке 1 приведены полученные экспериментально кривые усталости материала, так называемые кривые Веллера. Они выражают зависимость амплитуды напряжения в симметричном цикле от числа $N_р$ циклов до разрушения. Кривая *1* характерна для сталей малой и средней прочности, а также для титановых сплавов при испытании без воздействия коррозии и при нормальной температуре, кривая *2* — для цветных металлов и высокопрочных легированных сталей. Кривая *1* имеет резкий перелом при числе циклов $N_р \approx 10^6$, после чего она идет практически параллельно оси абсцисс. Поэтому за базу испытаний для таких материалов принимают $N_в = 10^7$. Физически это означает, что если амплитуда σ переменного напряжения будет меньше напряжения σ_0, соответствующего точке перелома, то усталостное разрушение не наступает при неограниченном числе циклов. Это напряжение σ_0 и получило название предела усталости материала при симметричном цикле. Некоторые материалы, в частности цветные металлы, многокомпонентные сплавы, не имеют выраженного предела усталости: с увеличением числа циклов $N_р$ прочность продолжает падать (кривая *2*). Для таких материалов сопротивление усталости характеризуют пределом ограниченной выносливости при заданной базе (числе циклов) $N_в$, которую обычно принимают равной $5 \cdot 10^7$ циклам.

Некоторые значения параметра m для конструкций ЭКБ и ЭА приведены в справочниках. Но для более точных расчетов требуется получать экспериментально кривые Веллера для различных конструкций ЭКБ и ЭА.

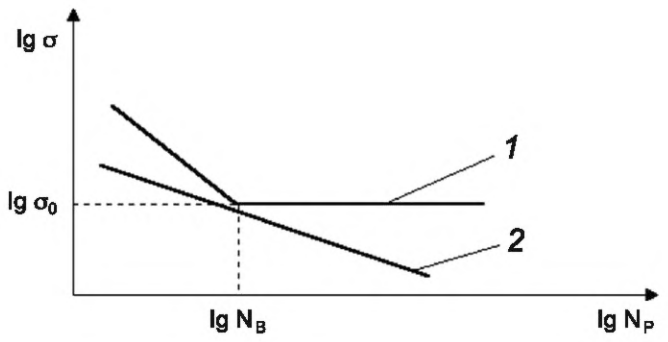


Рисунок 1 — Кривые усталости для различных материалов

Для расчета ЭКБ и ЭА на усталость при случайных воздействиях — случайных вибрациях и акустических шумах — необходимо использовать одну из гипотез суммирования усталостных повреждений, возникающих от действия амплитуд различных уровней. Использование известных гипотез встречает большие сложности при расчетах в условиях случайного нагружения, так как в этом случае становится неопределенным понятие цикла нагрузки и схематизация такого нагружения может привести к существенным погрешностям при расчете усталостной прочности ЭКБ и ЭА.

Для стационарного случайного процесса используется гипотеза суммирования усталостного повреждения при циклическом нагружении, основанная на суммировании энергии колебаний на отдельных частотах. В соответствии с этой гипотезой время до усталостного разрушения ЭКБ и ЭА при случайном воздействии может быть найдено по формуле

$$t = \frac{2\pi A}{\Delta^m (\sqrt{2})^m \Gamma\left(\frac{m+2}{2}\right)\left(\int\limits_{\omega} S_0(\omega)\omega^{2/m} d\omega\right)},$$

где $\Delta = \sqrt{D}$ — среднее квадратическое отклонение текущих значений напряжений;

D — дисперсия;

$S_0(\omega) = S(\omega)/D$ — приведенная спектральная плотность;

$S(\omega)$ — спектральная плотность;

$\Gamma\left(\frac{m+2}{2}\right)$ — гамма-функция;

ω — круговая частота гармонического нагружения ($\omega = 2\pi f$);

A и m — характеристики кривой усталости в соответствии с уравнением $N_p \sigma_a^m = A$;

$\sigma_0 = (\sigma_{max} - \sigma_{min})/2$ — амплитуда напряжения в цикле;

σ_{min} — минимальное механическое напряжение (с учетом знака).

7.4 Условия, режимы, порядок, место проведения, виды и этапы испытаний

7.4.1 Условия проведения испытаний

7.4.1.1 Наличие российского программного обеспечения, предназначенного для моделирования ЭКБ и ЭА на воздействие гармонической и случайной вибрации, внедренного на ведущих предприятиях Российской Федерации.

7.4.1.2 См. 5.4.1.2.

7.4.1.3 См. 5.4.1.3.

7.4.1.4 См. 5.4.1.4.

7.4.2 Режимы испытаний

Параметры гармонической вибрации (численные значения задают в ТЗ на разработку ЭКБ и ЭА):

- ускорение g;
- диапазон частот, Гц.

Параметры широкополосной случайной вибрации (численные значения задают в ТЗ на разработку ЭКБ и ЭА):

- спектральная плотность S, g^2/Гц;
- диапазон частот, Гц.

7.4.3 Порядок проведения испытаний

7.4.3.1 Проводят идентификацию физико-механических параметров материалов ЭКБ и ЭА, указанных в 7.4.1.3, в случае их отсутствия. При этом по результатам натурных испытаний определяют зависимость ускорения от частоты гармонической вибрации в контрольной точке, которая используется при идентификации. Предварительно разрабатывают программу испытаний и изготавливают макеты пластин для испытаний. Пример идентификации приведен в приложении В.

7.4.3.2 Проводят идентификацию параметров виброизоляторов, указанных в 7.4.1.4, в случае их отсутствия. При этом по результатам натурных испытаний определяют зависимость ускорения от частоты гармонической вибрации системы виброизоляции, которая используется при идентификации. Предварительно разрабатывают программу испытаний и приобретают образцы виброизоляторов для испытаний. Пример идентификации приведен в приложении Г.

7.4.3.3 Идентифицированные параметры материалов ЭКБ и ЭА и параметры виброизоляторов заносят в базу данных для использования в процессе моделирования.

7.4.3.4 Проводят подготовку моделей:

- 3D-моделей в формате STEP конструкций ЭКБ и ЭА без виброизоляторов в CAD-системах, отвечающих требованиям, которые приведены в приложении А;
- 3D-моделей конструкций ЭА, установленных на виброизоляторах, в специализированных интерфейсах.

7.4.3.5 Проводят импорт моделей в формате IGES или STEP конструкций в системе моделирования ЭКБ и ЭА на механические воздействия.

7.4.3.6 Проводят испытания на воздействие гармонической вибрации и на воздействие случайной широкополосной вибрации в заданном диапазоне частот с применением моделирования механических процессов в ЭКБ и ЭА на воздействие гармонической и случайной вибрации. Определяют зависимости ускорения от частоты гармонической вибрации в контрольных точках или в системах виброизоляции, по которым выявляют резонансные частоты. Также определяют средние квадратические значения ускорений при случайной вибрации.

7.4.3.7 По результатам испытаний составляют отчет, в котором дают информацию об оцениваемых характеристиках.

7.4.4 Место проведения испытаний

Испытания могут быть проведены:

- самим предприятием при наличии автоматизированной системы;
- Центром компетенций в области моделирования и виртуальных испытаний ЭКБ и ЭА на внешние воздействия по заказу предприятия в случае отсутствия у него автоматизированной системы.

7.5 Обработка, анализ и оценка результатов испытаний

7.5.1 Объем обрабатываемой информации

Используют малый объем выборки $n < 50$.

7.5.2 См. 5.5.2.

7.5.3 Идентифицированные параметры определяют с учетом их разброса: среднее значение и среднее квадратическое отклонение. Для получения разброса необходимо провести идентификационные испытания 10 макетов пластин и 10 образцов виброизоляторов одного типа.

7.5.4 Оцениваемые характеристики определяют с учетом разброса ускорений. Для каждой характеристики определяют среднее значение и среднее квадратическое отклонение.

7.5.5 Делают выводы о наличии резонансных частот.

7.6 Материально-техническое обеспечение испытаний

См. 5.6.

7.7 Отчетность

Протокол испытаний должен содержать следующую информацию:

1) описание макета;
2) график входного воздействия гармонической вибрации на макет;
3) график выходного воздействия гармонической вибрации в контрольной точке макета;
4) идентифицированные параметры;
5) график входного воздействия гармонической и случайной вибрации на ЭКБ и ЭА;
6) график выходного воздействия гармонической и случайной вибрации в контрольной точке ЭКБ и ЭА;
7) оцениваемые характеристики: резонансные частоты, ускорения, перемещения, механические напряжения в ЭКБ и ЭА, время до усталостного разрушения.

8 Метод математического моделирования и виртуализации испытаний ЭКБ и ЭА на ударную устойчивость и ударную прочность при воздействии одиночного и многократного механического удара

8.1 Цель испытаний

Испытание на воздействие одиночных ударов проводят для проверки способности ЭКБ и ЭА выполнять свои функции после прекращения этого воздействия. В ряде случаев проверяют работоспособность ЭКБ и ЭА в процессе воздействия одиночных ударов (ГОСТ 30630.1.10).

8.2 Общие положения

8.2.1 Испытанию ЭКБ и ЭА подвергают в трех взаимно перпендикулярных направлениях.

8.2.2 Методы испытаний

Длительность действия ударного ускорения определяют по осциллограмме на уровне 0,1.

Воздействие многократных ударов предусматривает проведение двух видов испытаний: на ударную прочность и ударную устойчивость.

При испытании на ударную устойчивость ЭКБ и ЭА подвергают воздействию 20 ударов по каждому из направлений.

Наряду с испытаниями на воздействие многократных ударов проводят испытания на воздействие одиночных механических ударов, которым могут подвергаться ЭКБ и ЭА в период эксплуатации или при транспортировании.

8.3 Оцениваемые характеристики и расчетные соотношения

8.3.1 Оцениваемыми характеристиками являются ускорения, перемещения, механические напряжения в изделиях, время до усталостного разрушения.

8.3.2 Для определения оцениваемых характеристик ЭКБ и ЭА без виброизоляторов проводят конечно-элементный анализ. Система уравнений движения конструкции выглядит следующим образом:

$$[M]\{\ddot{r}\} + [C]\{\dot{r}\} + [K]\{r\} = \{F\},$$

где $\{r\}$ — вектор узловых перемещений;

$[M]$, $[C]$, $[K]$ — матрицы масс, вязкого демпфирования и жесткости соответственно;

$\{F\}$ — вектор внешних воздействий.

8.3.3 Для определения оцениваемых характеристик ЭА, установленной на виброизоляторах, используется система дифференциальных уравнений движения на основе уравнения Лагранжа. Для системы с шестью степенями свободы их записывают в следующем виде:

$$d\left(\partial T/\partial \dot{q}_i\right)/dt - \partial T/\partial q_i + \partial П/\partial q_i = Q_i(t), \quad i = 1, 2, ..., 6,$$

где q_i — i-я обобщенная координата;

$\dot{q}_i$ — i-я обобщенная скорость;

T — кинетическая энергия системы;

$П$ — потенциальная энергия системы;

$Q_i(t)$ — обобщенная сила, действующая по направлению i-й обобщенной координаты.

8.3.4 Основным уравнением при малоцикловой усталости служит уравнение Мэнсона-Коффина-Басквина

$$\frac{\Delta\varepsilon}{2} = \frac{\sigma_f'}{E}(2N_f)^b + \varepsilon_f'(2N_f)^c,$$

где $\frac{\Delta\varepsilon}{2}$ — амплитуда полной деформации в цикле;

N_f — число циклов до разрушения;

σ_f' — коэффициент усталостной прочности (fatigue strength coefficient), зависящий от материала;

b — показатель усталостной прочности или показатель Басквина (fatigue strength exponent), зависящий от материала;

ε_f' — коэффициент усталостной пластичности (fatigue ductility coefficient), зависящий от материала;

c — показатель усталостной пластичности (fatigue ductility exponent), зависящий от материала;

E — модуль упругости.

8.4 Условия, режимы, порядок, место проведения, виды и этапы испытаний

8.4.1 Условия проведения испытаний

8.4.1.1 Наличие российского программного обеспечения, предназначенного для моделирования ЭКБ и ЭА на воздействие одиночного и многократного механического удара, внедренного на ведущих предприятиях Российской Федерации.

8.4.1.2 Наличие корректной 3D-модели ЭКБ и ЭА, отвечающей требованиям, которые приведены в приложении А.

8.4.1.3 Наличие следующих физико-механических параметров материалов ЭКБ и ЭА:

- плотность;
- модуль упругости;
- коэффициент Пуассона;
- КМП для линейного участка зависимости КМП от напряжения изгиба $\sigma_и$ при $\sigma_u = 0$;
- коэффициент зависимости КМП от напряжения.

Зависимость КМП от напряжения изгиба $\sigma_и$ на линейном участке имеет вид

$$\gamma = \gamma_0 + k_\sigma \sigma_u,$$

где γ_0 — КМП для линейного участка при $\sigma_u = 0$;

k_σ — коэффициент зависимости КМП от напряжения.

Взаимосвязь тепловых и механических процессов в конструкциях ЭКБ и ЭА обусловлена влиянием тепловых процессов на механические — температурными зависимостями физико-механических параметров — модуля упругости E и КМП γ — для материалов конструкций ЭКБ и ЭА.

С ростом температуры модуль упругости уменьшается, а КМП увеличивается. Зависимости E и γ от температуры могут аппроксимироваться линейными полиномами. Уравнение прямой для зависимости модуля упругости от температуры в этом случае имеет вид

$$E = E^{20} - K_E (T - 20),$$

где T — текущая температура;

E^{20} — модуль упругости при $T = 20$ °С;

K_E — коэффициент пропорциональности.

С изменением температуры меняется как γ_0 в зависимости от температуры, так и k_σ. Уравнения прямых для зависимостей γ_0 и k_σ от температуры имеют вид:

$$\gamma_0 = \gamma_0^{20} + K_\gamma (T - 20), \quad (3)$$

$$k_\sigma = k_\sigma^{20} + K_k (T - 20), \quad (4)$$

где γ_0^{20} — значение γ_0 при $T = 20$ °С;

k_σ^{20} — значение k_σ при $T = 20$ °С;

K_γ, K_k — коэффициенты пропорциональности.

Данные параметры могут быть получены путем идентификации. Методика идентификации физико-механических параметров материалов ЭКБ и ЭА приведена в приложении Б.

8.4.1.4 Наличие следующих параметров виброизоляторов:

- коэффициент жесткости по оси X;
- коэффициент жесткости по оси Y;
- коэффициент жесткости по оси Z;
- КМП по оси X для линейного участка зависимости КМП от напряжения изгиба σ_u при $\sigma_u = 0$;
- КМП по оси Y для линейного участка зависимости КМП от напряжения изгиба σ_u при $\sigma_u = 0$;
- КМП по оси Z для линейного участка зависимости КМП от напряжения растяжения-сжатия $\sigma_{P\text{-}C}$ при $\sigma_{P\text{-}C} = 0$;
- коэффициент зависимости КМП по оси X от напряжения изгиба;
- коэффициент зависимости КМП по оси Y от напряжения изгиба;
- коэффициент зависимости КМП по оси Z от напряжения растяжения-сжатия.

Данные параметры могут быть получены путем идентификации. Методика идентификации параметров приведена в приложении Б.

8.4.2 Режимы испытаний

Параметры одиночного механического удара:

- пиковое ударное ускорение импульса;
- длительность ударного импульса.

Параметры многократного механического удара:

- пиковое ударное ускорение одного импульса;
- длительность одного ударного импульса;
- количество ударных импульсов.

8.4.3 Порядок проведения испытаний

8.4.3.1 Проводят идентификацию физико-механических параметров материалов ЭКБ и ЭА, указанных в 5.4.1.3, в случае их отсутствия. При этом по результатам натурных испытаний определяют зависимость ускорения от времени удара в контрольной точке, которая используется при идентификации. Предварительно разрабатывают программу испытаний и изготавливают макеты пластин для испытаний. Пример идентификации приведен в приложении В.

8.4.3.2 Проводят идентификацию параметров виброизоляторов, указанных в 5.4.1.4, в случае их отсутствия. При этом по результатам натурных испытаний определяют зависимость ускорения от частоты гармонической вибрации системы виброизоляции, которая используется при идентификации. Предварительно разрабатывают программу испытаний и приобретают образцы виброизоляторов для испытаний. Пример идентификации приведен в приложении Г.

8.4.3.3 Идентифицированные параметры материалов ЭКБ и ЭА и параметры виброизоляторов заносят в базу данных для использования в процессе моделирования.

8.4.3.4 Проводят подготовку моделей:

- 3D-моделей в формате STEP конструкций ЭКБ и ЭА без виброизоляторов в CAD-системах, отвечающих требованиям, которые приведены в приложении А;
- 3D-моделей конструкций ЭА, установленных на виброизоляторах, в специализированных интерфейсах.

8.4.3.5 Проводят импорт моделей в формате IGES или STEP конструкций ЭКБ и ЭА в системе моделирования изделий на механические воздействия.

8.4.3.6 Проводят виртуальные испытания ЭКБ и ЭА на воздействие одиночного и многократного механического удара с применением моделирования. Определяют зависимости ускорения удара от времени в контрольных точках или в системах виброизоляции.

8.4.3.7 По результатам виртуальных испытаний составляют отчет, в котором дают информацию об оцениваемых характеристиках.

8.4.4 Место проведения испытаний

Испытания могут быть проведены:

- самим предприятием при наличии автоматизированной системы;
- Центром компетенций в области моделирования и виртуальных испытаний ЭКБ и ЭА на внешние воздействия по заказу предприятия в случае отсутствия у него автоматизированной системы.

8.5 Обработка, анализ и оценка результатов испытаний

8.5.1 Объем обрабатываемой информации

Используют малый объем выборки $n < 50$.

8.5.2 См. 5.5.2.

8.5.3 Идентифицированные параметры определяют с учетом их разброса: среднее значение и среднее квадратическое отклонение. Для получения разброса необходимо провести идентификационные испытания 10 макетов пластин и 10 образцов виброизоляторов одного типа.

8.5.4 Оцениваемые характеристики определяют с учетом разброса ускорений. Для каждой характеристики определяют среднее значение и среднее квадратическое отклонение.

8.6 Материально-техническое обеспечение испытаний

См. 5.6.

8.7 Отчетность

Протокол испытаний должен содержать следующую информацию:

1) описание макета;
2) график входного воздействия одиночного механического удара на макет;
3) график выходного воздействия одиночного механического удара в контрольной точке макета;
4) идентифицированные параметры;
5) график входного воздействия одиночного и многократного механического удара на ЭКБ и ЭА;
6) график выходного воздействия одиночного и многократного механического удара в контрольной точке ЭКБ и ЭА;
7) оцениваемые характеристики: ускорения, перемещения, механические напряжения в ЭКБ и ЭА, время до усталостного разрушения.

9 Метод математического моделирования и виртуализации испытаний ЭКБ и ЭА на воздействие линейного ускорения

9.1 Цель испытаний

Испытаниям на воздействие линейных ускорений в целях определения прочности или устойчивости подвергают те ЭКБ и ЭА, которые не испытывают на воздействие одиночных ударов с ускорением, равным или большим, чем линейное. Эффект воздействия при данных условиях испытаний оказывается одинаковым. Однако если в конструкцию ЭКБ и ЭА входят подвижные детали и узлы, то при одиночных ударах возникают силы, направление которых не совпадает с силами, вызванными линейными ускорениями. Вследствие этого указанные испытания проводят самостоятельно (ГОСТ Р 51805).

9.2 Общие положения

9.2.1 Линейное ускорение, направление его воздействия, характер изменения, продолжительность испытаний и ряд других специфических для испытуемого ЭКБ и ЭА параметров оговаривают в ТЗ.

9.2.2 Выбор параметров зависит от назначения испытуемых ЭКБ и ЭА, места его установки и условий эксплуатации. Определяющим при выборе линейного ускорения являются требования к прочностным характеристикам ЭКБ и ЭА.

9.2.3 Стандарт устанавливает степени жесткости испытаний, которым соответствуют определенные значения линейных ускорений. При испытаниях следует выбирать линейные ускорения из рекомендованных стандартных значений. Возможен выбор следующих направлений воздействия линейных ускорений по отношению к ЭКБ и ЭА:

- поочередно в каждом из двух противоположных направлений по трем взаимно перпендикулярным осям ЭКБ и ЭА, если у ЭКБ и ЭА невозможно выделить плоскости и оси симметрии;
- вдоль оси симметрии в двух противоположных направлениях и в любом направлении, перпендикулярном к оси симметрии, при наличии оси симметрии;
- перпендикулярно к каждой плоскости симметрии в одном направлении при наличии одной или нескольких плоскостей симметрии.

ЭКБ и ЭА, для которых известно наиболее опасное направление воздействия, рекомендуется испытывать только в этом направлении, сохраняя продолжительность испытания только для данного направления.

9.3 Оцениваемые характеристики и расчетные соотношения

См. 8.3.

9.4 Условия, режимы, порядок, место проведения, виды и этапы испытаний

9.4.1 Условия проведения испытаний

9.4.1.1 Наличие российского программного обеспечения, предназначенного для моделирования ЭКБ и ЭА на воздействие линейного ускорения, внедренного на ведущих предприятиях Российской Федерации.

9.4.1.2 См. 8.4.1.2.

9.4.1.3 См. 8.4.1.3.

9.4.1.4 См. 8.4.1.3.

9.4.2 Режимы испытаний

Параметры линейного ускорения:

- пиковое линейное ускорение;
- длительность воздействия линейного ускорения.

9.4.3 Порядок проведения испытаний

9.4.3.1 См. 8.4.3.1.

9.4.3.2 См. 8.4.3.2.

9.4.3.3 См. 8.4.3.3.

9.4.3.4 См. 8.4.3.4.

9.4.3.5 См. 8.4.3.4.

9.4.3.6 Проводят виртуальные испытания ЭКБ и ЭА на воздействие линейного ускорения с применением моделирования. Определяют зависимости ускорения от времени в контрольных точках или в системах виброизоляции.

9.4.3.7 По результатам виртуальных испытаний составляют отчет, в котором дают информацию об оцениваемых характеристиках.

9.4.4 Место проведения испытаний

Испытания могут быть проведены:

- самим предприятием при наличии автоматизированной системы;
- Центром компетенций в области моделирования и виртуальных испытаний ЭКБ и ЭА на внешние воздействия по заказу предприятия в случае отсутствия у него автоматизированной системы.

9.5 Обработка, анализ и оценка результатов испытаний

См. 8.5.

9.6 Материально-техническое обеспечение испытаний

См. 5.6.

9.7 Отчетность

Протокол испытаний должен содержать следующую информацию:

1) описание макета;
2) график входного воздействия одиночного механического удара на макет;
3) график выходного воздействия одиночного механического удара в контрольной точке макета;
4) идентифицированные параметры;
5) график входного воздействия линейного ускорения на ЭКБ и ЭА;
6) график выходного воздействия линейного ускорения в контрольной точке ЭКБ и ЭА;
7) оцениваемые характеристики: ускорения, перемещения, механические напряжения в ЭКБ и ЭА, время до усталостного разрушения.

10 Метод математического моделирования и виртуализации испытаний ЭКБ и ЭА на воздействие акустического шума

10.1 Цель испытаний

Для выявления степени воздействия акустического шума на ЭКБ и ЭА проводят испытания, целью которых является определение способности изделий выполнять свои функции и сохранять параметры в пределах норм, указанных в стандартах и ТУ на изделия в условиях воздействия повышенного акустического шума (ГОСТ 30630.1.5).

10.2 Общие положения

10.2.1 Испытаниям на воздействие акустического шума подвергают ЭКБ и ЭА, имеющие немонолитную структуру.

10.2.2 Методы испытаний

Испытания на воздействие акустических шумов могут быть проведены двумя основными методами: методом воздействия на изделие случайного акустического шума и методом воздействия на изделие акустического тона меняющейся частоты. Выбор метода испытаний определяют условиями эксплуатации ЭКБ и ЭА.

10.3 Оцениваемые характеристики и расчетные соотношения

10.3.1 Оцениваемыми характеристиками являются резонансные частоты, ускорения, перемещения, механические напряжения в ЭКБ и ЭА, время до усталостного разрушения.

10.3.2 Для определения оцениваемых характеристик ЭКБ и ЭА без виброизоляторов проводят конечно-элементный анализ. Система уравнений движения конструкции выглядит следующим образом:

$$[M]\{\ddot{r}\} + [C]\{\dot{r}\} + [K]\{r\} = \{F\},$$

где $\{r\}$ — вектор узловых перемещений;

$[M]$, $[C]$, $[K]$ — матрицы масс, вязкого демпфирования и жесткости соответственно;

$\{F\}$ — вектор внешних воздействий.

10.3.3 Для определения оцениваемых характеристик ЭА, установленной на виброизоляторах, используется система дифференциальных уравнений движения на основе уравнения Лагранжа. Для системы с шестью степенями свободы их записывают в следующем виде

$$d\left(\partial T/\partial \dot{q}_i\right)/dt - \partial T/\partial q_i + \partial \Pi/\partial q_i = Q_i(t), \quad i = 1, 2, ..., 6,$$

где q_i — i-я обобщенная координата;

$\dot{q}_i$ — i-я обобщенная скорость;

T — кинетическая энергия системы;

Π — потенциальная энергия системы;

$Q_i(t)$ — обобщенная сила, действующая по направлению i-й обобщенной координаты.

10.3.4 Время до усталостного разрушения ЭКБ и ЭА при акустическом шуме определяют аналогично 7.3.4. При испытании методом воздействия на изделие случайного акустического шума — аналогично случайной вибрации, при испытании методом воздействия на изделие акустического тона меняющейся частоты — аналогично гармонической вибрации.

10.4 Условия, режимы, порядок, место проведения, виды и этапы испытаний

10.4.1 Условия проведения испытаний

10.4.1.1 Наличие российского программного обеспечения, предназначенного для моделирования ЭКБ и ЭА на воздействие акустического шума, внедренного на ведущих предприятиях Российской Федерации.

10.4.1.2 См. 5.4.1.2.

10.4.1.3 См. 5.4.1.3.

10.4.1.4 См. 5.4.1.4.

10.4.2 Режимы испытаний

Параметры акустического шума (численные значения задают в ТЗ на разработку ЭКБ и ЭА):

- уровень звукового давления, дБ;
- диапазон частот, Гц.

10.4.3 Порядок проведения испытаний

10.4.3.1 Проводят идентификацию физико-механических параметров материалов ЭКБ и ЭА, указанных в 10.4.1.3, в случае их отсутствия. При этом по результатам натурных испытаний определяют зависимость ускорения от частоты гармонической вибрации в контрольной точке, которая используется при идентификации. Предварительно разрабатывают программу испытаний и изготавливают макеты пластин для испытаний. Пример идентификации приведен в приложении В.

10.4.3.2 Проводят идентификацию параметров виброизоляторов, указанных в 10.4.1.4, в случае их отсутствия. При этом по результатам натурных испытаний определяют зависимость ускорения от частоты гармонической вибрации системы виброизоляции, которая используется при идентификации. Предварительно разрабатывают программу испытаний и приобретают образцы виброизоляторов для испытаний. Пример идентификации приведен в приложении В.

10.4.3.3 Идентифицированные параметры материалов ЭКБ и ЭА и параметры виброизоляторов заносят в базу данных для использования в процессе моделирования.

10.4.3.4 Проводят подготовку моделей:

- 3D-моделей в формате STEP конструкций изделий без виброизоляторов в CAD-системах, отвечающих требованиям, которые приведены в приложении А;
- 3D-моделей конструкций ЭА, установленных на виброизоляторах, в специализированных интерфейсах.

10.4.3.5 Проводят импорт моделей в формате STEP конструкций ЭКБ и ЭА в системе моделирования изделий на механические воздействия.

10.4.3.6 Проводят виртуальные испытания на воздействие акустического шума в заданном диапазоне частот с применением моделирования механических процессов в ЭКБ и ЭА на воздействие акустического шума. Определяют зависимости ускорения от частоты акустического шума в контрольных точках или в системах виброизоляции, по которым выявляют резонансные частоты.

10.4.3.7 По результатам испытаний составляют отчет, в котором дают информацию об оцениваемых характеристиках.

10.4.4 Место проведения испытаний

Испытания могут быть проведены:

- самим предприятием при наличии автоматизированной системы;
- Центром компетенций в области моделирования и виртуальных испытаний ЭКБ и ЭА на внешние воздействия по заказу предприятия в случае отсутствия у него автоматизированной системы.

10.5 Обработка, анализ и оценка результатов испытаний

См. 7.5.

10.6 Материально-техническое обеспечение испытаний

См. 5.6.

10.7 Отчетность

Протокол испытаний должен содержать следующую информацию:

1) описание макета;
2) график входного воздействия гармонической вибрации на макет;
3) график выходного воздействия гармонической вибрации в контрольной точке макета;
4) идентифицированные параметры;
5) график входного воздействия акустического шума на ЭКБ и ЭА;
6) график выходного воздействия акустического шума в контрольной точке ЭКБ и ЭА;
7) оцениваемые характеристики: резонансные частоты, ускорения, перемещения, механические напряжения в изделиях, время до усталостного разрушения.

Приложение А
(рекомендуемое)

Методика подготовки 3D-модели в CAD-системе для последующего моделирования

При проведении механических расчетов, при создании расчетной модели сложной конструкции ЭКБ и ЭА становится актуальным использование идеализации ее геометрии, которая в дальнейшем оказывает влияние на достоверность результатов, полученных при расчете. Это связано с тем, что часто модель непригодна для расчета ввиду наличия элементов, ее усложняющих. В данной методике представлены способы упрощения 3D-модели конструкции, применение которых позволяет подготовить ее к расчету в CAE-системе.

Расчетная модель конструкции состоит из массива узлов сетки конечных элементов. Однако при создании расчетной модели сложной конструкции необходимо несколько идеализировать ее форму, при этом степень идеализации оказывает влияние на достоверность результатов, полученных при расчете. Особое внимание должно уделяться таким местам конструкции, где наиболее вероятно возникновение механических напряжений (места крепления, опоры, разного рода соединения). Тем не менее невыполнение упрощения электронной модели изделия ведет к увеличению времени, а то и к невозможности выполнения расчетов. Ниже рассматриваются причины, которые приводят к усложнению конечно-элементной модели.

А.1 Особенности 3D-моделей, выполненных в CAD-системах

С точки зрения прочностных расчетов эти расчеты изделий осложнены следующим:

А.1.1 Значительным количеством деталей, расположенных в конструкции изделия. Это существенно замедляет процесс расчета или делает его невозможным для расчета на ЭВМ. На рисунке А.1 и рисунке А.2 представлена импортированная в CAE-систему модель изделия и ее фрагмент.

А.1.2 Наличием в модели малогабаритных деталей: винты, кабели, шайбы, что в свою очередь, приведет к «сложным» соединениям и затруднит разбиение конструкции на конечные элементы. Пример представлен на рисунке А.3. Перечисленные модели влияют на размер конечных элементов, их количество, вероятность безошибочного импорта конструкции и, как было сказано выше, на время дальнейших расчетов. Некоторыми такими деталями можно пренебречь, так как вносимая ими жесткость мала, и это мало отражается на результате расчета. Болты, гайки, шайбы свою прямую функцию не выполняют при расчете. Но они необходимы, если того требуют условия задачи.

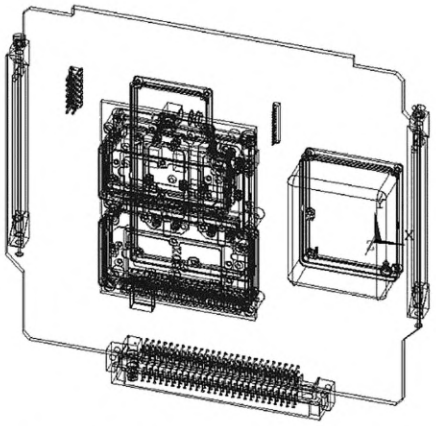


Рисунок А.1 — Импортированная, неидеализированная модель

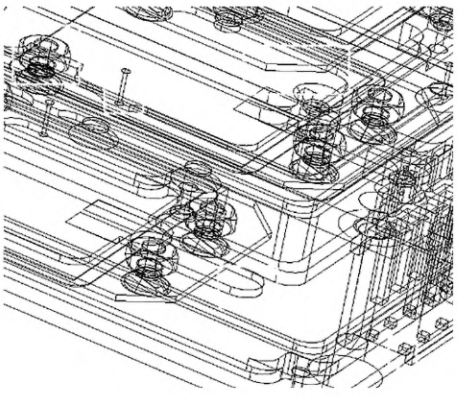


Рисунок А.2 — Фрагмент импортированной, неидеализированной модели

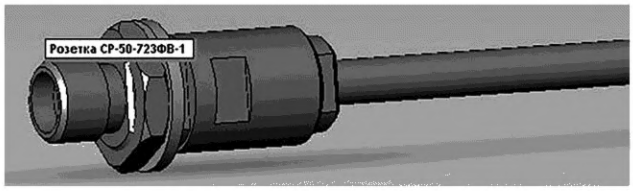


Рисунок А.3 — Исполнение малогабаритной детали

А.1.3 Конструктивным исполнением некоторых деталей. К примеру, наличие отверстий, фасок и скруглений. Примеры представлены на рисунках А.4—А.6. На границе данных областей происходит «сгущение» сетки конечных элементов, что приводит к увеличению их количества и уменьшению их размера, увеличению времени расчета, уменьшению вероятности расчета конструкции (так как срабатывает ограничение программы по количеству конечных элементов).

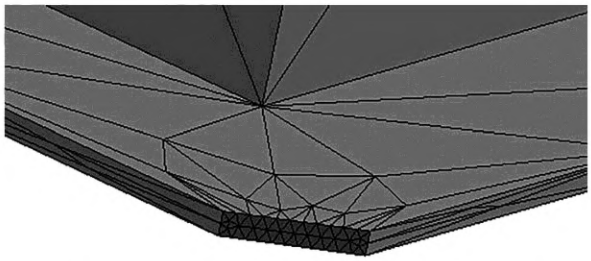


Рисунок А.4 — Сгущение сетки конечных элементов в области фаски

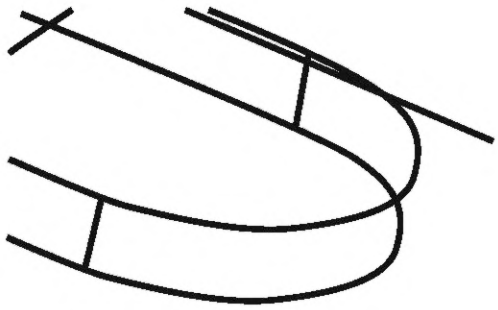


Рисунок А.5 — Пример скругления

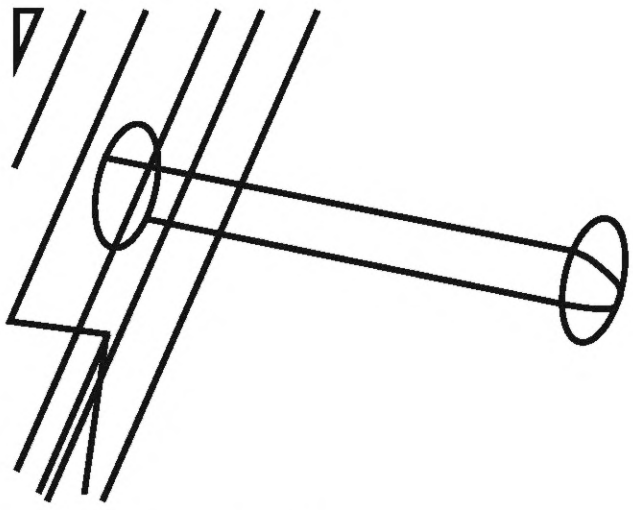


Рисунок А.6 — Пример отверстия

При стремлении к точности моделирования увеличивается время на импорт модели, затрудняется создание сетки конечных элементов и увеличивается время расчета. Связано это с тем, что увеличивается количество деталей, а как следствие — поверхностей; сборка становится более громоздкой. При расчете в CAE-системах используют идеализированную расчетную модель.

Для решения задач по расчету произвольных конструкций на механические воздействия предлагается методика по работе с CAE-системами. На примере российского программного обеспечения АСОНИКА (Автоматизированная система обеспечения надежности и качества аппаратуры, gost.e-ecolog.ru , см. приложение Е) показано применение методики подготовки данных к расчетам на механические воздействия.

А.2 Пример применения методики

Как показывает практика, конструкции ЭКБ и ЭА часто отличаются от стандартных форм исполнения. В подсистеме АСОНИКА-М-3D имеется возможность рассчитывать воздействия механических факторов моделей любого конструктивного исполнения, импортированных из CAD-систем. Это позволяет повысить сходимость результатов моделирования с данными эксперимента за счет более точно воспроизведенной геометрии конструкции.

На рисунке А.7 представлена последовательность действий по работе с CAE-системой на примере подсистемы АСОНИКА-М-3D.

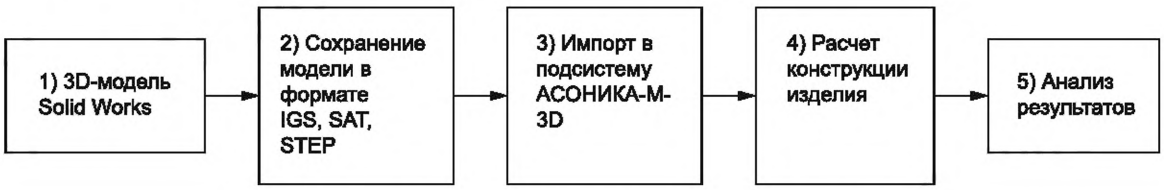


Рисунок А.7 — Схема по работе с подсистемой АСОНИКА-М-3D

А.2.1 Исходная модель

Как упоминалось ранее, перед сохранением в формате, необходимом для передачи в подсистему АСОНИКА-М-3D, зачастую требуется идеализировать модель конструкции ЭКБ и ЭА. На рисунке А.8 представлена исходная модель ЭА, созданная в CAD-системе.

В данном примере применяются следующие методы по упрощению конструкции:

- исключаются малогабаритные по сравнению с конструкцией детали;
- исключаются, где это представляется возможным, фаски и скругления.

Рассматриваются условия закрепления конструкции, так как закрепление необходимо задать точно. Упрощенное закрепление (например, по линии вместо точки) повлияет на сходимость результатов расчета с результатами эксперимента.

Также проверяют отсутствие пересечений деталей в сборке.

На рисунке А.9 представлена идеализированная модель конструкции изделия.

А.2.2 Сохранение модели

В современной CAD-системе имеется возможность сохранить геометрию конструкции в любом формате. В подсистеме АСОНИКА-М-3D имеется возможность импорта данных, сохраненных в форматах *.IGS, *.STEP. Многообразие форматов для сохранения объясняется тем, что не из каждой CAD-системы можно безошибочно импортировать геометрию конструкции в том или ином формате в CAE-систему. Так, например, если конструкция была создана в Pro-Engineer, то для ее сохранения применяется формат IGS. При сохранении в SolidWorks наиболее безошибочным форматом для сохранения геометрии является формат STEP. Данная конструкция была сохранена в формате STEP.

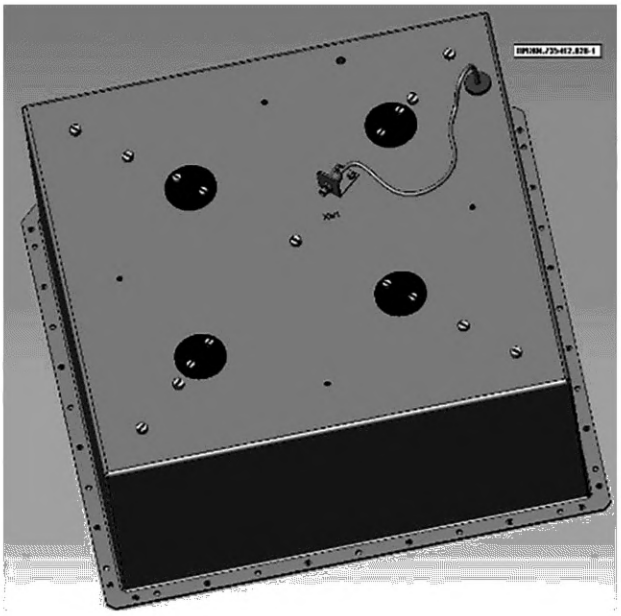


Рисунок А.8 — Исходная модель конструкции

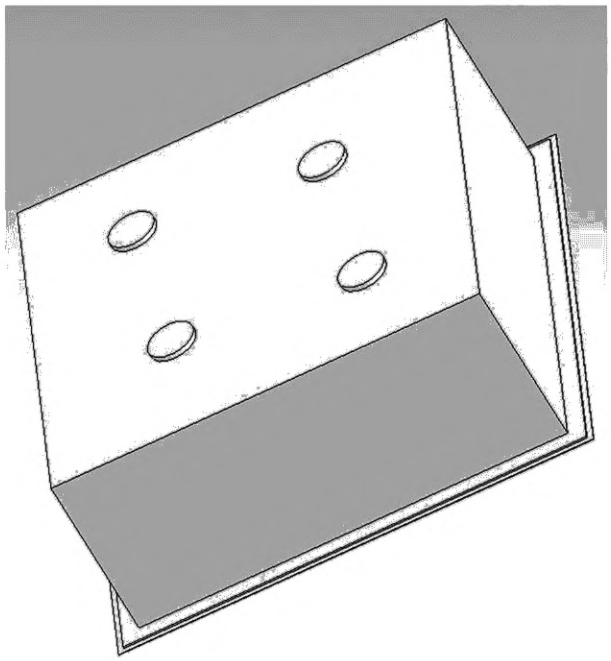


Рисунок А.9 — Идеализированная модель конструкции ЭА

А.2.3 Импорт в подсистему АСОНИКА-М-3D

В подсистеме АСОНИКА-М-3D создается новый проект, сохраняется, осуществляется переход к интерфейсу по работе с моделью, осуществляется импорт модели. Далее создается конечно-элементная модель, производится задание материалов конструкций и закреплений. На рисунке А.10 представлена конечно-элементная модель конструкции ЭА.

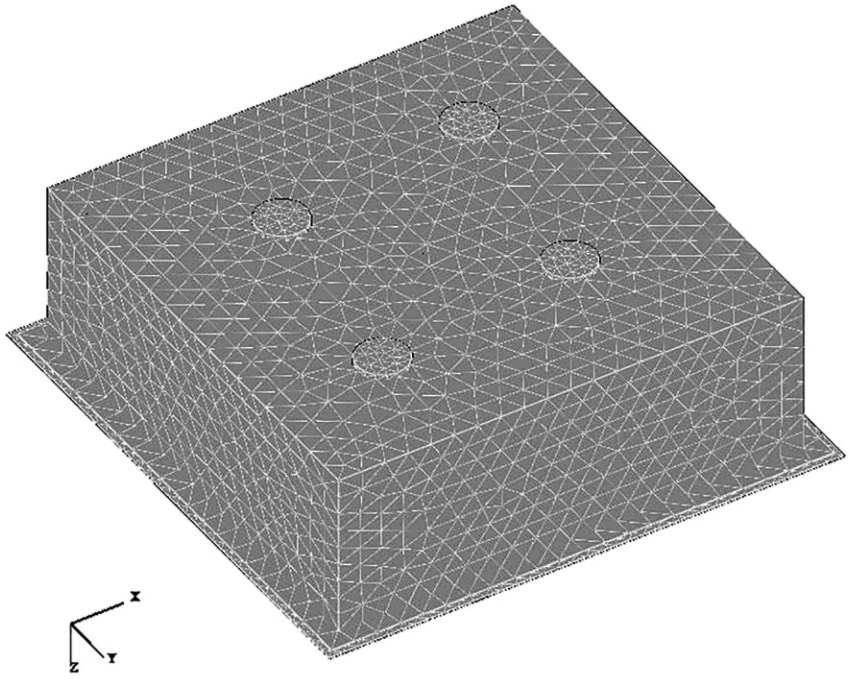


Рисунок А.10 — Модель, разбитая на конечные элементы

А.2.4 Задание параметров расчета

Далее производится задание параметров расчета. Интерфейс представлен на рисунке А.11. Цель расчета: определение первой резонансной частоты.

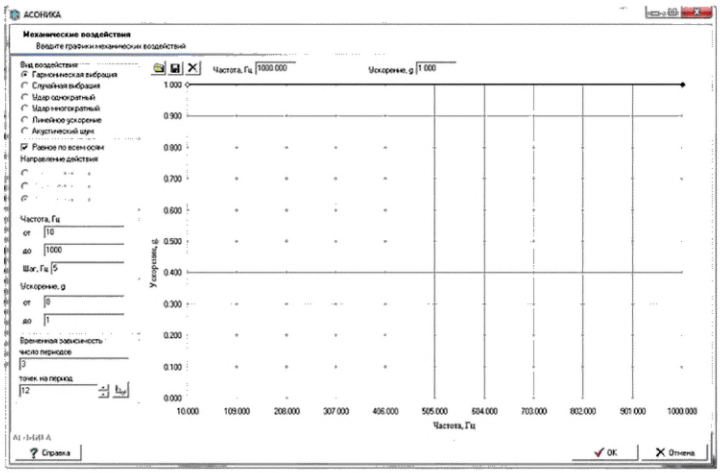


Рисунок А.11 — Параметры расчета

А.2.5 Анализ результатов

На рисунке А.12 представлено поле ускорений на резонансной частоте.

На рисунке А.13 представлен график, содержащий резонансную частоту. График построен на основании данных, содержащихся в узле модели, где возникают максимальные ускорения.

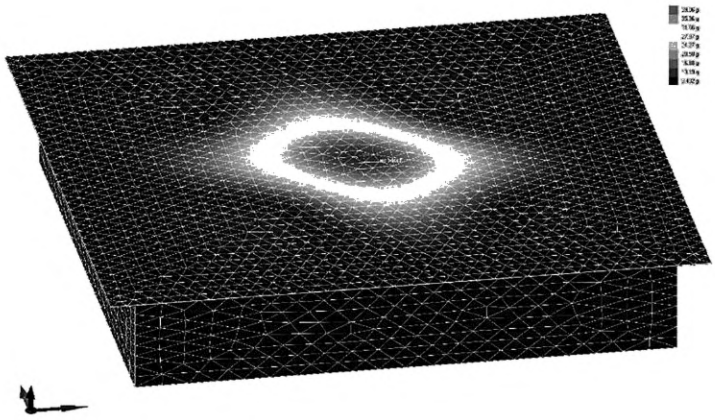


Рисунок А.12 — Поле ускорений на резонансной частоте

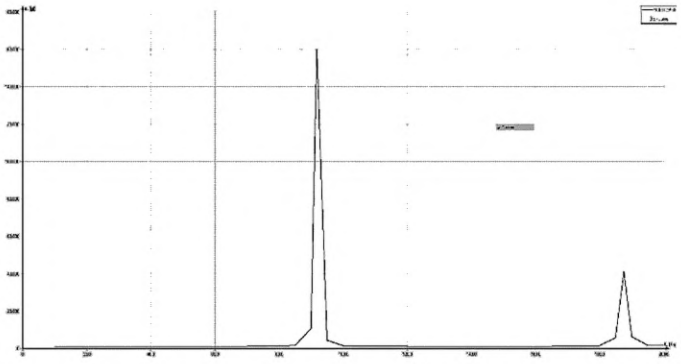


Рисунок А.13 — Резонансная частота

А.3 Рекомендации

Для устранения ошибок необходимо:

1) проверить всю модель на пересечения деталей друг относительно друга — пересечений деталей быть не должно;

2) «склеить» детали относительно друг друга;

3) у разъемов проверить зазор крепления деталей на рамки или другие поверхности крепления (пересечений быть не должно), т. е. когда одна деталь «заходит» на другую (они должны касаться друг друга);

4) разъемы с отверстиями («мама/папа») полностью заполнить материалом (не должны остаться штырьки и отверстия);

5) если есть отверстия в крепежных деталях разъемов, то отверстия этих деталей «залить» материалом;

6) не допускать вариантов, когда одна деталь касается другой по линии или точке (поверхностью касания двух деталей является линия или точка), т. е. одна деталь должна касаться другой по некой поверхности с какой-либо площадью.

Для упрощения необходимо:

1) убрать все крепежные детали, все винты;

2) убрать фаски, лыски, мелкие скругления (с радиусом ≤ 2 мм);

3) поверхности сложной формы — мелкие оребрения крупных поверхностей сделать гладкими;

4) если в модели есть шестигранники (в сечении детали шестигранник), например стойки этажерочной конструкции и другие, скруглить грани шестигранника радиусом скругления 1 мм;

5) после проведения перечисленных упрощений удалить («засупресить») все отверстия всех деталей, кроме крепежных отверстий прибора;

6) для проведенных упрощений «подогнать» массу прибора относительно настоящей массы прибора (плотностью деталей), а именно «подогнать массу печатных узлов», а также разъемов, входящих в состав прибора;

7) сохранить модель в формате STEP (при сохранении выбрать «solids» (твердые тела) в CAD-системе, в которой создавалась данная модель.

Приложение Б
(рекомендуемое)

Методика идентификации физико-механических параметров материалов ЭКБ и ЭА и параметров виброизоляторов

Для большинства материалов ЭКБ и ЭА в справочной литературе отсутствуют необходимые для моделирования физико-механические параметры материалов конструкций. Основными параметрами креплений в механической модели являются коэффициент жесткости и коэффициент механических потерь, которые в отдельных случаях могут сильно зависеть от температуры (например, в виброизоляторах). За исключением виброизоляторов информация о коэффициентах жесткости и КМП креплений практически отсутствует. Для виброизоляторов в справочной литературе задаются только коэффициенты жесткости и отсутствуют значения КМП. Необходимые для моделирования физико-механические параметры материалов конструкций могут быть получены путем идентификации.

В широком смысле идентификация — это установление соответствия между объектом, представленным некоторой совокупностью экспериментальных данных о его свойствах, и моделью объекта. В данном случае требуется сопоставлением экспериментальных данных и данных математического моделирования определить неизвестные физико-механические параметры материалов конструкций ЭКБ и ЭА. Наиболее плодотворными и перспективными являются методы идентификации, построенные на принципе настраиваемой модели. Основная идея этого подхода сводится к схеме, представленной на рисунке Б.1. Здесь X — механическое воздействие на конструкцию ЭКБ и ЭА; Y, $\overline{Y}$ — соответственно экспериментальная и расчетная (полученная моделированием на ЭВМ) зависимости амплитуды колебаний в контрольной точке конструкции от частоты; $\varepsilon = |Y - \overline{Y}|$ — ошибка. Эта общая схема включает в себя довольно широкий набор вариантов, которые различаются в основном организацией процесса настройки модели в смысле принятого критерия идентификации. Выбор такого критерия — сложная задача, во многом определяющая алгоритмы и техническую реализацию подобных схем. Наиболее распространены выражения критериев в виде интеграла квадрата ошибки.

Так как физико-механические параметры материалов конструкций, кроме демпфирующих для ударов и линейных ускорений, не зависят от вида механического воздействия, предлагается проводить идентификацию при гармонической вибрации. В этом случае критерий идентификации имеет вид

$$U = \int_{f_1}^{f_2} \varepsilon^2(f)df,$$

где f_1, f_2 — начальная и конечная частота диапазона гармонической вибрации соответственно;

f — текущее значение частоты.

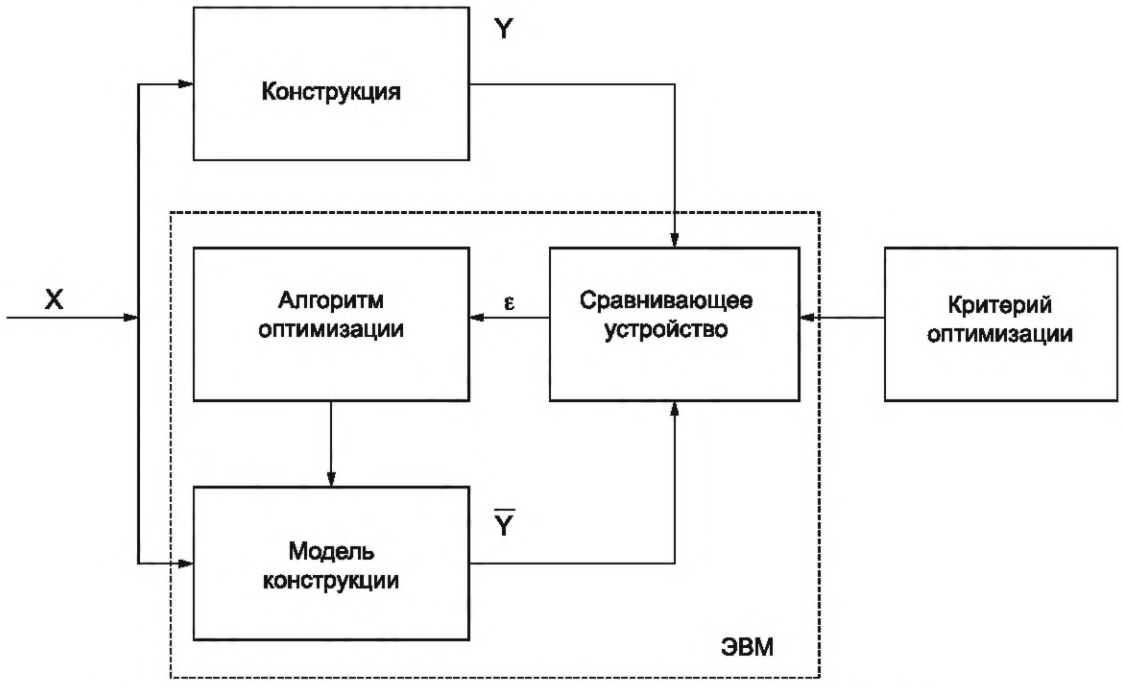


Рисунок Б.1 — Структурная схема идентификации на основе настраиваемой модели

Критерий идентификации демпфирующих характеристик для ударов и линейных ускорений имеет вид

$$U = \int_0^{t_1} \varepsilon^2(t)dt,$$

где t_1 — длительность ударного импульса;

t — текущее значение времени.

Задача идентификации формулируется в следующем виде: необходимо найти такие значения параметров математической модели, которые удовлетворяют минимуму функции цели и лежат в области допустимых значений параметров, т. е. задача идентификации сводится к задаче оптимизации. Функция цели имеет вид

$$H(\overline{Q}) = \sum_{i=1}^{m} (a_{0,i} - a_{p,i})^2,$$

где m — количество точек измерения по частоте;

$a_{0,i}$, $a_{p,i}$ — экспериментальное и расчетное значения виброускорения на i-й частоте для гармонической вибрации и в i-й момент времени для удара.

Для решения задачи идентификации используется компьютерный измерительный стенд, включающий вибростенд и ударный стенд. Вначале проводят эксперимент: испытуемое изделие устанавливают на вибростенд (ударный стенд) и с помощью вибродатчика (ударного датчика) (желательно бесконтактного, чтобы не вносить дополнительных погрешностей) и виброизмерительной (удароизмерительной) аппаратуры снимают зависимость амплитуды виброускорения (ударного ускорения) от частоты (времени) возмущающих колебаний (ударного импульса). Далее результаты эксперимента заносят в ЭВМ и путем оптимизации определяют параметры математической модели.

Идентификацию следует проводить последовательно в определенном порядке, так как желательно иметь как можно меньше неопределенных параметров (в лучшем случае — один). Эту последовательность можно проследить на конкретных примерах при идентификации физико-механических параметров материала прямоугольной пластины: модуля упругости, коэффициента Пуассона, γ_0 и k_σ. Ряд параметров идентифицируется с учетом температуры.

Для учета погрешности измерений определение температуры и зависимости амплитуды виброускорения (ударного ускорения) от частоты (времени) гармонической вибрации (удара) повторяют несколько раз, а температуру в эксперименте измеряют в нескольких точках платы и затем усредняют. Затем для значений экспериментально полученных вибровоздействий (ударных воздействий) и откликов на них определяют: математическое ожидание, среднее квадратическое отклонение, доверительный интервал. А затем находят погрешность выходного ускорения для каждого значения частоты (времени) как погрешность результатов косвенных измерений.

Б.1 Идентификация модуля упругости и коэффициента Пуассона

Б.1.1 Прямоугольную пластину жестко закрепляют винтами по четырем углам на столе вибростенда.

Б.1.2 Экспериментально без нагрева определяют первую резонансную частоту пластины.

Б.1.3 С помощью подсистемы «ИДЕНТИФИКАЦИЯ» (например, АСОНИКА-ИД) проводят настройку модели механических процессов (ММП) пластины на экспериментально определенную резонансную частоту. Варьируемыми параметрами при оптимизации являются модуль упругости и коэффициент Пуассона. Коэффициент жесткости опор принимается бесконечно большим, так как винты максимально зажаты. Отсутствие данных по КМП не влияет на результаты идентификации, так как для определения модуля упругости и коэффициента Пуассона достаточно только совпадение резонансных частот и совсем не обязательно совпадение амплитуд виброускорений. Это связано с тем, что в ММП пластины КМП практически не влияет на резонансные частоты. Остальные параметры — геометрические размеры, плотность — известны.

Б.1.4 Измерения по Б.1.2—Б.1.3 повторяют при трех значениях температуры поверхности пластины. Коэффициент Пуассона идентифицируется только без нагрева.

Б.1.5 По результатам идентификации строят зависимость модуля упругости от температуры. Далее по методу наименьших квадратов определяют коэффициенты аналитической зависимости модуля упругости от температуры.

Б.2 Идентификация КМП

Б.2.1 Аналогично Б.1.1.

Б.2.2 С датчика в центре пластины без нагрева снимается экспериментально зависимость амплитуды виброускорения (ударного ускорения) от частоты (времени).

Б.2.3 С помощью подсистемы «ИДЕНТИФИКАЦИЯ» проводят настройку ММП пластины на экспериментальную зависимость. При этом идентифицируются γ_0^{20} и k_σ^{20}.

Б.2.4 Измерения, аналогичные Б.2.3, повторяют при трех значениях температуры поверхности пластины.

Б.2.5 По результатам идентификации строят зависимости γ_0 и k_σ от температуры для вибрации и удара. Далее определяют коэффициенты аналитических зависимостей (формулы (1) и (2)) k_γ и K_K соответственно.

Б.3 Идентификация параметров виброизоляторров

Необходимость идентифицировать параметры виброизоляторов в зависимости от температуры окружающей среды отпадает, так как эта зависимость выражена очень слабо.

Б.3.1 Макет изделия устанавливают на виброизоляторы по четырем углам на столе вибростенда.

Б.3.2 Приспособление крепят на столе вибростенда таким образом, чтобы вибрация действовала по оси Z.

Б.3.3 Датчик ускорения устанавливают на крышку макета изделия. Снимают зависимость ускорения датчика от частоты гармонической вибрации по оси Z.

Б.3.4 С помощью подсистемы «ИДЕНТИФИКАЦИЯ» (например, модуля АСОНИКА-В) проводят настройку модели ММП макета изделия на виброизоляторах на зависимость ускорения датчика от частоты гармонической вибрации по оси Z.

Б.3.5 По результатам идентификации определяют следующие параметры виброизоляторов, которые записывают в базу данных и в дальнейшем используют при моделировании:

- коэффициент жесткости по оси X;
- коэффициент жесткости по оси Y;
- коэффициент жесткости по оси Z;
- КМП по оси X для линейного участка зависимости КМП от напряжения изгиба σ_u при $\sigma_u = 0$;
- КМП по оси Y для линейного участка зависимости КМП от напряжения изгиба σ_u при $\sigma_u = 0$;
- КМП по оси Z для линейного участка зависимости КМП от напряжения растяжения-сжатия $\sigma_{P\text{-}C}$ при $\sigma_{P\text{-}C} = 0$;
- коэффициент зависимости КМП по оси X от напряжения изгиба;
- коэффициент зависимости КМП по оси Y от напряжения изгиба;
- коэффициент зависимости КМП по оси Z от напряжения растяжения-сжатия.

Приложение В
(справочное)

Пример идентификации физико-механических параметров материалов ЭКБ и ЭА

В.1 Идентификация параметров для крышки микросхемы

Крышка микросхемы закреплена на корпусе в четырех местах (см. рисунок В.1). Необходимо провести идентификацию в точке и в диапазоне частот гармонической вибрации всех возможных физико-механических параметров при помощи подсистемы АСОНИКА-ИД.

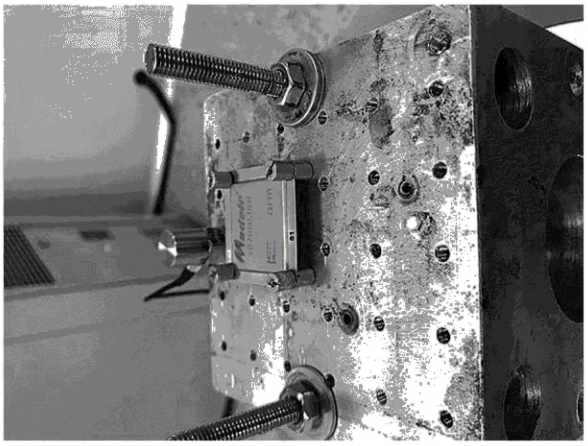


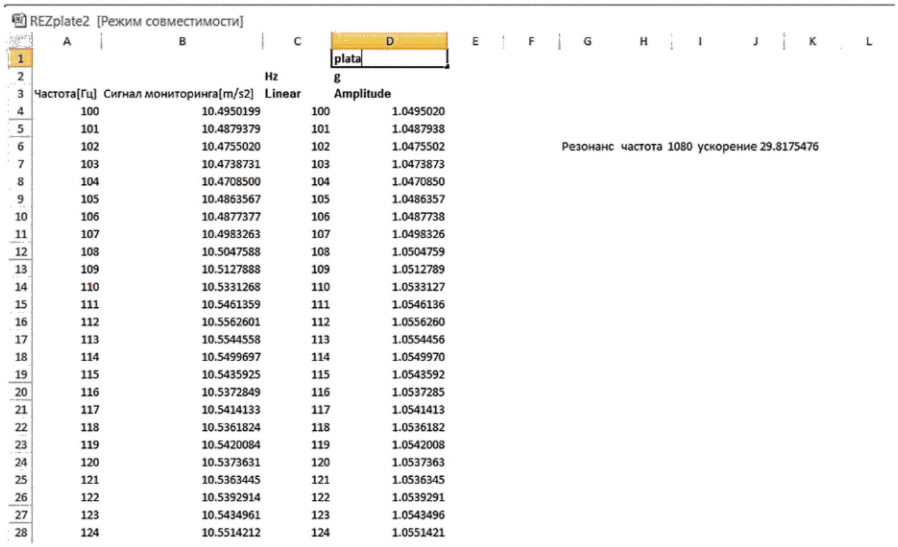
Рисунок В.1 — Крепление крышки микросхемы

В.2 Определение параметров пластинки:

Длина, мм: 39,6;
Ширина, мм: 39,6;
Толщина, мм: 0,5;
Размер дискрета: 2;
Количество элементов крепления: 4;
Диаметр элементов крепления, мм: 3;
Отступ от края пластинки, мм: 5.
Файл с экспериментальными данными представлен на рисунке В.2.

В.3 Начальные параметры материала:

Модуль упругости материала, ГПа: 30;
Коэффициент Пуассона материала, отн. ед.: 0.4;
Коэффициент механических потерь (КМП) для линейного участка зависимости КМП от напряжения изгиба σ_u при σ_u = 0 gamma0, отн. ед.: 0,01;
Коэффициент зависимости КМП от напряжения ksigma, отн. ед.: 1E-9;
Плотность материала, кг/м^3: 7251.
Диапазон изменения параметров материала при проведении сеанса идентификации модуля упругости и коэффициента Пуассона:
Модуль упругости, ГПа: от 20 до 40;
Коэффициент Пуассона, отн. ед.: от 0,3 до 0,45;
Количество итераций: 15;
Ошибка, Гц: 10;
Резонансная частота (экспериментальная), Гц: 1080.
Диапазон изменения параметров материала при проведении сеанса идентификации gamma0 и ksigma:
gamma0, отн. ед.: от 0,005 до 0,035;
ksigma, отн. ед.: от 1E-9 до 1E-6;
Количество итераций: 30;
Ошибка, Гц: 1;
Резонансное ускорение (экспериментальное), g: 29.8175476.



REZplate2 [Режим совместимости]

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1				plata								
2			Hz	g								
3	Частота[Гц]	Сигнал мониторинга[m/s2]	Linear	Amplitude								
4	100	10.4950199	100	1.0495020								
5	101	10.4879379	101	1.0487938								
6	102	10.4755020	102	1.0475502			Резонанс	частота	1080	ускорение	29.8175476	
7	103	10.4738731	103	1.0473873								
8	104	10.4708500	104	1.0470850								
9	105	10.4863567	105	1.0486357								
10	106	10.4877377	106	1.0487738								
11	107	10.4983263	107	1.0498326								
12	108	10.5047588	108	1.0504759								
13	109	10.5127888	109	1.0512789								
14	110	10.5331268	110	1.0533127								
15	111	10.5461359	111	1.0546136								
16	112	10.5562601	112	1.0556260								
17	113	10.5544558	113	1.0554456								
18	114	10.5499697	114	1.0549970								
19	115	10.5435925	115	1.0543592								
20	116	10.5372849	116	1.0537285								
21	117	10.5414133	117	1.0541413								
22	118	10.5361824	118	1.0536182								
23	119	10.5420084	119	1.0542008								
24	120	10.5373631	120	1.0537363								
25	121	10.5363445	121	1.0536345								
26	122	10.5392914	122	1.0539291								
27	123	10.5434961	123	1.0543496								
28	124	10.5514212	124	1.0551421								

Рисунок В.2 — Результат эксперимента

Необходимо ввести эти данные в подсистему АСОНИКА-ИД (рисунок В.3), провести расчет. Результаты представлены на рисунке В.4 и рисунке В.5. Входные данные и полученные значения следует внести в отчеты с помощью возможностей подсистемы АСОНИКА-ИД (рисунок В.10, рисунок В.11).

Далее следует перейти к графическому расчету, для чего необходимо ввести диапазон частот от 100 до 2000 Гц с шагом 10, диапазон амплитуды воздействия от 1 до 1 g, отметив галочкой «абсолютные значения», и затем «масштабировать сетку автоматически» (рисунок В.6). После расчета необходимо дать отображение расчетного графика. В результате получается график, представленный на рисунке В.7 (его можно сохранить с помощью соответствующей функции). Далее следует загрузить экспериментальный график, указав путь к нему и столбец с необходимой переменной. Результат представлен на рисунке В.8.

Далее необходимо определить резонансные частоты при расчете (см. рисунок В.9).

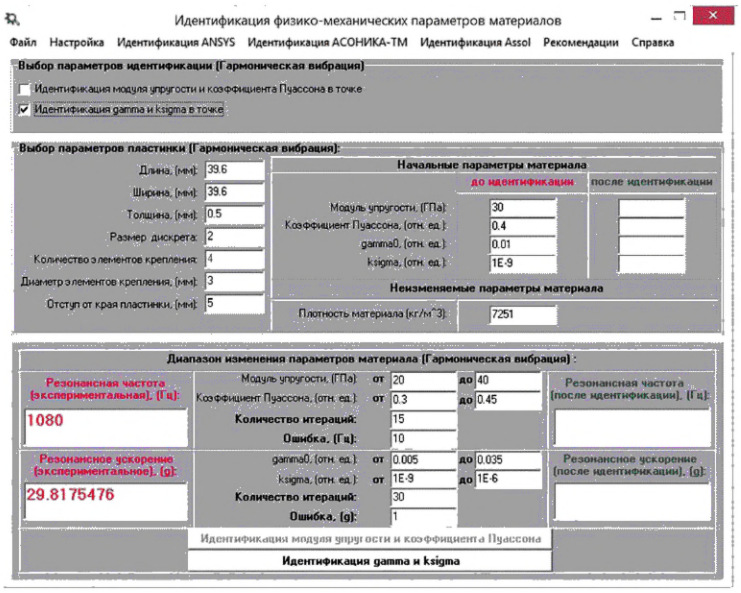


Рисунок В.3 — Входные данные

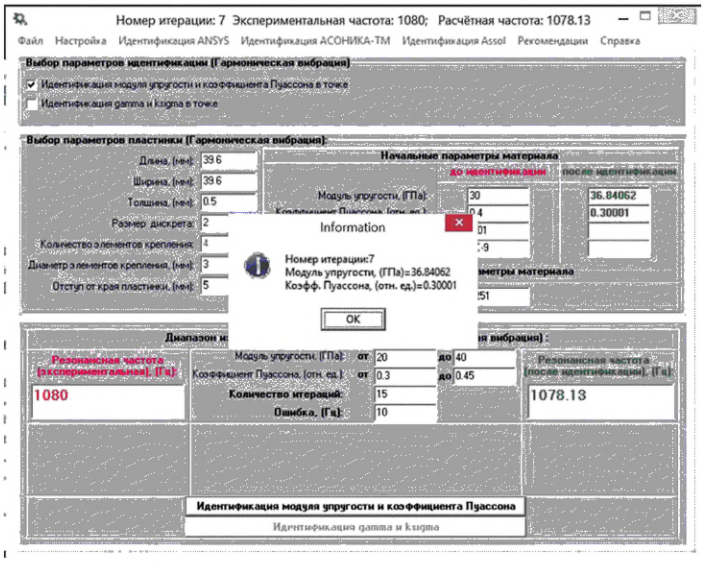


Рисунок В.4 — Определение модуля упругости, коэффициента Пуассона и расчетной резонансной частоты

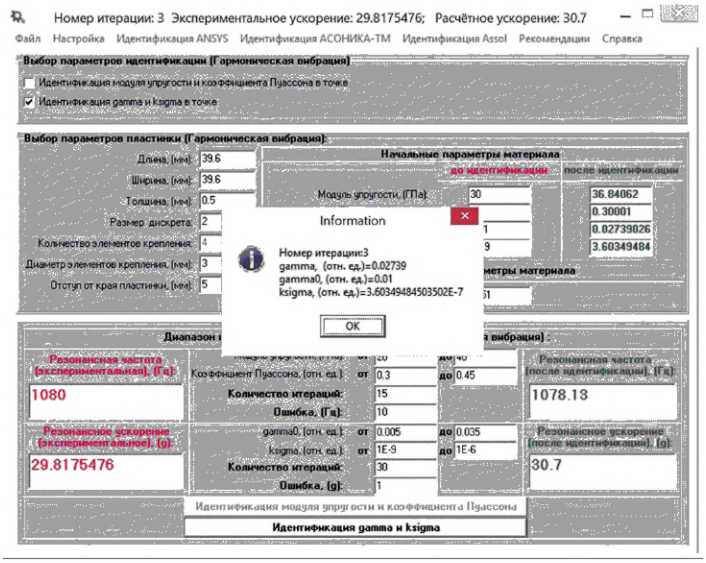


Рисунок В.5 — Определение gamma, ksigma и расчетного ускорения

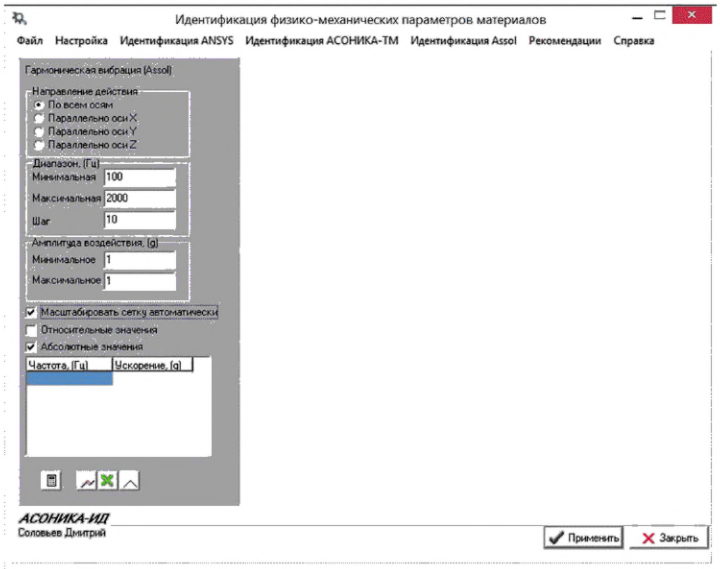


Рисунок В.6 — Запуск графического расчета

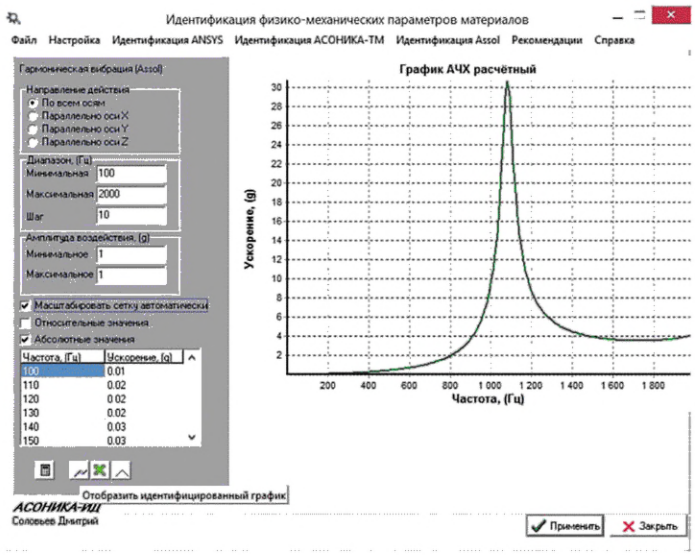


Рисунок В.7 — Расчетный график

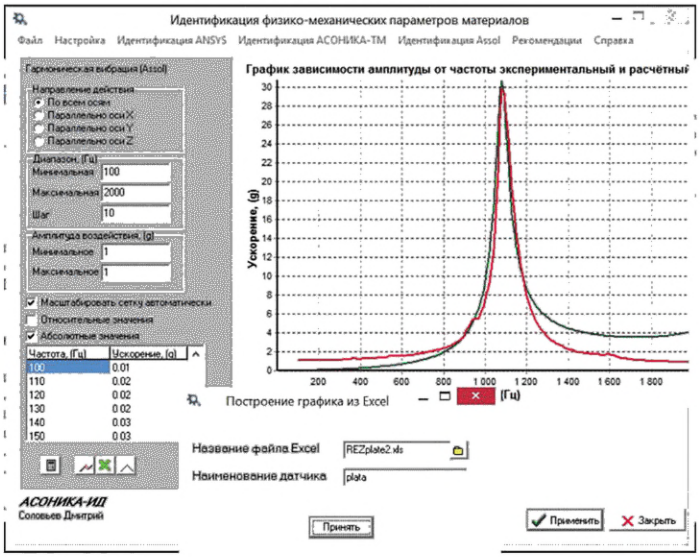


Рисунок В.8 — Построение экспериментального графика

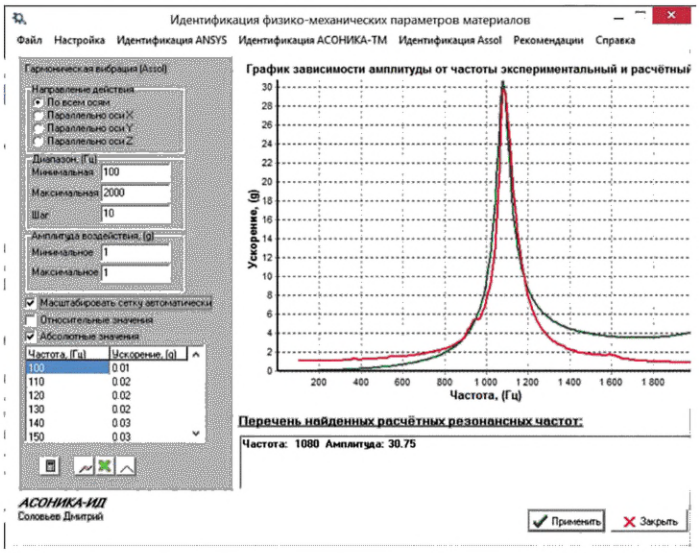


Рисунок В.9 — Резонансные частоты при расчете

Файл входных данных параметров идентификации при гармонической вибрации

Определение параметров пластинки:

Длина, (мм): 39,6
Ширина, (мм): 39,6
Толщина, (мм): 0,5
Размер дискрета: 2
Количество элементов крепления: 4
Диаметр элементов крепления, (мм): 3
Отступ от края пластинки, (мм): 5

Начальные параметры материала:

Модель упругости материала, (ГПа): 30
Коэффициент Пуассона материала, (отн.ед.): 0,4
gamma0, (отн.ед.): 0,01
ksigma, (отн. ед.): 1E-9
Плотность материала, (кг/м^3): 7251

Диапазон изменения параметров материала при проведении сеанса идентификации модуля упругости и коэффициента Пуассона:

Модель упругости, (ГПа): от 20 до 40
Коэффициент Пуассона, (отн.ед.): от 0,3 до 0,45
Количество итераций: 15
Ошибка, (Гц): 10
Резонансная частота (экспериментальная), (Гц): 1080

Диапазон изменения параметров материала при проведении сеанса идентификации gamma 0 и ksigma:

gamma 0 , (отн. ед.): от 0,005 до 0,035
ksigma, (отн. ед.): от 1E-9 до 1E-6
Количество итераций: 30
Ошибка, (Гц): 1
Резонансное ускорение (экспериментальное), (g): 29.8175476

Рисунок В.10 — Отчет с входными данными

Файл результатов идентификации при воздействии гармонической вибрации

Результаты идентификации модуля упругости и коэффициента Пуассона:

Модуль упругости материала, (ГПа): 36,84062

Коэффициент Пуассона материала, (отн.ед.): 0,30001

Результаты идентификации gamma и ksigma:

gamma, (отн. ед.): 0.0273902679095045

ksigma, (отн. ед.): 3.60349484503502E-7

Результаты по ускорению и частоте до и после идентификации:

Резонансная частота (экспериментальная), (Гц): 1080

Резонансное ускорение (экспериментальное), (g): 29,8175476

Резонансная частота (после идентификации), (Гц): 1078,13

Резонансное ускорение (после идентификации), (g): 30,7

Рисунок В.11 — Отчет с результатами расчета

Приложение Г
(справочное)

Пример идентификации параметров виброизоляторов в подсистеме АСОНИКА-В

Г.1 Задача расчета

Используя результаты испытаний на вибрацию макета картографа, установленного на виброизоляторах АТРМ 20/70-4, необходимо идентифицировать с помощью подсистемы АСОНИКА-В следующие параметры виброизолятора: коэффициенты жесткости и КМП по трем направлениям.

Г.2 Данные для расчета:

Эскиз конструкции макета картографа (рисунок Г.1).

Масса макета: 5,5 кг.

Габаритные размеры: 300 × 152 × 60 мм.

Результаты испытаний макета на воздействие гармонической вибрации в трех направлениях: по осям X, Y, Z (таблица Г.1).

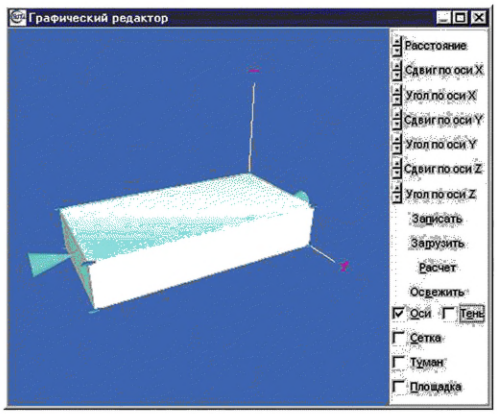


Рисунок Г.1 — Эскиз конструкции макета картографа

Таблица Г.1 — Результаты испытаний макета

Частота вибрации, Гц	Амплитуда виброускорения, м/с^2 (g)	Показание датчика, м/с^2 (g), при направлении вибрации		
		X	Y	Z
20	19,6 (2)	2,95	2,7	2,9
25	- " -	3,0	3,5	1,45
31,5	- " -	1,6	4,7	0,8
40	29,5 (3)	1,0	7,8	1,0
50	- " -	0,8	2,2	0,59
63	- " -	0,6	1,7	0,52
80	- " -	0,34	1,4	0,23
100	- " -	0,16	0,6	0,16
125	- " -	0,09	0,72	0,9
160	- " -	0,18	0,26	0,11
200	- " -	0,12	0,45	0,1
250	- " -	0,04	0,29	0,042
315	- " -	0,064	0,19	0,038
400	- " -	0,34	0,3	0,16
500	- " -	0,13	0,17	0,032

Г.3 Анализ исходных данных

Так как заданы разные значения входных ускорений (2g и 3g), для проведения идентификации удобнее перейти к амплитудно-частотной характеристике (АЧХ), представляющей собой частотную зависимость отношения выходного ускорения к входному. АЧХ приведена в таблице Г.2.

Таблица Г.2 — АЧХ

Частота вибрации, Гц	Отношение выходного ускорения к входному, при направлении вибрации		
	X	Y	Z
20	1,47	1,35	1,45
25	1,5	1,75	0,72
31,5	0,8	2,35	0,4
40	0,33	2,6	0,33
50	0,26	0,73	0,19
63	0,20	0,56	0,17
80	0,11	0,46	0,07
100	0,05	0,2	0,05
125	0,03	0,24	0,03
160	0,06	0,087	0,036
200	0,04	0,15	0,033
250	0,013	0,097	0,014
315	0,021	0,063	0,014
400	0,113	0,1	0,053
500	0,043	0,057	0,011

Г.4 Результаты расчета

Путем идентификации были получены следующие параметры виброизолятора АТРМ 20/70-4: коэффициенты жесткости и КМП по трем направлениям. Результаты идентификации приведены в таблице Г.3.

Таблица Г.3 — Параметры виброизолятора АТРМ 20/70-4, полученные по результатам идентификации

Направление оси координат	Коэффициент жесткости, Н/м	КМП, отн.ед.
X	50000	0,6
Y	160000	0,27
Z	29000	0,5

Результаты расчета макета по параметрам таблицы Г.3 приведены на рисунках Г.2—Г.3.

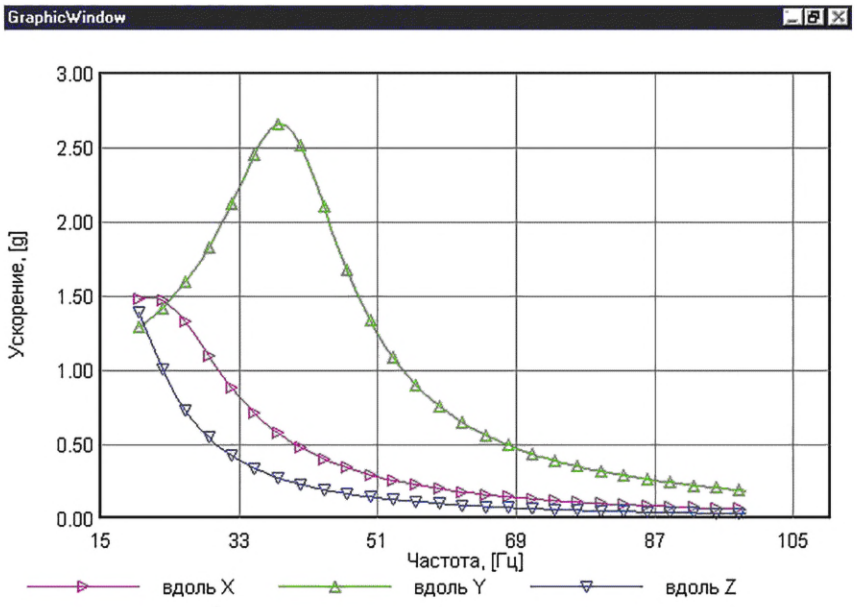


Рисунок Г.2 — АЧХ макета в диапазоне 20 … 100 Гц

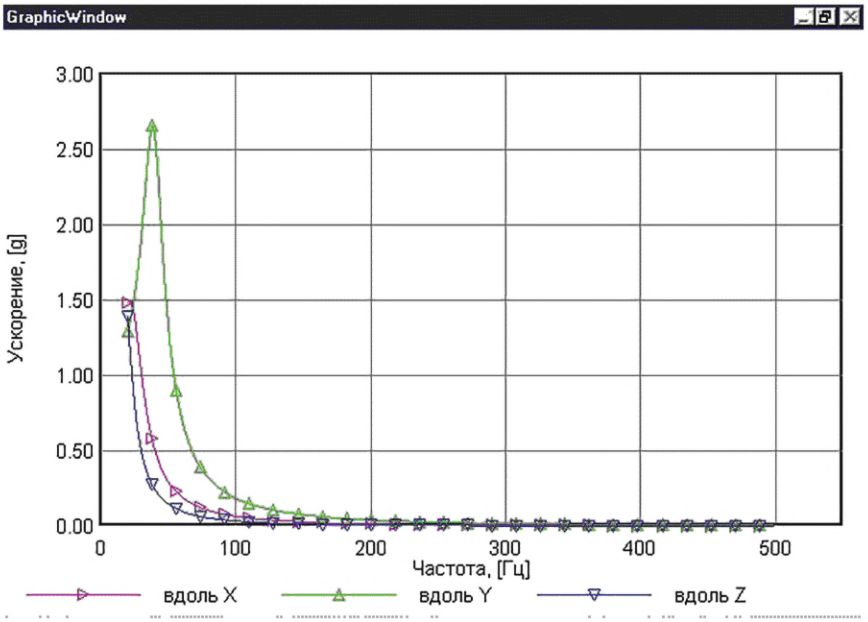


Рисунок Г.3 — АЧХ макета в диапазоне 20…500 Гц

Г.5 Выводы

Полученные путем идентификации параметры виброизолятора АТРМ 20/70-4 приведены в таблице Г.3 и могут быть использованы при моделировании на ЭВМ с помощью системы АСОНИКА конструкций приборов, установленных на виброизоляторах данного типа, при механических воздействиях.

Приложение Д
(справочное)

Примеры моделирования механических процессов в ЭКБ и ЭА с помощью системы АСОНИКА

Д.1 Моделирование механических характеристик печатных узлов 191 и 192 при воздействии гармонической вибрации и сравнение полученных результатов с экспериментальными значениями

Д.1.1 Задача расчета

Необходимо провести с помощью системы АСОНИКА-ТМ моделирование механических характеристик двух печатных узлов 191 и 192 при воздействии гармонической вибрации и сравнить полученные результаты с экспериментальными значениями.

Д.1.2 Данные для расчета:

Данными являются чертежи конструкций печатных узлов (рисунок Д.1, рисунок Д.2); перечни элементов; выходные файлы PCAD; параметры гармонической вибрации: 5…500 Гц, 5g.

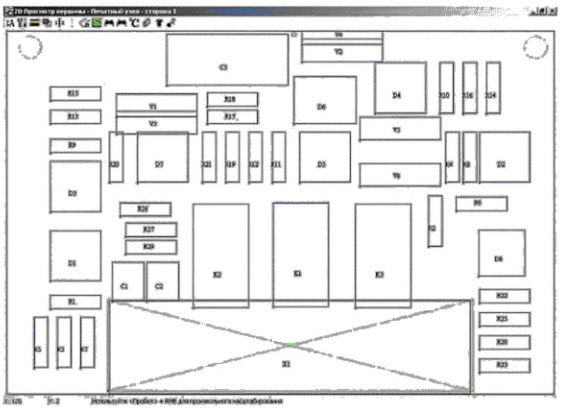


Рисунок Д.1 — Изображение печатного узла 191 в графическом редакторе подсистемы АСОНИКА-ТМ

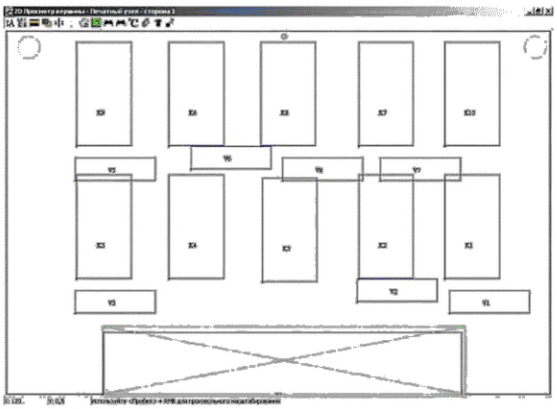


Рисунок Д.2 — Изображение печатного узла 192 в графическом редакторе подсистемы АСОНИКА-ТМ

Д.1.3 Результаты расчета

Размещение электрорадиоизделий (ЭРИ) было автоматически считано подсистемой АСОНИКА-ТМ из выходных файлов PCAD. Затем были заданы крепления (на рисунке Д.1, рисунке Д.2 окрашены в зеленый цвет) и контрольные точки (на рисунке Д.1, рисунке Д.2 показаны красным кружком). Контрольные точки имитируют вибродатчики.

Было задано входное механическое воздействие (см. рисунок Д.3).

Результаты моделирования представлены на рисунках Д.4—Д.9.

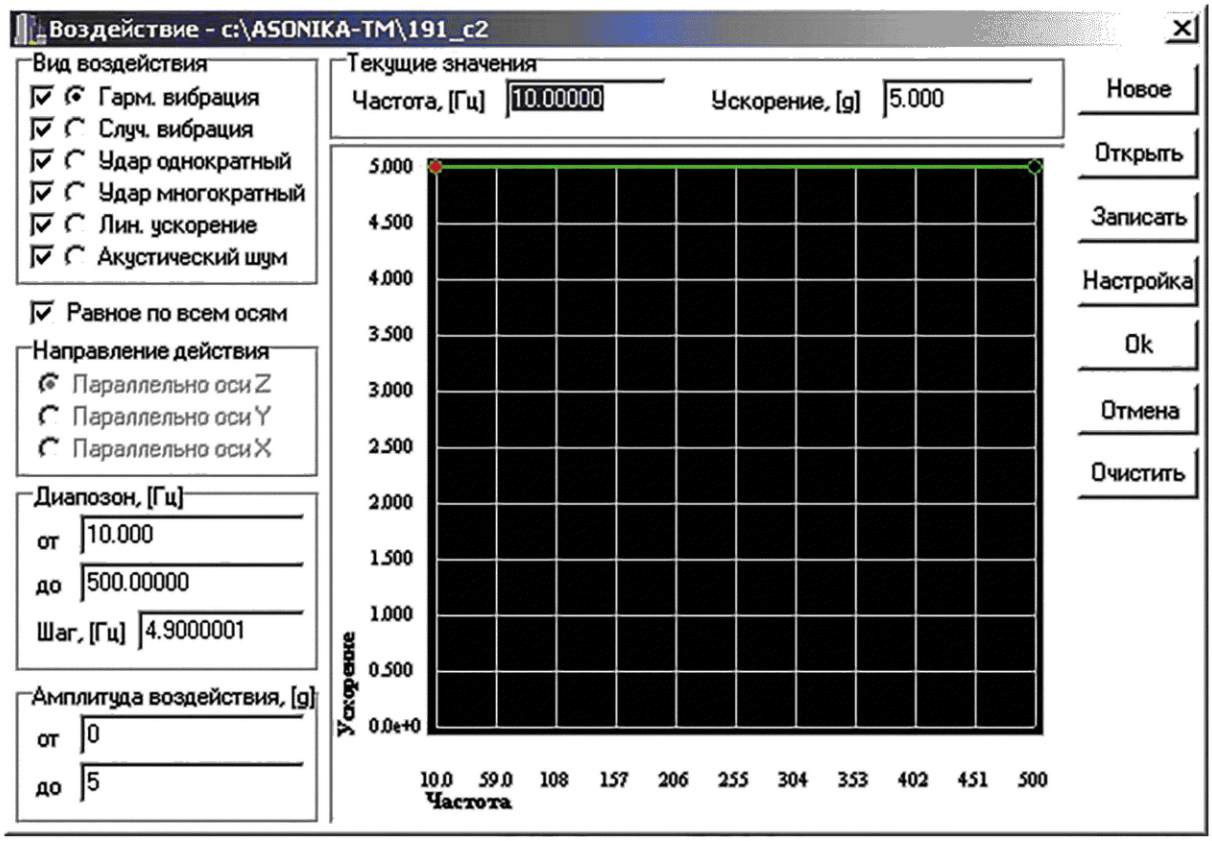


Рисунок Д.3 — Заданное входное вибрационное воздействие

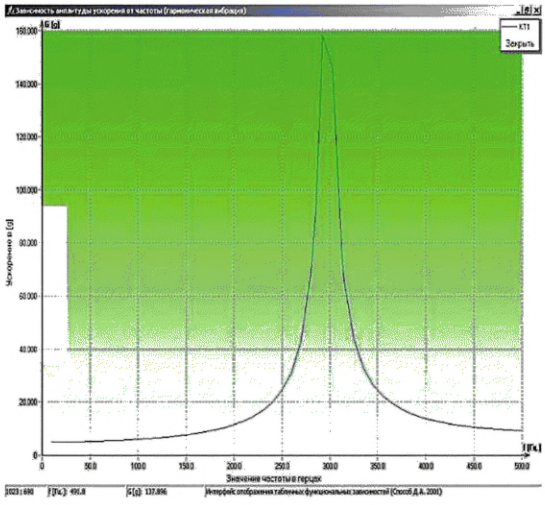


Рисунок Д.4 — Зависимость виброускорения в контрольной точке от частоты для печатного узла 191

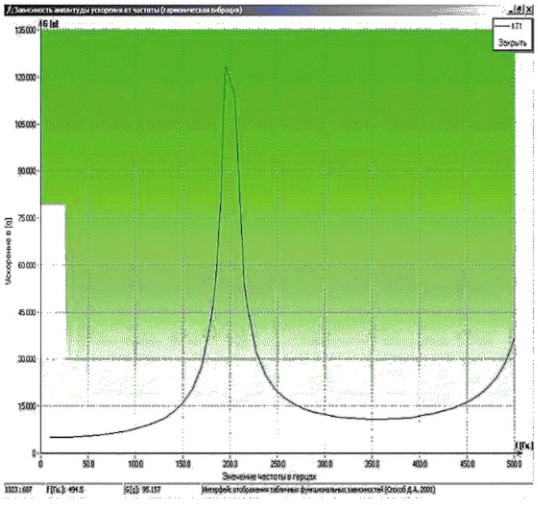


Рисунок Д.5 — Зависимость виброускорения в контрольной точке от частоты для печатного узла 192

N П/П	ОБОЗНАЧЕНИЕ ЭРЭ	УСКОРЕНИЕ ЭРЭ: ЧАСТОТА, [Гц]	УСКОРЕНИЕ ЭРЭ: МАКСИМАЛЬНОЕ РАСЧЕТНОЕ, [G]	УСКОРЕНИЕ ЭРЭ: МАКСИМАЛЬНОЕ ДОПУСТИМОЕ ПО ТУ, [G]	КОЭФ-ЕНТ МЕХАНИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ ЭРЭ, [ОТ.ЕД.]	ПЕРЕГРУЗКА ЭРЭ, [G]
1	2	3	4	5	6	7
1	C1	292.50	7.81	30.00	0.260	
. .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .
3	C3	292.50	137.18	30.00	4.573	107.18
4	D1	292.50	9.51	30.00	0.317	
. .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .
7	D4	292.50	89.13	30.00	2.971	59.13
8	D5	292.50	99.27	30.00	3.309	69.27
9	D6	292.50	133.18	30.00	4.439	103.18
10	D7	292.50	67.90	30.00	2.263	37.90
. .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .
12	K1	292.50	29.83	30.00	0.994	
. .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .
15	R1	500.00	5.51	30.00	0.184	
. .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .
18	R4	292.50	33.72	30.00	1.124	3.72
. .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .
24	R10	292.50	46.74	30.00	1.558	16.74
25	R11	292.50	105.76	30.00	3.525	75.76
26	R12	292.50	104.27	30.00	3.476	74.27
. .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .
30	R16	292.50	31.68	30.00	1.056	1.68
31	R17	292.50	121.98	30.00	4.066	91.98
32	R18	292.50	134.62	30.00	4.487	104.62
33	R19	292.50	100.95	30.00	3.365	70.95
34	R20	292.50	41.91	30.00	1.397	11.91
35	R21	292.50	91.94	30.00	3.065	61.94
. .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .
39	R26	292.50	36.71	30.00	1.224	6.71
. .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .
43	V1	292.50	82.18	30.00	2.739	52.18
44	V2	292.50	137.09	30.00	4.570	107.09
45	V3	292.50	78.09	30.00	2.603	48.09
46	V4	292.50	137.80	30.00	4.593	107.80
47	V5	292.50	77.92	30.00	2.597	47.92
48	V6	292.50	58.64	30.00	1.955	28.64
49	X1	290.00	5.00	30.00	0.167	

Рисунок Д.6 — Карта механических режимов работы ЭРИ для печатного узла 191 (при гармонической вибрации)

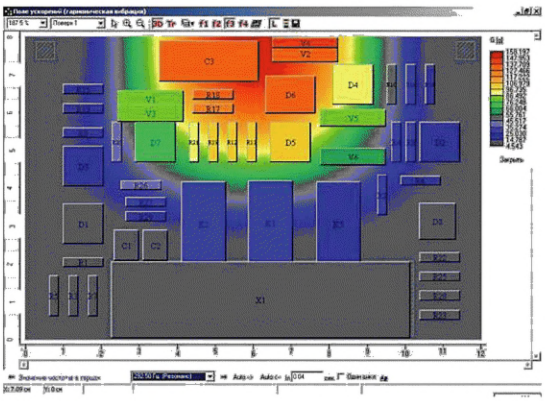


Рисунок Д.7 — Поле виброускорений в печатном узле 191 на резонансной частоте

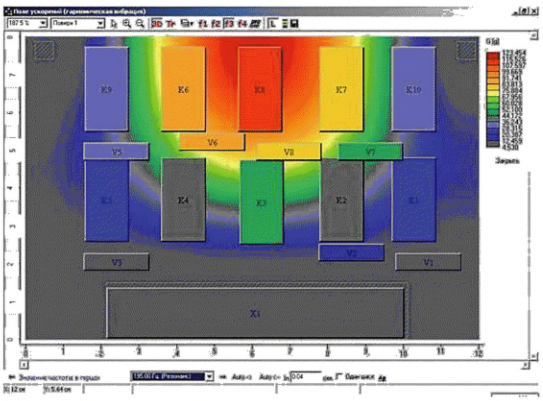


Рисунок Д.8 — Поле виброускорений в печатном узле 192 на резонансной частоте

N П/П	ОБОЗНАЧЕНИЕ Э Р Э	УСКОРЕНИЕ Э Р Э ЧАСТОТА, [Гц]	МАКСИМАЛЬНОЕ РАСЧЕТНОЕ, [G]	МАКСИМАЛЬНОЕ ДОПУСТИМОЕ ПО Т У, [G]	КОЭФ-ЕНТ МЕХАНИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ Э Р Э, [ОТ.ЕД.]	ПЕРЕГРУЗКА Э Р Э, [G]
1	2	3	4	5	6	7
1	K1	500.00	32.03	30.00	1.068	2.03
2	K2	195.00	40.27	30.00	1.342	10.27
3	K3	195.00	50.18	30.00	1.673	20.18
4	K4	195.00	42.38	30.00	1.413	12.38
5	K5	500.00	32.28	30.00	1.076	2.28
6	K6	195.00	89.97	30.00	2.999	59.97
7	K7	195.00	83.65	30.00	2.788	53.65
8	K8	195.00	113.86	30.00	3.795	83.86
9	K9	195.00	33.65	30.00	1.122	3.65
10	K10	195.00	31.01	30.00	1.034	1.01
11	V1	500.00	17.07	30.00	0.569	
. .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .
14	V5	195.00	36.04	30.00	1.201	6.04
15	V6	195.00	84.39	30.00	2.813	54.39
16	V7	195.00	50.71	30.00	1.690	20.71
17	V8	195.00	82.00	30.00	2.733	52.00
18	X1	192.50	5.00	30.00	0.167	

Рисунок Д.9 — Карта механических режимов работы ЭРИ для печатного узла 192

В таблице Д.1 приведены результаты сравнения расчетных и экспериментальных результатов для печатного узла 191. В таблице Д.2 приведены результаты сравнения расчетных и экспериментальных результатов для печатного узла 192.

Таблица Д.1 — Сравнение расчетных и экспериментальных результатов для печатного узла 191

№ п/п	Характеристика	Расчетное значение	Экспериментальное значение	Погрешность, %
1	Резонансная частота	292 Гц	300 Гц	2,6
2	Виброускорение в контрольной точке	158g	150 g	5,3

Таблица Д.2 — Сравнение расчетных и экспериментальных результатов для печатного узла 192

№ п/п	Характеристика	Расчетное значение	Экспериментальное значение	Погрешность, %
1	Резонансная частота	195 Гц	184 Гц	6
2	Виброускорение в контрольной точке	124 g	150 g	17

Д.1.4 Выводы

В результате сравнения расчетных и экспериментальных результатов было получено, что погрешность расчетов для печатного узла 191 составляет 2,6 % по частоте и 5,3 % по амплитуде. Погрешность расчетов для печатного узла 192 составляет 6 % по частоте и 17 % по амплитуде. Погрешность расчетов в подсистеме АСОНИКА-ТМ является вполне удовлетворительной для инженерных расчетов.

Таким образом, система АСОНИКА-ТМ может быть использована при проектировании конструкций электронной аппаратуры на предприятии.

Д.2 Фрагменты расчета резонансных частот шкафа

Фрагменты расчета резонансных частот шкафа представлены на рисунках Д.10—Д.13.

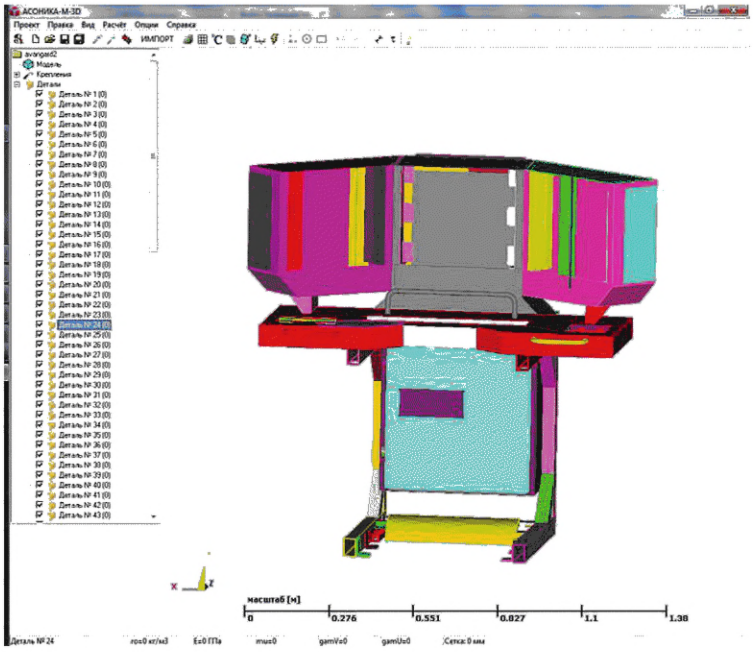


Рисунок Д.10 — Внешний вид шкафа

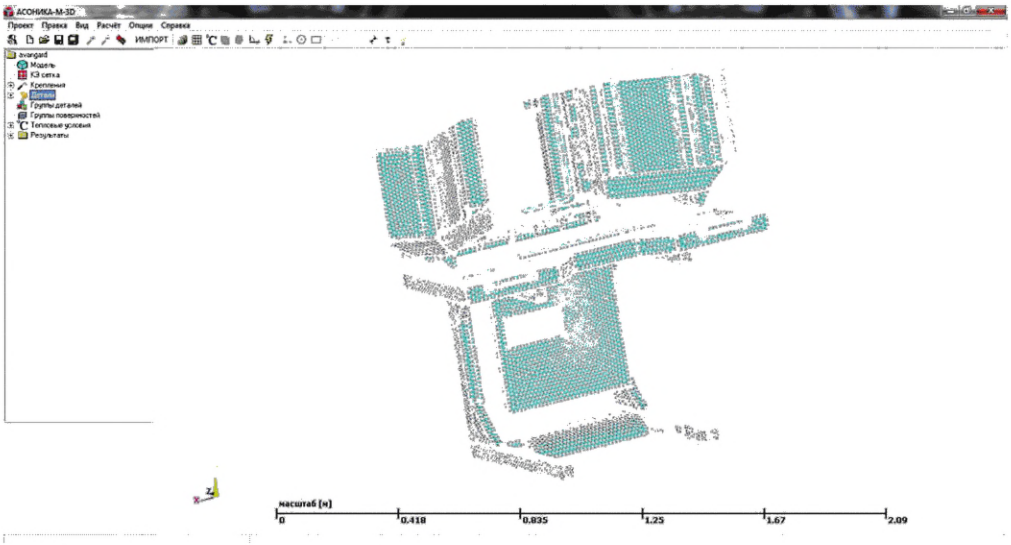


Рисунок Д.11 — Конечно-элементная модель шкафа

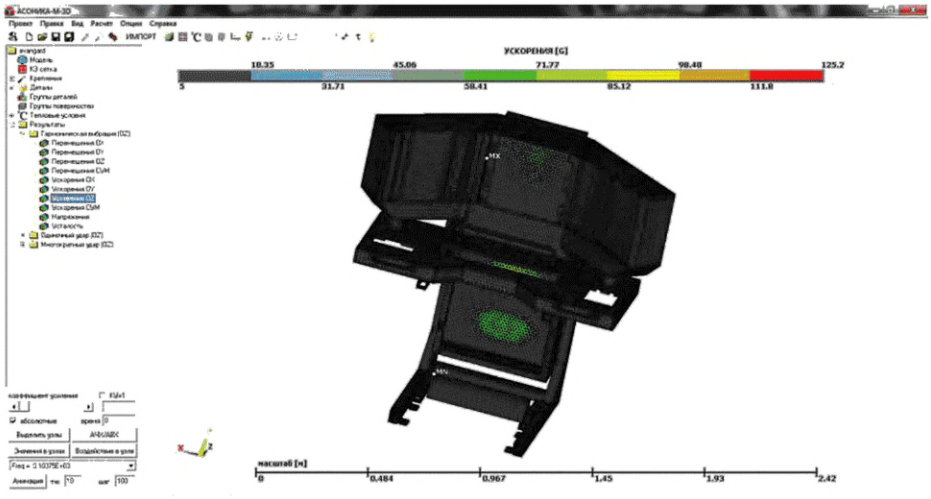


Рисунок Д.12 — Ускорения по оси Z на частоте 103 Гц

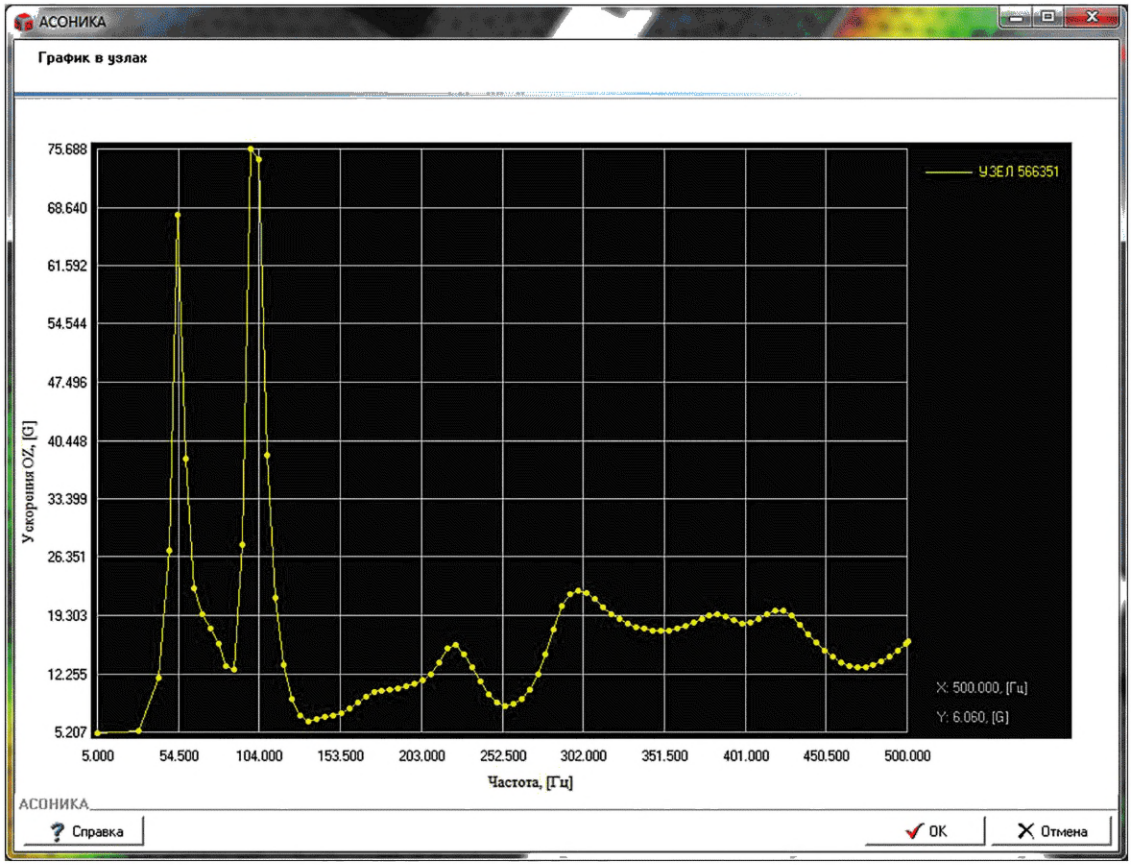


Рисунок Д.13 — Зависимость ускорения от частоты в точке максимума по оси *Z*

Д.3 Фрагменты расчета резонансных частот блока

Фрагменты расчета резонансных частот блока представлены на рисунках Д.14—Д.17.

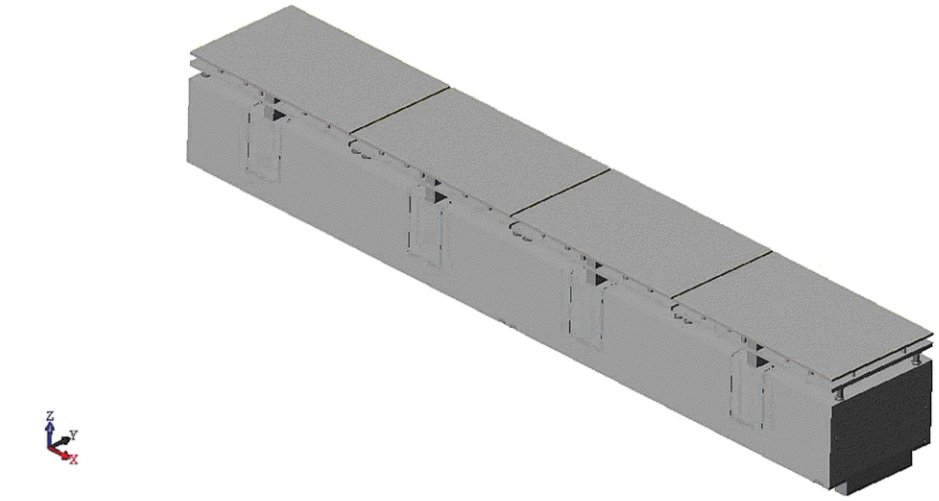


Рисунок Д.14 — Внешний вид конструкции блока

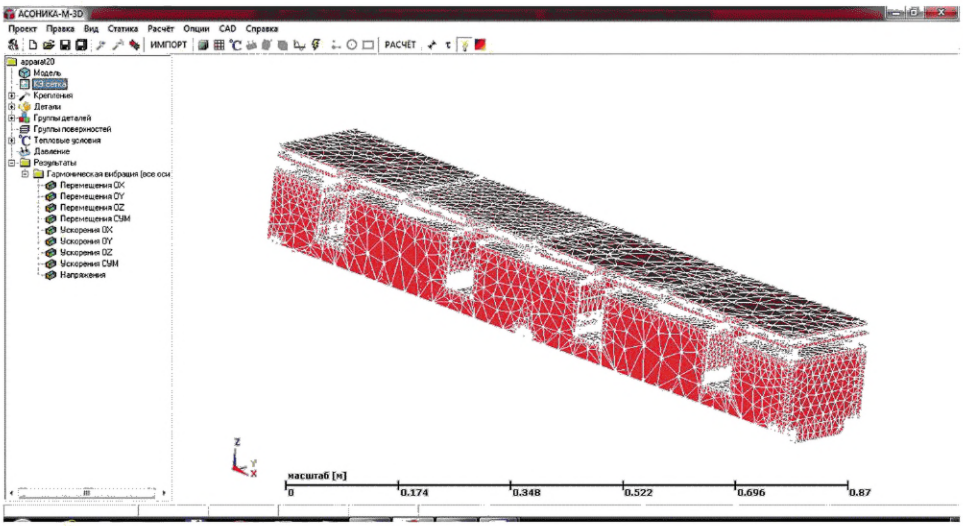


Рисунок Д.15 — Конечно-элементная сетка блока

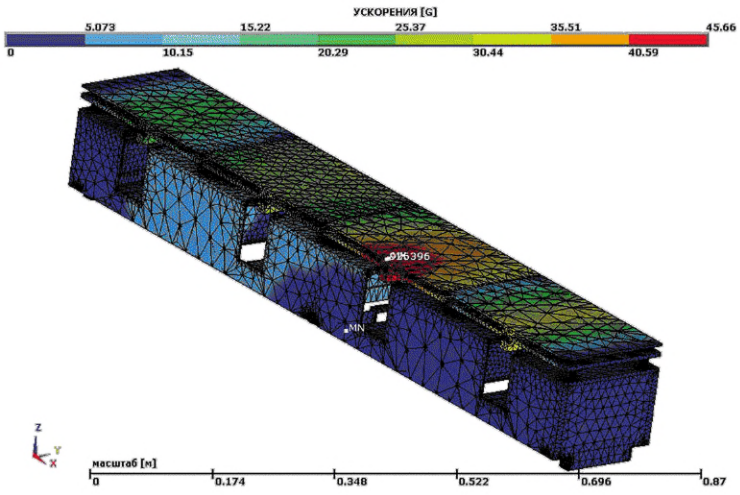


Рисунок Д.16 — Поле максимальных суммарных ускорений

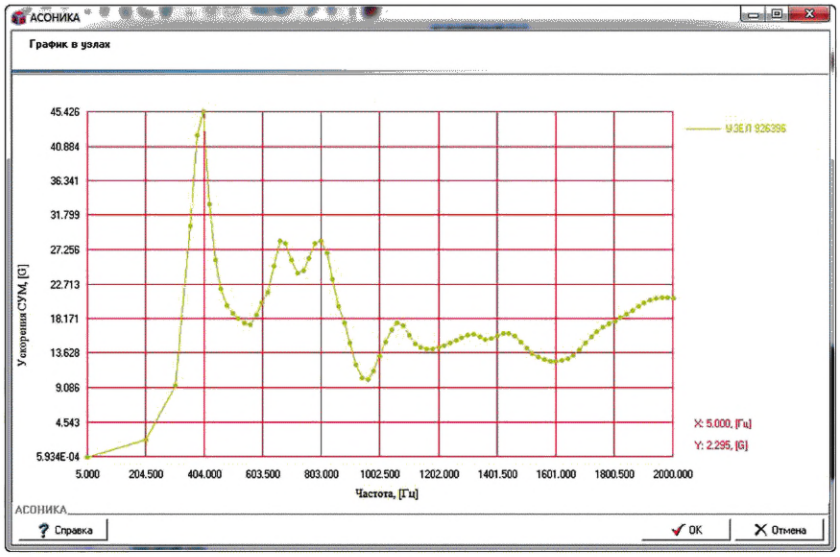


Рисунок Д.17 — Зависимость максимального суммарного ускорения от частоты гармонической вибрации (в точке MX на рисунке Д.14)

Д.4 Фрагменты расчета резонансных частот микросхемы

Фрагменты расчета резонансных частот микросхемы представлены на рисунках Д.18—Д.20.

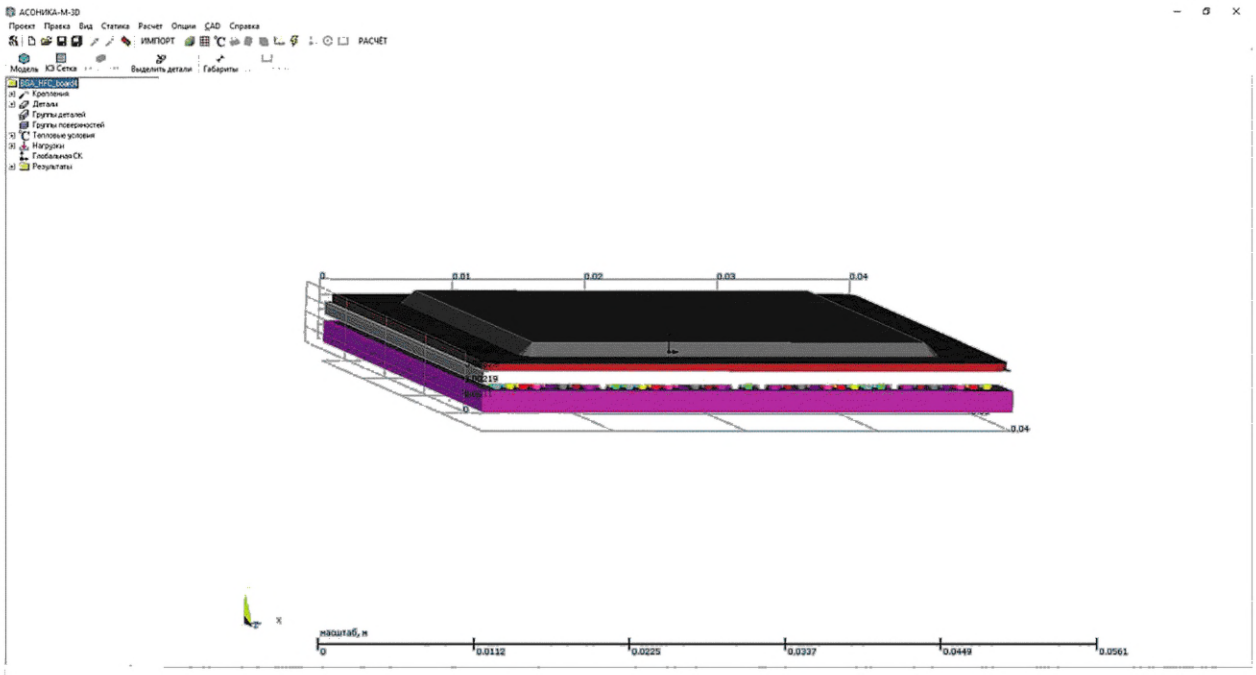


Рисунок Д.18 — Общий вид микросхемы в подсистеме АСОНИКА-М-3D

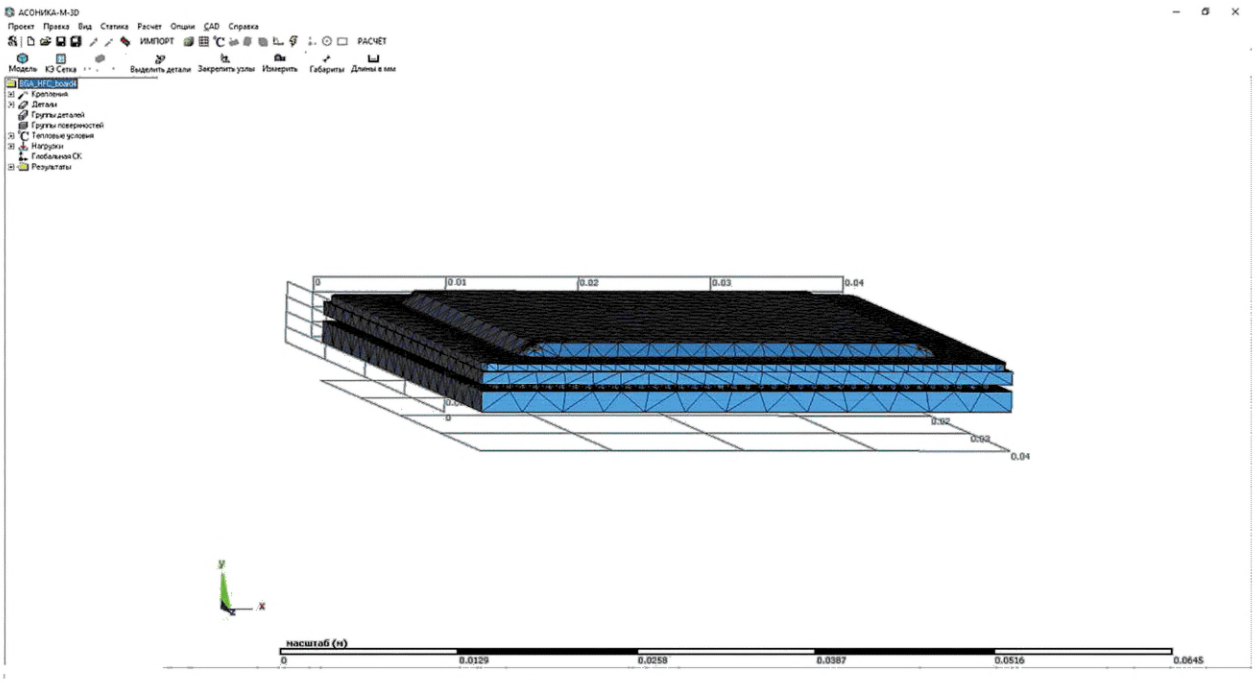


Рисунок Д.19 — Конечно-элементная модель микросхемы в подсистеме АСОНИКА-М-3D

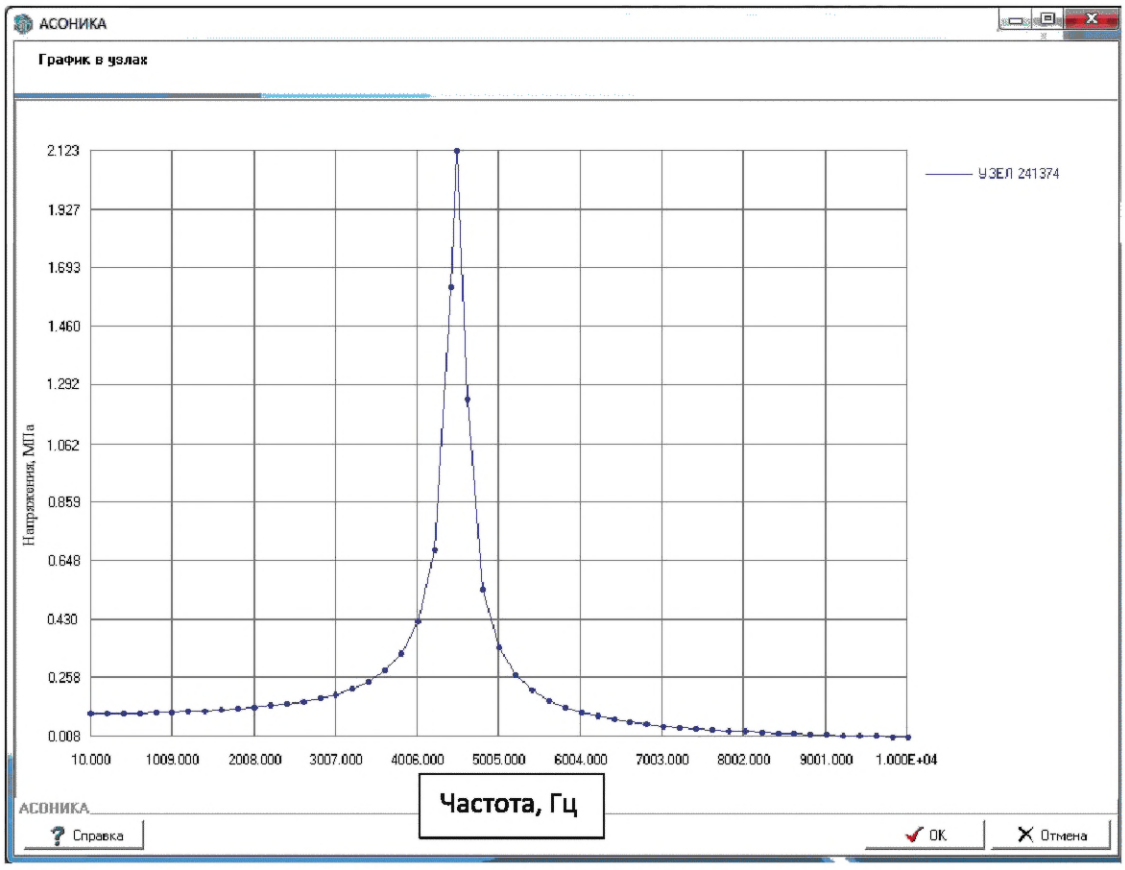


Рисунок Д.20 — Резонансная характеристика микросхемы в подсистеме АСОНИКА-М-3D (резонанс на частоте 4486 Гц)

Приложение Е
(справочное)

Информация о системе АСОНИКА

Российская автоматизированная система обеспечения надежности и качества аппаратуры АСОНИКА (https://asonika-online.ru/) предназначена для анализа и обеспечения стойкости ЭА и ЭКБ к комплексным тепловым, механическим, электромагнитным воздействиям, усталостной прочности к тепломеханическим воздействиям, создания карт рабочих режимов ЭКБ, анализа показателей надежности ЭА и создания цифровых двойников ЭА и ЭКБ.

АСОНИКА — это замена натурных испытаний опытных образцов ЭА и ЭКБ виртуальными испытаниями на внешние механические, тепловые, электромагнитные и другие воздействия еще до их изготовления. Это значительная экономия денежных средств и сокращение сроков создания ЭА и ЭКБ при одновременном повышении качества и надежности за счет сокращения количества натурных испытаний.

В состав системы АСОНИКА входит 13 подсистем:

- АСОНИКА-Т — подсистема анализа и обеспечения тепловых характеристик произвольных конструкций ЭА и ЭКБ (3D-модель которых еще не создана, но есть возможность ускоренного создания модели в специализированном интерфейсе);
- АСОНИКА-М — подсистема анализа типовых конструкций блоков ЭА и ЭКБ на механические и тепловые воздействия (3D-модель которых еще не создана, но есть возможность ускоренного создания модели в специализированном интерфейсе);
- АСОНИКА-М-ШКАФ — подсистема анализа типовых конструкций шкафов ЭА на механические и тепловые воздействия (3D-модель которых еще не создана, но есть возможность ускоренного создания модели в специализированном интерфейсе);
- АСОНИКА-М-3D — подсистема анализа и обеспечения стойкости произвольных объемных конструкций ЭА и ЭКБ к механическим и тепловым воздействиям с возможностью импорта геометрии из различных CAD-систем;
- АСОНИКА-В — подсистема анализа и обеспечения стойкости к механическим воздействиям конструкций ЭА, установленных на виброизоляторах;
- АСОНИКА-ТМ — подсистема анализа конструкций печатных узлов ЭА на тепловые и механические воздействия;
- АСОНИКА-УСТ — подсистема анализа усталостной прочности конструкций печатных плат и ЭКБ при механических и тепловых воздействиях;
- АСОНИКА-ИД — подсистема идентификации физико-механических и теплофизических параметров моделей ЭА и ЭКБ;
- АСОНИКА-ЭМС — подсистема анализа и обеспечения электромагнитной совместимости ЭА;
- АСОНИКА-Р — подсистема автоматизированного заполнения карт рабочих режимов ЭКБ;
- АСОНИКА-Б — подсистема анализа показателей надежности ЭА с учетом реальных режимов работы ЭКБ и расчета комплектов «Запасные части, инструменты и принадлежности»;
- АСОНИКА-БД — подсистема управления базами данных ЭКБ и материалов по геометрическим, физико-механическим, усталостным, теплофизическим, электрическим и надежностным параметрам;
- АСОНИКА-ЦДЭ — подсистема управления виртуальными испытаниями ЭА и ЭКБ при проектировании и создании цифровых двойников ЭА и ЭКБ.

Система АСОНИКА включает в себя следующие конверторы с известными САПР:

- для передачи перечня ЭКБ и геометрии печатной платы и ЭКБ в стандартном формате (IDF) из систем проектирования печатных плат;
- для передачи геометрии произвольной конструкции в стандартном формате (STEP, IGES) из CAD-системы.

Библиография

[1] Распоряжение Правительства Российской Федерации от 6 ноября 2021 г. № 3142-р «Об утверждении стратегического направления в области цифровой трансформации обрабатывающих отраслей промышленности»

[2] Шалумов А.С. Дорожная карта развития «САПР электроники выше мирового уровня» — Ковров: ООО «НИИ «АСОНИКА», 2020 — 24 с. URL: gost.e-ecolog.ru (дата обращения: 12.05.2020)

[3] Автоматизированная система АСОНИКА для моделирования физических процессов в радиоэлектронных средствах с учетом внешних воздействий / под ред. А.С. Шалумова — М.: Радиотехника, 2013 — 424 с.

[4] Шалумов М.А., Шалумов А.С. Виртуальная среда проектирования РЭС на основе комплексного моделирования физических процессов. — Владимир: Владимирский филиал РАНХиГС, 2016 — 87 с.

УДК 621.865:8:007.52:006.354

ОКС 29.100.01
31.020

Ключевые слова: методы, моделирование, синусоидальная, случайная, вибрация, одиночный, многократный, механический удар, линейное ускорение, акустический шум, электронная компонентная база, электронная аппаратура

Редактор *Н.А. Аргунова*
Технический редактор *И.Е. Черепкова*
Корректор *Р.А. Ментова*
Компьютерная верстка *И.А. Налейкиной*

Сдано в набор 02.12.2024. Подписано в печать 12.12.2024. Формат 60×84⅛. Гарнитура Ариал.
Усл. печ. л. 6,51. Уч.-изд. л. 5,40.

Подготовлено на основе электронной версии, предоставленной разработчиком стандарта

Создано в единичном исполнении в ФГБУ «Институт стандартизации»
для комплектования Федерального информационного фонда стандартов,
117418 Москва, Нахимовский пр-т, д. 31, к. 2.
gost.e-ecolog.ru gost.e-ecolog.ru