

Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение  
высшего образования  
**«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Политехнический институт  
институт  
Межинститутская базовая кафедра  
«Прикладная физика и космические технологии»  
кафедра

УТВЕРЖДАЮ  
Заведующий кафедрой  
В.Е. Косенко  
подпись инициалы, фамилия  
«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2021г.

## **МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

«Разработка силовой конструкции модуля бортовой аппаратуры для применения  
многовыводных электронных компонентов»  
тема

15.04.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение  
машиностроительных производств»  
код и наименование направления

15.04.05.02 «Технология космических аппаратов»  
код и наименование магистерской программы

<u>Научный</u> <u>руководитель</u>	<u>подпись, дата</u>	доцент МБК ПФиКТ канд.физ-мат.наук должность, ученая степень	<u>А.А.Хвалько</u> инициалы, фамилия
<u>Выпускник</u>	<u>подпись, дата</u>	инженер-конструктор 1 кат. АО «ИСС» имени академика <u>М.Ф. Решетнева»</u> должность, ученая степень	<u>А.В.Карманова</u> инициалы, фамилия
<u>Рецензент</u>	<u>подпись, дата</u>	доцент МБК ПФиКТ имени академика <u>М.Ф. Решетнева»</u> должность, ученая степень	<u>А.В.Селоустыев</u> инициалы, фамилия
<u>Нормоконтролер</u>	<u>подпись, дата</u>	профессор МБК ПФиКТ, доцент должность, ученая степень	<u>В.Е. Чеботарев</u> инициалы, фамилия

Красноярск 2021

Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение  
высшего образования  
**«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Политехнический институт  
институт  
Межинститутская базовая кафедра  
«Прикладная физика и космические технологии»  
кафедра

УТВЕРЖДАЮ  
Заведующий кафедрой  
В.Е. Косенко  
подпись инициалы, фамилия  
« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2021 г.

**ЗАДАНИЕ**  
**НА ВЫПУСКНУЮ КВАЛИФИКАЦИОННУЮ РАБОТУ**  
в форме магистерской диссертации

Студенту: Кармановой Анне Владимировне.

Группа: МТ19-04М

Направление: 15.04.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств».

Тема магистерской диссертации (МД): «Разработка силовой конструкции модуля бортовой аппаратуры для применения многовыводных электронных компонентов».

Утверждена приказом по университету от 22.11.2019 №19878/с

Руководитель МД: канд. физ - мат. наук, доцент МБК ПФиКТ Александр Александрович Хвалько.

Исходные данные для МД: анализ основных параметров существующих силовых конструкций модулей бортовой аппаратуры.

Перечень разделов МД.

1 Анализ нагрузок и конструкций.

2 Моделирование.

3 Испытания.

Перечень графического материала или иллюстративного материала с указанием основных чертежей, плакатов: слайды презентации в количестве 19 штук.

Руководитель МД А.А. Хвалько

подпись

Задание принял к исполнению А.В. Карманова

подпись

«22» ноября 2019 г.

## **РЕФЕРАТ**

Магистерская диссертация по теме: «Разработка силовой конструкции модуля бортовой аппаратуры для применения многовыводных электронных компонентов» содержит 60 страниц текстового документа и 9 использованных источников, 20 формул, 7 таблиц, 47 иллюстраций.

**СИЛОВАЯ КОНСТРУКЦИЯ, МОДУЛЬ БОРТОВОЙ АППАРАТУРЫ, КОНЕЧНО – ЭЛЕМЕНТНАЯ МОДЕЛЬ, РАДИОЭЛЕКТРОННАЯ АППАРАТУРА.**

Объектом является силовая конструкция модуля бортовой аппаратуры и электронные платы бортовой радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) КА, которые представляют собой конструктивно-законченные радиоэлектронные узлы.

Предмет исследования – Силовые конструкции модуля бортовой аппаратуры и многовыводные электронные компоненты.

Цель данной работы состоит в разработке силовой конструкции модуля бортовой радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) космических аппаратов (КА) обеспечивающей применение многовыводных электронных компонентов за счет обеспечения оптимального напряженно-деформированного состояния.

Для достижения поставленной цели основными задачами являются:

- сделать обзор конструкций бортовой РЭА КА;
- исследовать вариации контактных соединений для поверхностного монтажа современных корпусов микрочипов;
- проанализировать актуальные для данного вида конструкций дестабилизирующие факторы;
- разработать силовую конструкцию модуля бортовой аппаратуры;
- смоделировать процесс нагрузки на разработанную силовую конструкцию модуля бортовой аппаратуры с применением многовыводных компонентов;
- провести испытания силовой конструкции модуля бортовой аппаратуры.

Актуальность диссертационной работы определяется потребностью в теоретически обоснованных проектных решениях для повышения надежности ряда ЭМ.

Научная новизна – применение разработанной конструкции позволит использовать многовыводные электронные компоненты путем оптимального напряженно-деформированного состояния.

Практическая значимость – разработанная конструкция может применяться для увеличения прочностных характеристик для обеспечения долговечности ЭМ и КА в целом.

## **СОДЕРЖАНИЕ**

Введение.....	5
1    Анализ нагрузок и конструкций .....	6
1.1 Обзор конструкций бортовой аппаратуры космического аппарата .....	6
1.2 Дестабилизирующие факторы воздействия на космический аппарат .....	10
1.3 Контактные соединения для поверхностного монтажа .....	109
2    Моделирование силовой конструкции .....	39
2.1 Описание конструкции .....	40
3    Испытания силовой конструкции.....	52
3.1 Цели и задачи испытаний.....	55
3.2 Объем и условия проведения испытаний .....	56
3.3 Методики проведения испытаний и контроля .....	58
Заключение .....	62
Список сокращений .....	62
Список использованных источников .....	64

## ВВЕДЕНИЕ

Создание космического аппарата (КА) с длительным сроком активного существования, на сегодняшний день, это одна из основных целей. Для этого все конструктивные узлы КА должны быть очень надежными, обладать повышенной живучестью и иметь большой запас прочности на длительный промежуток времени, в связи с тем, что вмешаться в ход эксперимента, как это делается в наземных лабораторных условиях весьма затруднительно, а повторение эксперимента потребует значительных затрат времени и средств.

В современном мире все стремятся к миниатюризации электронных компонентов и к переходу на современную компоновку микросхем электронных модулей (ЭМ), вызванные техническим развитием и поставленными задачами, и это требует особое отношение к прочностным характеристикам материалов и типов механических контактов для обеспечения живучести модуля на протяжении всего срока существования КА.

Обычно под живучестью понимается свойство системы адаптироваться, противостоять и сохранять минимальный набор критически важных функций в условиях непредвиденных (аварийных, нештатных) воздействий на систему внешних и внутренних дестабилизирующих факторов за счет изменения поведения и структуры системы. В качестве внешних и внутренних дестабилизирующих факторов могут быть: воздействие на аппаратуру факторов космического пространства, сбои и отказы бортовой аппаратуры, разрушение конструкции, потеря управления и ресурсов, несанкционированное вмешательство в контур управления, нерасчетные режимы работы и др.

Разработка силовой конструкции модуля бортовой аппаратуры является актуальной как в научном, так и в практическом отношении. Для решения задач по оптимизации и выбора параметров бортовой и наземной системы, необходимо рассчитать напряженно-деформированное состояние (НДС) элементов конструкций с учетом свойств материала и возможных нагрузок, провести испытания ЭМ, применить различные методики позволяющие выявить, локализовать и определить степень опасности зарождающихся дефектов в конструкции ЭМ. Эти решения помогут разработать силовую конструкцию исследований модуля современную бортовой аппаратуры с полем такими типами параметрами, которые построить позволяют точки минимизировать деформацию ЭМ, бортовом предотвратить разрушение является многовыводных прочности контактов, уменьшить современной амплитуду подробную колебаний, которая величины поможет случайная справится с вибрацией в проведению бортовом силовой модуле, что не позволит войти в поверхности резонанс с КА. Актуальность диссертационной работы определяется потребностью в теоретически обоснованных проектных решениях для повышения надежности ряда ЭМ. Разработанная конструкция применяется для увеличения прочностных характеристик для обеспечения долговечности ЭМ и КА в целом.

# 1 Анализ нагрузок и конструкций

## 1.1 Обзор конструкций бортовой аппаратуры космического аппарата

Цель процесса конструирования – спроектировать малогабаритную, высокоэффективную и надёжную аппаратуру, производство и эксплуатация которой потребует ограниченного расхода трудовых, энергетических и материальных ресурсов. Для достижения этой цели решают, как правило, четыре основные задачи конструирования:

- комплексная микроминиатюризация;
- обеспечение высокой надёжности;
- защита от дестабилизирующих факторов (тепло, влага, механические
- воздействия и др.);
- повышение технологичности.

При решении задачи комплексной микроминиатюризации РЭС ищут резервы миниатюризации всех составных частей изделия, не ограничиваясь только узлами, в которых можно применить интегральные микросхемы (ИМС), т.е. элементной базы, системы питания, охлаждения, автоматики и т.д.[7]

Для сложных РЭС наиболее употребительной является следующая иерархия конструкционных систем представлена на рисунке 1.1.



Рисунок 1.1 – Иерархия конструкционных систем

В качестве несущей конструкции для модуля первого уровня чаще всего используются печатные платы, устанавливаемые на металлические рамки. Такую сборку иногда называют ячейкой. На печатной плате устанавливаются элементы нулевого уровня – ИМС, микросборки, ЭРЭ, а также элементы коммутации, регулировки и т.д. Несущей конструкцией модуля второго уровня является корпус блока. Основные разновидности корпусов – разъёмная (а) и книжная (б), эти конструкции представлены на рисунке 1.2.

Основной недостаток – увеличенные масса и объём из-за наличия разъёмов к каждой ячейке. Область использования – бытовая, измерительная аппаратура, ЭВМ и т.д.

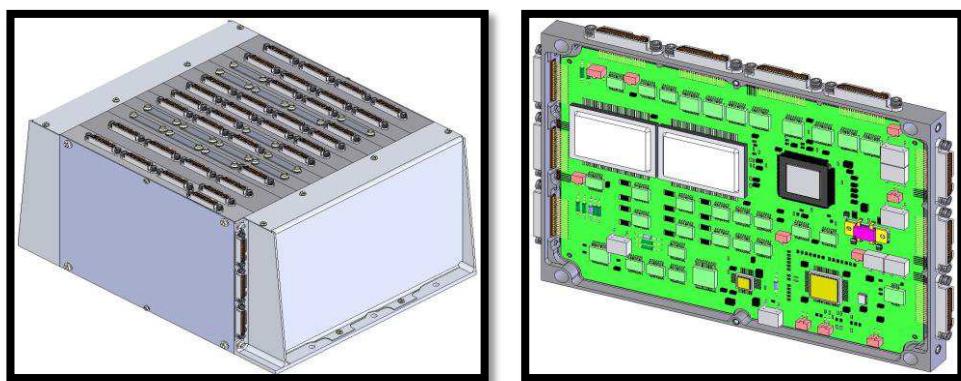


Рисунок 1.2 а – разъёмная компоновка

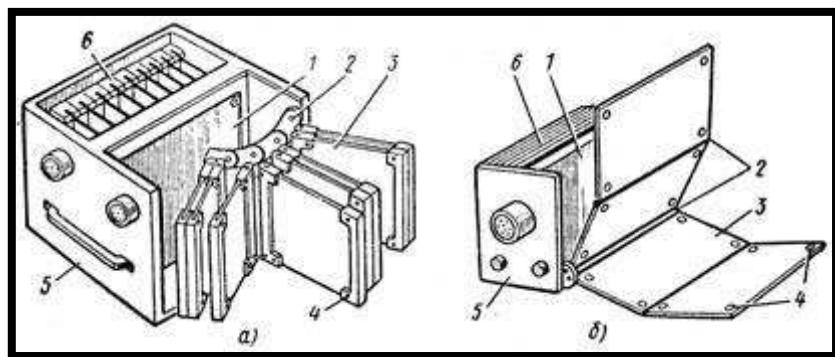


Рисунок 1.2б – книжная компоновка

Достоинства книжной компоновки – высокая компактность, малые масса и объём, легкий доступ к ИС и ЭРЭ при ремонте, возможность проверки и отладки устройства во включенном состоянии. Недостаток – затрудненный демонтаж ячеек, что увеличивает время ремонта. Книжный вариант чаще всего применяется для бортовых устройств с высокой надёжностью, где требования уменьшения массы и габаритов является доминирующими.

Несущими конструкциями модулей третьего уровня могут быть:

- для стационарной аппаратуры – шкафы, стойки, пульты;
- для бортовых РЭС – виброизоляционная рама или стеллаж.

Более детальные параметры соответствующих конструкционных систем приводятся в отраслевых стандартах.

Например, система ЕВРОМЕХАНИКА представляет собой конструктив, предназначенный для размещения стандартных плат, модулей (кассет) и прочих конструкций, унифицированных по высоте (U), ширине (TH) и глубине. Так как ЕВРОМЕХАНИКА основана на американских стандартах, то размерность всех величин была установлена в дюймах, но постепенно, с распространением данного стандарта в Европе, многие величины были округлены для удобства использования метрической системы. Расчетные формулы дают размеры, незначительно отличающиеся от общепринятых и округленных величин.

Конструктив ЕВРОМЕХАНИКА является международным стандартом. В корзину (раму, крейт) ЕВРОМЕХАНИКА могут встраиваться изделия от разных производителей. Все габариты несущих конструкций имеют необходимые допуски для обеспечения совместимости, что позволяет учитывать отклонения размеров при производстве и сборке конструктивов ЕВРОМЕХАНИКА и печатных плат.

Не изменяют идеологию системы ЕВРОМЕХАНИКА следующие конструктивными изменения:

- изменение высоты конструктива со стандартным шагом;
- изменение глубины рамы или стойки (выпускаются стойки и рамы нескольких стандартных глубин);
- изменение форматов рам (например, преобразование рамы высотой 3НЕ в подсистему для размещения плат и кассет формата 6U, и наоборот и т. п.);
- заполнение стоек рамами с лицевых и задних панелей одновременно;
- размещение в рамках или кассетах механических конструкций от систем и конструктивов другого типа;
- частичное заполнение стоек рамами или рам платами и кассетами и размещение в оставшемся объеме узлов и блоков от других систем.
- Изменяют идеологию системы ЕВРОМЕХАНИКА следующие конструктивные изменения:
  - механическая доработка стандартных элементов, приводящая к изменению их габаритов и придаанию им несовместимости с остальными узлами системы ЕВРОМЕХАНИКА.

В системе ЕВРОМЕХАНИКА принят интерфейс на базе разъемов стандарта DIN 41612, которые устанавливаются либо винтами непосредственно на профилях корзины, либо на печатных платах – в один ряд (для плат высоты 3U) или в два ряда (для плат высоты 6U).

Вставляемые в корзины стандартные модули (кассеты), состоят из нескольких плат; соответственно, модуль может содержать до 2...4 и более стандартных разъемов.

Минимальное расстояние между направляющими в системе ЕВРОМЕХАНИКА ограничено шириной разъемов. При применении модулей с несколькими платами эту особенность необходимо учитывать для возможности использования нескольких ответных разъемов на кросс-плате одной корзины. Российским аналогом является - "СНП-59"

Стандарт ЕВРОМЕХАНИКА использует два варианта разъемов кросс-системы:

- кросс-плата с печатным соединением разъемов в шинную структуру;
- кросс-система из разъемов, привинчиваемых на специальные посадочные места и соединенных в шинную систему разным способом.

Стандартные размеры печатных плат.

Стандартный ряд ЕВРОМЕХАНИКА определяет следующие длины плат: 100, 160, 220, 280 мм.

Плата 100 x 160 мм называется Европлатой (Europlatte, Eurocard).

Печатная плата с габаритами 233 x 160 мм называется двойной Европлатой.

Допустимы размеры плат с габаритами: 100 x 100, 100 x 220, 100 x 280 мм (но они не получили широкого распространения).

Максимальная ширина корзины равна 19" (19 дюймов = 19 x 25.4 мм) = 482.6 мм. Это полная ширина корзины - расстояние «от края до края», что соответствует максимальной ширине корзины (рамы) 84 ТН.

Также, широко распространены корзины со следующими параметрами: 42 ТН, 57 ТН, 63 ТН, 84 ТН.

Максимальная полезная ширина для встраивания плат и кассет в корзину рассчитывается так: 84 x 5.08 мм = 426.72 мм.

Высота корзины рассчитывается так:

N x U - 33,35 мм.

Корзина высотой 3U имеет высоту 132.55 мм.

Корзина высотой 6U — 265.9 мм.

## 1.2 Дестабилизирующие факторы воздействия на космический аппарат

Радиоэлектронные средства (РЭС) часто подвергаются воздействию внешних и внутренних дестабилизирующих факторов. Факторы, действующие на работоспособность РЭС, группируются по трем признакам: климатическим, механическим и радиационным. Из этих признаков следует конструктивное исполнение аппаратуры, применение различных радиоматериалов и радиокомпонентов, проведение испытаний, упаковка, хранение и транспортировка. На рисунке 1.3 представлена структурная схема классификации факторов внешней среды.

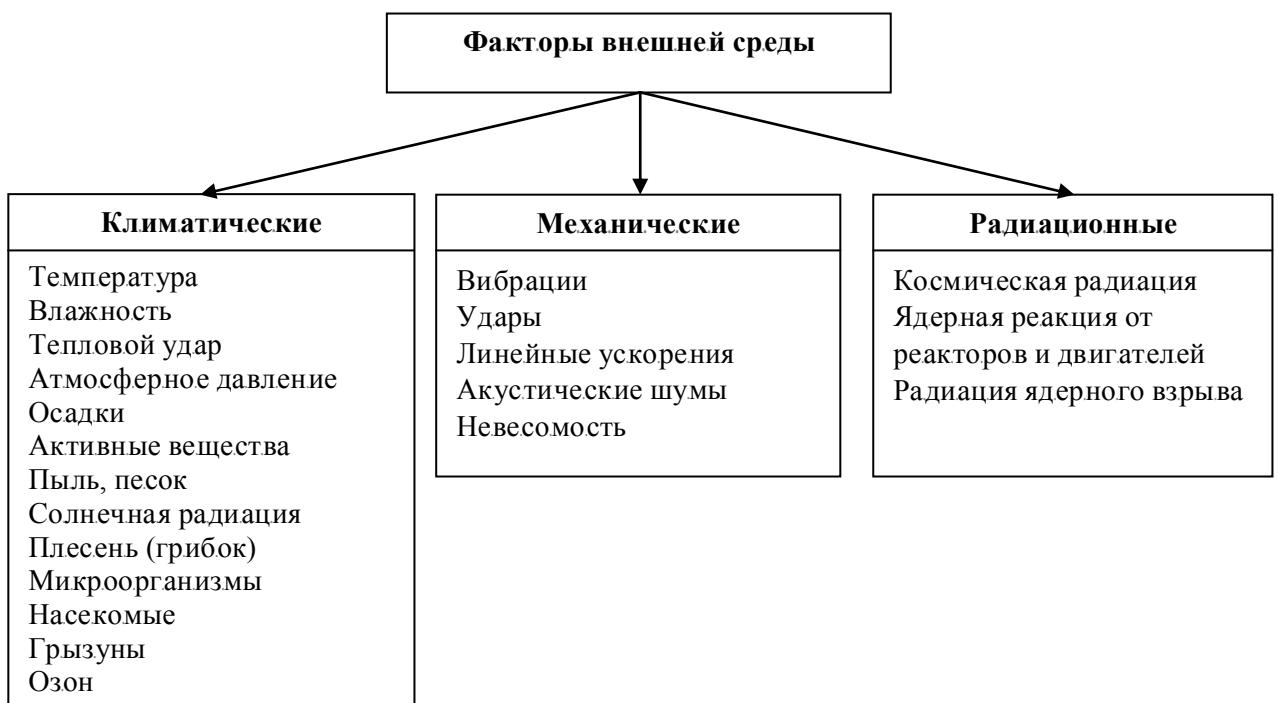


Рисунок 1.3 - структурная схема классификации факторов внешней среды

При конструировании РЭС должна быть обеспечена стойкость к воздействиям тех факторов внешней среды, которые характерны для условий эксплуатации, хранения и транспортирования объекта.

В зависимости от района предполагаемой эксплуатации РЭС, в соответствии со стандартом ГОСТ 15150-69 «Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнение для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды». Существует определенная связь между конкретным видом внешнего воздействия на аппаратуру и ускоряемым с его помощью физико-химическим процессом в конструкции.

Повышенная температура приводит к пересыханию защитных покрытий с деформацией или растрескиванием; миграции примесей в

полупроводниках; изменению электрических характеристик; деформации сопрягаемых деталей с различными температурными коэффициентами расширения.

Пониженная температура вызывает конденсацию влаги; изменение электрических характеристик; деформацию сопрягаемых деталей.

Тепловой удар (термоудар) вызывает механические напряжения в местах пайки и других подвижных соединениях; растрескивание металлических и неметаллических покрытий.

Повышенная влажность приводит к снижению сопротивления изоляции между гальванически не связанными цепями, к электролизу, коррозии.

Пониженное давление приводит к снижению пробивного напряжения, ухудшению теплоотдачи.

Воздействие плесени, микроорганизмов, насекомых, грызунов может приводить к разложению и уничтожению элементов конструкции из органических материалов.

Воздействие механических и ряда климатических факторов (пыль, песок, тепловые удары) может привести к возникновению механических напряжений, вызывающих механические нарушения в конструкции, следствием которых является потеря работоспособности РЭС.

Влияние невесомости оказывается на изменении свойств смазывающих масел (изменение трения), а также значений начальных механических напряжений в местах крепления крупных блоков, обусловленных собственным весом блоков. При невесомости нарушается конвекция, следовательно, и условия охлаждения РЭС.

Радиационные факторы (космическая радиация и облучение ядерными частицами) приводят к возникновению процесса ионизации в материалах, следствием чего являются обратимые, полуобратимые и необратимые изменения свойств материалов. К необратимым изменениям относятся нарушение структуры полупроводниковых переходов, остаточная ионизация и соответствующее снижение изоляционных свойств диэлектриков.

Поскольку дестабилизирующие факторы внешней среды могут привести к выходу из строя аппаратуры, процесс разработки и конструирования РЭС должен быть направлен на выбор таких ЭРЭ и материалов, схемотехнических и конструкторских решений, которые бы в совокупности обеспечили стойкость аппаратуры к внешним воздействующим факторам заданной интенсивности [1].

Механические воздействия на РЭА появляются под действием внешних нагрузок (вибрации, удары, ускорения, акустические шумы) и могут возникнуть, как в работающей РЭА, если она установлена на подвижном объекте, так и при ее транспортировке в нерабочем состоянии.

Механические воздействия имеют место в работающей РЭА, если она установлена на подвижном объекте, или только при транспортировке ее в нерабочем состоянии, как в случае стационарной и некоторых видов

возимой РЭА. Количество переданной энергии определяет уровень и характер изменения конструкции. Допустимые уровни механического изменения конструкции определяются ее прочностью и устойчивостью к механическим воздействиям.

Под прочностью конструкции понимается способность аппаратуры выполнять функции и сохранять параметры после приложения механических воздействий. Устойчивость конструкции – способность РЭА сохранять функции и параметры в процессе механических воздействий.

Откликом, или реакцией, конструкции на механические воздействия называют трансформацию и преобразование энергии механического возбуждения. К ним относятся механические напряжения в элементах конструкции, перемещения элементов конструкции и их соударения, деформации и разрушения конструктивных элементов, изменения свойств и параметров конструкции [2].

Механические воздействия могут приводить к взаимным перемещениям деталей и узлов, деформации крепежных, несущих и других элементов конструкций, их соударению. При незначительных механических воздействиях в элементах конструкций возникают упругие деформации, не сказывающиеся на работоспособности аппаратуры. Увеличение нагрузки приводит к появлению остаточной деформации и при определенных условиях разрушению конструкции. Разрушение может наступить и при нагрузках, много меньших предельных значений статической прочности материалов, если конструкция окажется подверженной знакопеременным нагрузкам [3].

Отказы аппаратуры бывают восстанавливаемыми после снятия или ослабления механического воздействия (изменение параметров компонентов, возникновение электрических шумов) и невосстанавливаемыми (обрывы и замыкания электрических соединений, отслаивание проводников печатных плат, нарушение элементов крепления и разрушение несущих конструкций).

На РЭА, установленную на подвижных объектах, в процессе ее эксплуатации существует вибрации, ударные нагрузки и линейные ускорения. Гармонические вибрации характеризуются частотой, амплитудой, ускорением. Ударные нагрузки характеризуются числом одиночных ударов или их серией (обычно оговаривают максимальное число ударов), длительностью ударного импульса и его формой, мгновенной скоростью при ударе, перемещением соударяющихся тел. Линейные ускорения характеризуются ускорением, длительностью, знаком воздействия ускорения. Возникающие при вибрациях, ударах и ускорениях перегрузки оценивают соответствующими коэффициентами. Для уменьшения воздействия вибраций и ударов аппаратуру устанавливают на амортизаторы или применяют демпфирующие материалы.

Воздействие линейных ускорений эквивалентно увеличению массы аппаратуры и при значительной длительности воздействия требует увеличения прочности конструкции.

Как показывает опыт эксплуатации транспортируемой РЭА, наибольшее разрушающее воздействие на конструкцию оказывают вибрации. Как правило, конструкция аппарата, выдержавшая воздействие вибрационных нагрузок в определенном частотном диапазоне, выдерживает ударные нагрузки и линейные ускорения с большими значениями соответствующих параметров (для космической РЭА – до 12g, g – ускорение свободного падения).

В отношении конструкции РЭА различают два понятия: вибрационная устойчивость и вибрационная прочность [4].

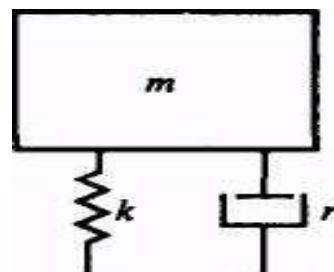
Вибрационная устойчивость – свойство объекта при заданной вибрации выполнять заданные функции и сохранять значения своих параметров в пределах нормы. Вибрационная прочность – прочность при заданной вибрации и после ее прекращения.

Воздействие транспортной тряски складывается из ударов и вибраций. Введение амортизаторов между РЭА и объектом в качестве среды, уменьшающей амплитуду передаваемых колебаний и ударов, снижает действующие на РЭА механические силы, но не уничтожают их полностью. В некоторых случаях образованная с введением амортизаторов резонансная система влечет за собой возникновение низкочастотного механического резонанса, который приводит к увеличению амплитуды колебаний РЭА.

Понятие жесткости и механической прочности конструкции. При разработке конструкции РЭА необходимо обеспечить требуемую жесткость и механическую прочность ее элементов.

Жесткость конструкции есть отношение действующей силы к деформации конструкции, вызванной этой силой. Под прочностью конструкции понимают нагрузку, которую может выдержать конструкция без остаточной деформации или разрушения. Повышение прочности конструкции РЭА связано с усилением ее конструктивной основы, применением ребер жесткости, контровки болтовых соединений и т. д. Особое значение имеет повышение прочности несущих конструкций и входящих в них узлов методами заливки и обволакивания. Заливка пеноматериалом позволяет сделать узел монолитным при незначительном увеличении массы.

Конструкция как колебательная система представлена на рисунке 1.4. Во всех случаях нельзя допускать образования механической колебательной системы. Это касается крепления монтажных проводов, микросхем, экранов и других частей, входящих в РЭА.



#### Рисунок 1.4. – Колебательная модель механической системы

Основными параметрами любой конструкции с позиций реакции на механические воздействия являются масса, жесткость и механическое сопротивление (демпфирование). При анализе влияния вибраций на конструкции модулей последние представляют в виде системы с сосредоточенными параметрами, в которой заданы масса изделия  $m$ , элемент жесткости в виде пружины и элемент механического сопротивления в виде демпфера, характеризующиеся параметрами  $k$  и  $\zeta$  соответственно [2], [5].

Когда частота собственных колебаний системы близка к частоте вынужденных, в колебательной системе возникает явление механического резонанса, что может привести к повреждению конструкции.

Амортизация конструкции РЭА. Один из эффективных методов повышения устойчивости конструкции, как транспортируемой, так и стационарной, к воздействию вибраций, а также ударных и линейных нагрузок – использование амортизаторов. Действие амортизаторов основано на демпфировании резонансных частот, т. е. поглощении части колебательной энергии. Аппаратура, установленная на амортизаторах, в общем случае может быть представлена в виде механической колебательной системы с шестью степенями свободы: совокупностью связанных колебаний, состоящих из линейных перемещений, и вращательных колебаний по каждой из трех координатных осей.

Эффективность амортизации характеризуется коэффициентом динаминости или передачи, числовое значение которого зависит от отношения частоты действующих вибраций  $f$  к частоте амортизированной системы  $f_0$ .

При разработке схемы амортизации необходимо стремиться к тому, чтобы система имела минимальное число собственных частот и чтобы они были в 2–3 раза ниже наименьшей частоты возмущающей силы.

Для амортизированной аппаратуры следует как можно больше уменьшать собственную частоту, а для неамортизированной, напротив, увеличивать, приближая ее к верхней границе возмущающих воздействий или превышая ее.

Схемы размещения амортизаторов. Конструирование системы амортизации РЭА обычно начинается с выбора типа амортизаторов и схемы их размещения. Выбор амортизаторов производят исходя из допустимой нагрузки и предельных значений параметров, характеризующих условия эксплуатации. К таким параметрам относятся: температура окружающей среды, влажность, механические нагрузки, присутствие в атмосфере паров масла, дизельного топлива и т. д.

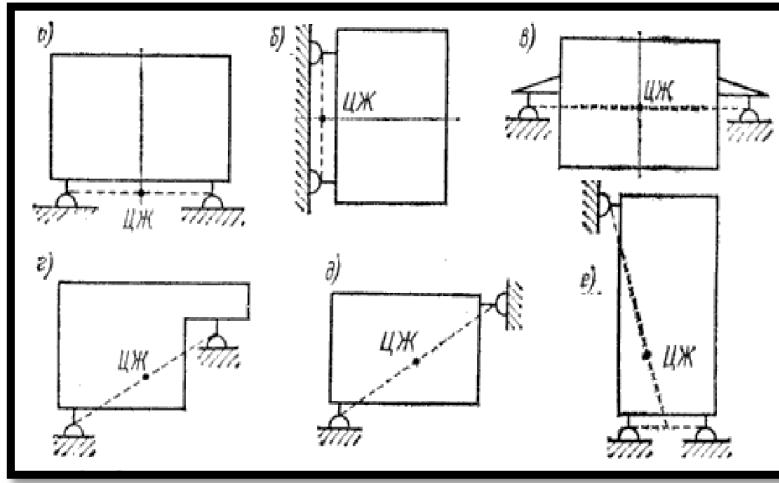


Рисунок 1.5 – Схемы расположения амортизаторов

Выбор схемы расположения амортизаторов зависит от расположения аппаратуры на носителе и условий динамического воздействия. На рисунке 1.5 представлены основные схемы расположения амортизаторов [5].

Вариант «а» довольно часто используется для амортизации сравнительно небольших по габаритам блоков. Такое расположение амортизаторов удобно с позиций общей компоновки блоков на объекте. Однако при этом расположении амортизаторов принципиально невозможно получить совпадение центра тяжести (ЦТ) с центром масс (ЦМ) и не получить рациональной системы. То же можно сказать про вариант размещения «б». Вариант размещения «в» позволяет получить рациональную систему, однако такое расположение амортизаторов не всегда удобно при размещении на объекте. Размещение типа «г» и «д» является разновидностью варианта «в» и используется в том случае, если лицевая панель блока размещается вблизи амортизатора, расположенного снизу. Размещение амортизаторов типа «е» используется в стоечной аппаратуре, когда высота РЭА значительно больше глубины и ширины стойки. Чтобы ослабить колебания стойки вокруг осей  $x$  и  $y$ , ставят дополнительно два амортизатора сверху стойки.

**Прочность конструктивных элементов.** Механическую прочность элементов конструкции проверяют методами сопротивления материалов и теории упругости для простейших конструкций с распределенной и смешанной нагрузкой. В большинстве практических случаев конструкции деталей РЭА имеют более сложную конфигурацию, затрудняющую определение в них напряжений. При расчетах сложную деталь заменяют ее упрощенной моделью: балкой, пластиной, рамой.

К балкам относят тела призматической формы, длины которых значительно превышают все прочие геометрические размеры конструкции. Концы балок защемляются (сваркой, пайкой), опираются шарнирно-подвижно (установкой в направляющие) или шарнирно-неподвижно (одиночное винтовое соединение). Пластинами считают тела прямоугольной формы, толщина которых мала по сравнению с размерами

основания. К подобным конструкциям относят печатные платы, стенки кожухов приборов, стоек, панелей и прочих подобных конструкций. Жесткое закрепление края пластин осуществляется пайкой, сваркой, зажимом, винтовым соединением; шарнирное закрепление – установкой пластин в направляющие, гнездовой соединитель. Рамными конструкциями моделируются многовыводные компоненты: микросхемы, реле, микропроцессоры, ПЛИС [6].

При проектировании конструкции выполняют моделирование, при котором осуществляются:

- проверочные расчеты, когда форма и размеры детали известны (выявлены при конструировании);
- проектные расчеты, когда размеры опасных сечений неизвестны и их определяют на основе выбранных допустимых напряжений;
- расчеты допускаемых нагрузок по известным опасным сечениям и допустимым напряжениям.

При проведении проверочных расчетов на упругие колебания с учетом направления воздействия вибраций выделяют детали и узлы, имеющие наибольшие деформации, выбирают расчетные модели, рассчитывают собственные частоты, определяют нагрузки и сравнивают полученные значения с пределами прочности выбранных материалов, при необходимости принимают решение о повышении прочности конструкции.

Для увеличения вибропрочности в конструкции отдельных элементов вводятся дополнительные крепления, ребра и рельефы жесткости, отбортовки, выдавки, используются материалы с высокими демпфирующими свойствами, демпфирующие покрытия.

Внешние вибрационные воздействия часто задаются довольно узким диапазоном частот. В правильно сконструированной аппаратуре собственная частота  $f_0$  конструкции не должна находиться в спектре частот внешних воздействий. Хотя любая конструкция обладает несколькими значениями собственных частот, однако расчет выполняется только для низших значений  $f_0$ , поскольку деформации конструкций в этом случае будут максимальными. Если низшее значение собственной частоты входит в диапазон внешних воздействий, то конструкцию дорабатывают с целью увеличения  $f_0$  и выхода из спектра частот внешних воздействий.

Под жесткостью конструкции понимается способность системы (элемента, детали) противостоять действию внешних нагрузок с деформациями, не допускающими нарушение ее работоспособности.

Жесткость конструкции зависит от длины, формы и размеров поперечного сечения балки.

Вибрации, направленные ортогонально к плоскости печатной платы, попеременно изгибают ее и влияют на механическую прочность установленных на ней микросхем и компонентов. Если компоненты считать жесткими, то изгибаться будут их выводы. Большинство отказов компонентов происходит из-за поломки паяных соединений выводов с платой. Наиболее жесткие воздействия имеют место в центре платы, а для

прямоугольных плат еще и при ориентации тела элемента вдоль короткой стороны платы. Приклеивание компонентов к плате значительно улучшает надежность паяных соединений. Защитное лаковое покрытие толщиной 0,1...0,25 мм жестко фиксирует компоненты и увеличивает надежность РЭА.

Механические напряжения на паяные соединения от воздействия вибраций можно уменьшить: увеличением резонансных частот, что позволяет уменьшить прогиб платы; увеличением диаметра контактных площадок, что повышает прочность сцепления контактной площадки с платой; подгибом и укладыванием выводов элементов на контактную площадку, что увеличивает длину и прочность сцепления паяного соединения; уменьшением добротности платы на резонансе ее демпфированием многослойным покрытием лака.

Фиксация крепежных элементов. При воздействии вибраций возможно отвинчивание крепежных элементов, для предотвращения которого вводят фиксаторы, увеличивают силы трения, устанавливают крепеж на краску и пр. При выборе методов фиксации крепежных элементов должны учитываться следующие соображения: обеспечение прочности соединения при заданных нагрузках и климатических воздействий; быстрота выполнения соединения, его стоимость; последствия, к которым приведет отказ соединения; срок службы.

Следует принимать во внимание возможность замены износившихся или поврежденных деталей, использовать вместо винтовых пар быстро соединяемые элементы: петли, защелки, собачки и пр. Болты должны быть ориентированы головкой вверх, чтобы при отвинчивании гайки болты оказывались на установочном месте. Рекомендуется применять несколько больших крепежных деталей вместо большого числа маленьких. Число оборотов, необходимых для затягивания или отпускания винта, должно быть не менее 10.

Срок службы конструкции. При колебаниях в конструкциях возникают переменные напряжения и конструкции могут разрушаться при нагрузках, значительно меньших предельной статической прочности материалов из-за появления микротрешин, на рост которых влияют особенности кристаллической структуры материалов, концентрации напряжений в углах микротрешин, условий окружающей среды. По мере развития микротрешин поперечное сечение детали ослабляется и в некоторый момент достигает критической величины – конструкция разрушается.

Если масса изделия не является критическим фактором, то конструкцию упрочняют, используя материалы с запасом, избегают введения отверстий, надсечек, сварных швов, ведут расчеты конструкций методом наихудшего случая.

Зашиту от механических воздействий обеспечивает конструкционный материал, который должен удовлетворять заданными механическими и физическими свойствами, обладать легкостью в обработке, коррозионной стойкостью, низкой стоимостью, иметь максимальное отношение

прочности к массе и пр. В зависимости от сложности несущую конструкцию выполняют в виде единой детали либо составной, включающей несколько деталей, объединенных в единую конструкцию разъемными или неразъемными соединениями. Основной путь к снижению массы изделий – облегчение несущих конструкций при одновременном обеспечении ими требований прочности и жесткости.

Срок службы конструкции при вибровоздействиях определяется числом циклов до разрушения, которое может выдержать конструкция при заданном уровне механической нагрузки. Усталостные характеристики материалов выявляются на группе образцов при знакопеременной повторяющейся нагрузке.

Решать задачи повышения механической прочности конструкций следует с учетом оптимизации размещения РЭА в отсеках носителей.

### **1.3 Контактные соединения для поверхностного монтажа**

При использовании миниатюрных компонентов для поверхностного монтажа достигается возможность более высокой плотности монтажа. При увеличении лишь в два раза количества компонентов на той же площади, неизбежно возникает необходимость в использовании более узких печатных проводников и расстояний между проводниками. Увеличивается также удельная тепловая нагрузка, и возникают различные условия теплового расширения в области между компонентами и печатной платой, которые отличаются от условий стандартной (DIP) технологии, где они компенсируются за счет гибких выводов. Все эти положения должны учитываться уже при разработке схемы и при проектировании конструкции платы на основе следующих факторов:

- плотность монтажа;
- термическая нагрузка;
- способ комплектации компонентов (ручной или с помощью автоматов);
- метод пайки;
- установка компонентов с одной стороны или с обеих сторон, наличие переходных отверстий;
- вариант монтажа платы (чисто поверхностный, смешанно - разнесенный или смешанный);
- величина напряжения и тока.

#### *Преимущества технологии поверхностного монтажа.*

- меньшая и тонкая печатная плата: SMD-компоненты имеют размер на 60-80% меньше, чем их аналоги с сквозным отверстием. Вес этих компонентов также значительно меньше. Поэтому они занимают меньше места на плате SMT, что делает ее меньше и стройнее.
- гибкость печатной платы: поскольку компоненты SMD монтируются или припаиваются непосредственно к поверхности платы, технология поверхностного монтажа обеспечивает большую гибкость с точки зрения материала и дизайна печатной платы. Flex PCB и Rigid-Flex PCB возможны только благодаря SMT.
- снижение стоимости платы и материалов: размер печатных плат SMT меньше, и нет необходимости в любых металлизированных сквозных отверстиях. Также стоимость многих SMD-компонентов меньше, чем у Thru-Hole Electronic Components. Это помогает снизить стоимость изготовления печатных плат SMT. Поскольку сборки для поверхностного монтажа меньше и тоньше, снижается стоимость обработки, упаковки и транспортировки.
- автоматизированное упрощенное производство. Сквозные отверстия Электронные компоненты имеют выводы, которые необходимо вставлять в сквозные сквозные отверстия вручную. Эти провода должны быть согнуты, сформированы и разрезаны. Это не относится к компонентам

SMD. С автоматическим SMT Pick and Place Machine они могут быть автоматически размещены на доске. Это снижает стоимость обработки и производства.

– высокая передача сигнала и высокая частота: SMT PCB Assembly может поддерживать высокую плотность в основном на двухсторонней печатной плате и многопользовательской печатной плате. Из-за короткой задержки эти платы способны к высокоскоростной передаче сигнала. Кроме того, поскольку компоненты SMD не имеют выводов или коротких выводов, радиочастотные помехи уменьшаются. Кроме того, SMT PCB Assembly обеспечивают большую устойчивость к вибрации и отсутствие шума.

#### *Недостатки технологии поверхностного монтажа.*

– дорогое оборудование: Большая часть оборудования SMT, такого как печь для оплавления, машина для захвата и размещения, принтер для трафаретной пайки и даже паяльная станция с горячим воздухом SMD, являются дорогостоящими. Следовательно, сборочная линия для печатных плат SMT требует огромных инвестиций.

– сложный контроль: так как большинство компонентов SMD имеют малый размер и многочисленные паяные соединения, во время проверки становится очень сложно. Пакет BGA имеет шарики припоя и соединения под компонентом, и их очень трудно проверить. Также инспекционное оборудование SMT очень дорого.

– склонность к повреждению: компоненты SMD могут легко повредиться при падении. Также они очень чувствительны к ESD и нуждаются в продуктах ESD для обработки и упаковки. Там, как правило, обрабатываются в чистых помещениях.

– дорогое мелкосерийное производство: изготовление прототипа SMT PCB или мелкосерийного производства является дорогостоящим. Также есть несколько технических сложностей и требуется большой опыт и обучение.

– меньшая мощность: не все активные и пассивные электронные компоненты доступны в SMD. Как правило, мощность компонентов SMD меньше.

К ним относятся BGA (Ball Grid Array) — матрица из шариков представленные на рисунке 1.6 (а). Это тип микросхем, которые вместо выводов имеют припойные шарики. В наше время микросхемы BGA применяются в микроэлектронике. Их часто можно увидеть на платах мобильных телефонов, ноутбуков, а также в других миниатюрных и сложных устройствах.

#### *Преимущества BGA.*

– BGA предлагает несколько преимуществ по сравнению с другими электронными компонентами SMD. Наиболее важным преимуществом упаковки BGA для интегральных микросхем является ее высокая плотность

соединений. Пакеты BGA также занимают меньше места на печатной плате.;

- сборка шаровых решеток на печатные платы более эффективна и управляема, чем свинцовые электронные компоненты, потому что припой, необходимый для пайки корпуса на печатную плату, происходит от самих шариков припоя. Эти шарики припоя также «самоустанавливаются» во время монтажа.;

- более низкое тепловое сопротивление между корпусом BGA и платой в сборе является еще одним преимуществом этого типа упаковки. Это позволяет теплу течь более свободно, что приводит к лучшему рассеиванию тепла и предотвращает перегрев устройства.;

- BGA также предлагает лучшую электропроводность из-за более короткого пути между матрицей и печатной платой.

#### *Недостатки упаковки BGA.*

Как и все другие электронные пакеты, BGA также имеет некоторые недостатки. Ниже приведены некоторые из недостатков BGA:

- пакеты BGA более подвержены нагрузкам из-за напряжения при изгибе от печатной платы, что приводит к потенциальным проблемам надежности;

- проверка шариков припоя и паяных соединений на наличие дефектов очень трудна после того, как BGA припаяна на печатную плату.

Аббревиатура PGA означает (Pin Grid Array) – это матрица штырьковых выводов представленные на рисунке 1.6 (б). Такие процессоры имеют штырьковые контакты, которые вставляются в разъём. Для улучшения теплопроводности корпус PGA содержит медный стержень с никелевым покрытием в верхней части процессора. Контакты в нижней части микросхемы расположены в шахматном порядке. Кроме того, контакты расположены таким образом, что процессор можно вставить в разъем единственным способом. Это керамический корпус, ряды золоченых выводов которого расположены по периметру корпуса перпендикулярно его плоскости.

Конструкция корпусов интегральных микросхем PGA характерна для традиционного монтажа, поскольку требует наличия на плате установочных отверстий, в которые микросхема запаивается, или так называемых «кроваток» - установочных панелей, в которые микросхема вставляется без дальнейшей пайки.

Корпуса типа PGA применяются для микропроцессоров и других ИМ высокой степени интеграции. Эти ИМ, как правило, весьма дороги и устанавливаются чаще всего в «кроватки» (socket). Шаг между выводами у таких корпусов не менее 2,5 мм, количество выводов варьируется от 68 до 387. При большом количестве выводов такие микросхемы имеют довольно высокие массогабаритные показатели (масса до 84 г, размеры до 66x66 мм.) На корпусе PGA могут также располагаться пассивные чип-компоненты для развязки электрических цепей.

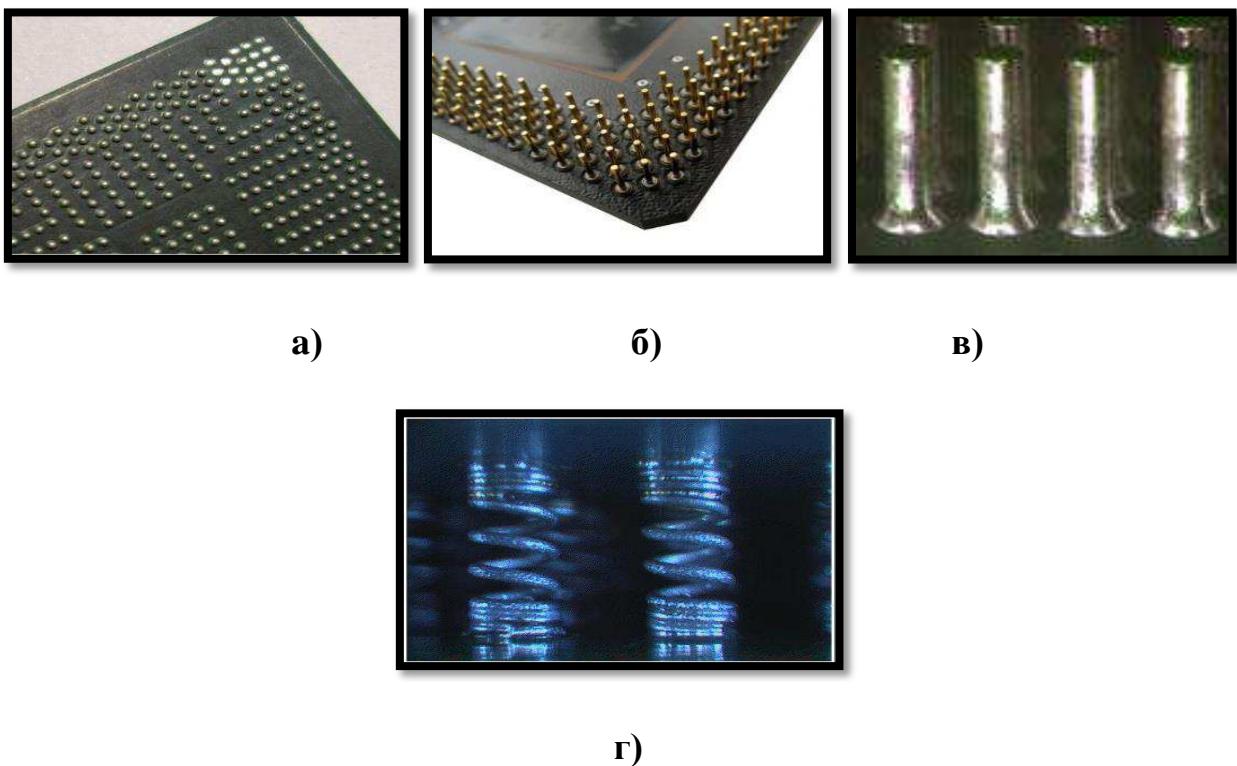
Корпуса типа PGA изготавливаются из керамики или пластмассы и для микропроцессоров используются как правило с принудительным внешним охлаждением - термоотводом (на верхней крышке устанавливается вентилятор). Такие меры позволяют обеспечить нормальный тепловой режим для полупроводниковых кристаллов больших размеров, поскольку отвод тепла для них является серьезной конструктивной проблемой.

Система CGA (контакты в виде столбиков из тугоплавкого припоя) представлены на рисунке 1.6 (в), представляет массив металлических штырьков, закрепленных на нижней поверхности керамического корпуса, которые служат для соединения микросхемы с печатной платой. Своими торцевыми поверхностями штырьки припаиваются к контактным площадкам. Для соединения такого типа вопрос надежности также представляет большую важность.

Несущие свойства паяных соединений BGA и CGA корпусов определялись для растягивающих и сдвиговых нагрузок. Приложение растягивающей нагрузки на элемент корпуса имитировало ситуацию прогиба платы в составе прибора при эксплуатационных нагрузках (ударных, вибрационных и др. нагрузках) и, если чип находится в зоне прогиба, перегрузку испытывают крайние или центральные контакты корпуса. А испытание на сдвиговые нагрузки моделирует термомеханическое разрушение вызванное напряжениями и деформациями, возникающими в электронном пакете из-за тепловой нагрузки от окружающей среды или внутреннего тепла при работе в составе аппаратуры (несоответствие в коэффициенте теплового расширения, среди различных материалов; температурные градиенты в системе и др.).

MCS (контакты в виде пружинок) представлены на рисунке 1.6 (г). – тип корпуса микросхемы с контактами в виде микропружинок. MCS вводится как улучшенная альтернатива стандартным жестким массивам, заменить массив столбцов, который обычно используется на интегральных микросхемах с очень высоким содержанием свинца.

Массив микропружинок был разработан НАСА для высших степеней надежности по сравнению с обычными столбиками.



а) BGA; б) PGA; в) CGA; г) MCS.

Рисунок 1.6 - Общий вид микросхем

Далее будет представлено исследование долговечности контактных соединений при произвольной нагрузке, включающий в себя:

- определение механических характеристик материала припоя, используемого для присоединения корпуса микрочипа к ЭП.
- проведение циклических испытаний материала припоя.
- проведение численного моделирования контактных соединений исследуемого корпуса микрочипа для определения максимума интенсивности напряжений в материале припоя при заданных нагрузках (моделям задаются характеристики и материалов полученные в п.1).
- определение сдвиговых деформаций при заданном диапазоне рабочих температур.
- расчет по результатам пункта 2 максимального количества циклов до разрушения контактного соединения.

Для определения механических характеристик припоя проведены испытания на одноосное растяжение и циклические испытания образцов из припоя ПОС-61 следующего вида: лопатки с рабочей частью длиной 35мм и сечением 8x8,5мм.

По результатам испытаний на одноосное растяжение определена билинейная зависимость напряжений от деформации для материала

припоя, сплошная линия – экспериментальные данные, пунктир – билинейная аппроксимация представленный на рисунке 1.7 (а).

Для определения параметров модели длительной прочности использовались соотношение Коффина-Менсона

$$N^m \Delta \varepsilon = C_N, \quad (1.1)$$

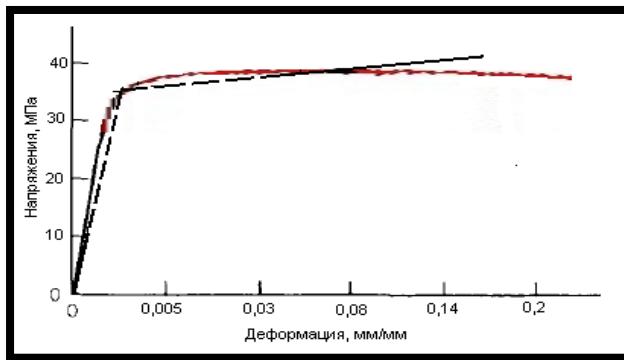
где  $N$  - количество циклов при данной деформации;

$\Delta \varepsilon$  - размах деформации;

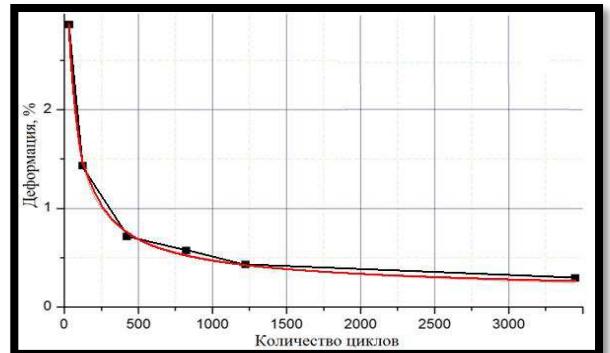
$C_N$ ,  $m$ - параметры модели.

Для данного материала  $C_N = 0,1892$ ,  $m = 0,53$ . Согласование результатов теоретических расчетов (пунктир) и экспериментальных данных (сплошная линия) представлено на рисунке 1.7 (б).

Даная зависимость позволяет спрогнозировать долговечность исследуемого материала при малоцикловой усталости без учета скорости



нагружения и при постоянной температуре.



а)

б)

а) зависимость напряжений возникающих в образце при соответствующем уровне деформаций, б) зависимость уровня деформаций от количества циклов до разрушения

Рисунок 1.7 – Результаты испытаний

Далее формулируется задача определения напряженно-деформированного состояния контактных паяных соединений корпуса микрочипа с ЭП.

Расчетная модель соединения включает часть микросхемы, контактные площадки печатной платы, саму плату и элемент BGA или PGA.

В общем случае состояние этой механической системы описывается нелинейной системой уравнений механики сплошных сред. Область пространства  $\Omega$ , которую занимает данная механическая система, имеет

сложную топологию и разделена на конечное число подобластей  $\omega_m$ ,  

$$\Omega = \sum_m \omega_m$$
.

В каждой подобласти  $\omega_m$  определены физико-механические свойства материала. Тогда для точки  $x \in \Omega$ ,  $x = (x_1, x_2, x_3)$  записывается система уравнений

$$\frac{\partial}{\partial x_k} \left( \sigma_{kj} \left( \delta_{ij} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \right) = 0 \quad (1.2)$$

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_k}{\partial x_j} \frac{\partial u_k}{\partial x_i} \right) \quad (1.3)$$

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ij}(\varepsilon_{ij}), \quad (1.4)$$

где  $\delta_{ij}$  – символ Кронекера;

$u_i, \sigma_{ij}, \varepsilon_{ij}$  – компоненты вектора перемещения, второго тензора напряжений Пиолы-Кирхгофа, тензора деформаций.

Материалы всех элементов конструкции за исключением материала припоя предполагаются изотропными и линейными. Тогда закон Гука для этих подобластей  $\omega_m$  имеет вид

$$\sigma_{ij} = \frac{E_m}{2(1+\nu_m)} (\varepsilon_{ij} + \frac{\nu_m}{1-2\nu_m} \delta_{ij} \varepsilon_{kk}), \quad (1.5)$$

где  $E_m$ ,

$\nu_m$  – модуль Юнга и коэффициент Пуассона  $m$ -го материала.

Для припоя закон Гука аппроксимируется билинейной зависимостью, состоящей из упругого и пластичного участков.

$$\sigma_{ij} = \begin{cases} k_1 \left( \frac{\nu_1 E_1}{(1+\nu_1)(1-2\nu_1)} \theta \delta_{ij} + \frac{E_1}{(1+\nu_1)} \varepsilon_{ij} \right), & 0 \leq \varepsilon_{ij} < \varepsilon_* \\ \sigma_0 + k_2 \left( \frac{\nu_2 E_2}{(1+\nu_2)(1-2\nu_2)} \theta \delta_{ij} + \frac{E_2}{(1+\nu_2)} \varepsilon_{ij} \right), & \varepsilon_* \leq \varepsilon_{ij} < \varepsilon_{**} \end{cases} \quad (1.6)$$

где  $k_1 = \operatorname{tg}\alpha$ ,

$k_2 = \operatorname{tg}\beta$ ,

$\alpha$  и  $\beta$  – углы наклона касательных к функциям на данном промежутке,

$E_1, v_1, E_2, v_2$  – модуль Юнга и коэффициент Пуассона для материала припоя на данном промежутке;

$\sigma_0$  – условный предел текучести;

$\varepsilon_*$  – уровень деформации при  $\sigma_0$ ;

$\varepsilon_{**}$  – уровень деформации, при котором материал разрушается.

Паяное соединение может содержать дефекты, уменьшающие его прочностную способность. Рассматривать какие-то конкретные типы дефектов смысла не имеет, потому что потребуется вводить большое количество параметров с целью охвата всего "букета" разнообразия. Поэтому решено рассматривать дефектность материала припоя как распределенную характеристику по всему объему паяного соединения.

Для определения состояния материала в текущий момент и прогнозирования оставшегося срока эксплуатации введем функцию поврежденности материала (заимствована у Москвитина В.В.), которая должна удовлетворять следующим условиям:

$$\omega(0)=0, \quad \omega(t_*)=1, \quad (1.8 \text{ a})$$

где  $t_*$  – время до наступления предельного состояния (разрушения).

Для оценки поврежденности материала, вводится выражение следующего вида

$$\omega(t, T) = \int_0^t \frac{(1+m_1)(t-\tau)^{m_1}}{t_0(\varepsilon, T)^{1+m_1}} d\tau, \quad (1.8 \text{ б})$$

где параметр

$m_1 = -1 + 1/m$  (для материала припоя  $m=0,53$ );

$\varepsilon$  – интенсивность деформации;

$t_0$  – долговечность для данного материала, определяемая из экспериментов при температуре  $T$  и не зависящая от времени деформации.

Для оценки повреждаемости паяных соединений при термоциклизации используем частный случай:

$$\omega(t, T) = v \int_0^t \frac{(1+m_1)(t-\tau)^{m_1}}{[C_1(a-bT)\Delta\varepsilon^{-m}]^{1+m_1}} d\tau, \quad (1.9 \text{ a})$$

где  $\Delta\varepsilon$  – размах деформаций, не зависящий от времени;

$v$  – частота нагружения;

$C_1$  и  $m$  – параметры модели, определенные для данного материала, где  $C_N(T)=C_1 \cdot E(T)$  и  $E(T) = a - bT$  ( $C_N=18,92$ ,  $m=0,53$  при температуре  $25^\circ\text{C}$ );

$a$  и  $b$  – параметры модели, отображающие зависимость модуля упругости материала от температуры ( $a = 6,4411$ ,  $b = 0,0284$ ).

После интегрирования соотношения получим аналитическую зависимость поврежденности материала от времени и при заданной температуре ( $T$ ), отличной от начальной:

$$\omega(t) = \left[ \frac{v}{c_1(a-bT)} \right]^{\frac{1}{m}} \Delta \varepsilon t^{\frac{1}{m}} \quad (1.9 \text{ б})$$

Система уравнений (1.2)–(1.4) дополняется граничными условиями. На закрепленных границах ставится условие

$$u_i(\bar{x}) = 0, \quad \bar{x} \in S_1, \quad (1.10)$$

а на остальных границах условие

$$n_k \sigma_{kj} \left( \delta_{ij} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) = 0, \quad \bar{x} \in S_2, \quad , \quad (1.11)$$

где  $S_1, S_2$  – границы области  $\Omega$ .

Проводится численное моделирование контактных соединений исследуемого корпуса микрочипа для определения максимума интенсивности напряжений в материале припоя при заданных нагрузках. Для получения адекватных результатов расчета с помощью программного пакета ANSYS для задания свойств материала припоя используются полученные в испытаниях данные.

Несущие свойства паяных соединений BGA и PGA корпусов определялись для растягивающих и сдвиговых нагрузок. Приложение растягивающей нагрузки на элемент корпуса имитировало ситуацию прогиба платы в составе прибора при эксплуатационных нагрузках (ударных, вибрационных и др.). Испытание на сдвиговые нагрузки моделирует термомеханическое разрушение вызванное напряжениями и деформациями, возникающими в электронном пакете из-за тепловой нагрузки от окружающей среды или внутреннего тепла при работе в составе аппаратуры (несоответствие в коэффициенте теплового расширения, среди различных материалов; температурные градиенты в системе и др.).

Несущие свойства элемента BGA определялись для растягивающих и сдвиговых нагрузок. Для элемента BGA рассматривались два случая: с обтеканием шарика контактной площадки и без обтекания, который представлен на рисунке 1.8 (а) и (б).

Рассмотрим случай без обтекания шарика контактной площадки. При осевых нагрузках задача может рассматриваться как осесимметричная

представленные на рисунке 1.8 (в). Нижняя сторона платы закреплена. Верхняя сторона микросхемы перемещается вертикально на заданную величину. На левой границе ставится условие симметрии.

Величина растягивающей силы определяется по формуле

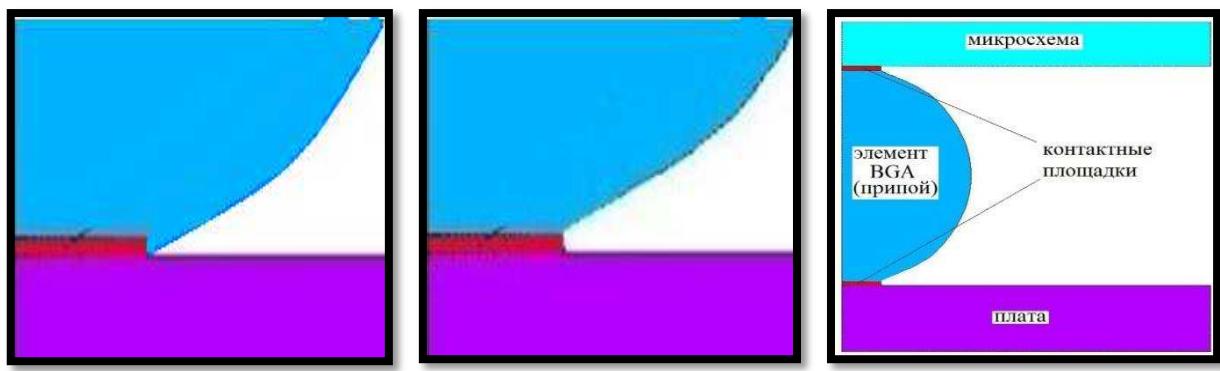
$$F = \int_S \sigma_{nn} dS , \quad (1.12)$$

где  $S$  - площадь максимального сечения элемента BGA;

$\sigma_{nn}$  - напряжения, нормальные к поверхности сечения.

Материал припоя упругопластичен.

В расчетах элемент BGA имел диаметр 0,5 мм, 0,6 мм, 0,7 мм, а диаметр контактных площадок соответственно равнялся 0,16 мм, 0,19 мм, 0,23 мм. Отношение размера контактных площадок к размеру элемента BGA приблизительно равно 0,32.



а) случай с обтеканием, б) случай без обтекания, в) расчетная модель

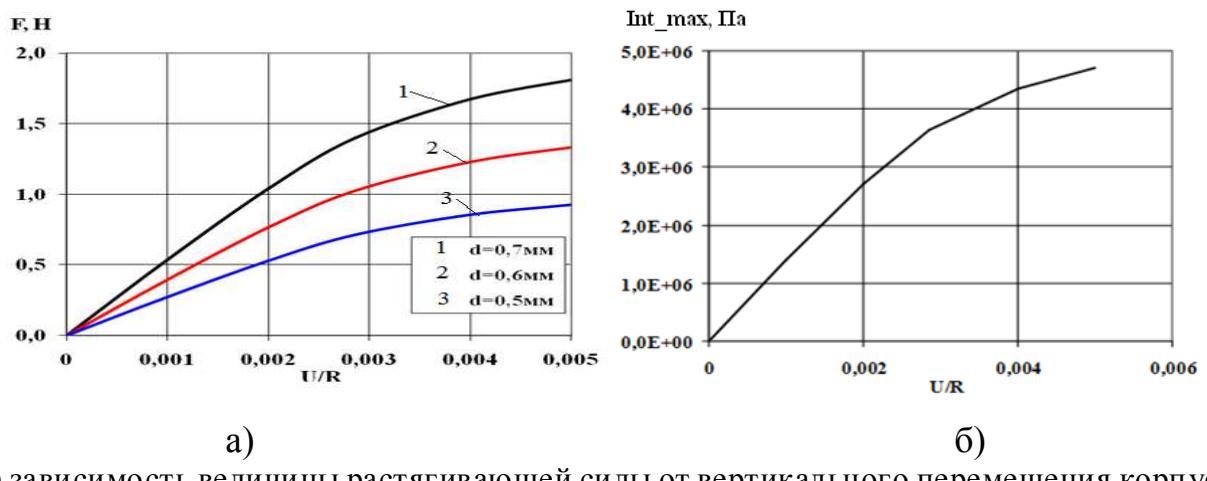
Рисунок 1.8 – Исследования НДСВГА соединения при растягивающих нагрузках

Несущая способность элемента BGA определялась по уровню интенсивности напряжений в материале элемента. Момент, когда интенсивность напряжений локально достигала величины предела прочности материала, считался началом разрушения элемента. Возможность отрыва припоя от контактных площадок не рассматривалась.

На рисунке 1.9 (а) приведены графики изменения растягивающей силы, действующей на элемент BGA, в зависимости от величины вертикального перемещения микросхемы и от диаметра элемента BGA. Величина  $U/R$  ограничена значением  $\approx 0,005$ , так как при этом

интенсивность напряжений в материале элемента BGA достигает предела прочности. Пока в материале преобладают упругие деформации, графики на рисунке 6а показывают прямую пропорциональность в зависимости  $F(U/R)$ . Развитие пластических деформаций приводит к нарушению этой зависимости. Из рисунка 1.9 (а) следует, что несущая способность элемента BGA при растягивающей нагрузке равна: 1,8 Н ( $d=0,7$  мм); 1,33 Н ( $d=0,6$  мм); 0,93 Н ( $d=0,5$  мм).

На рисунке 1.9 (б) показана зависимость максимума интенсивности напряжений в элементе BGA от величины вертикального перемещения корпуса микросхемы, отнесенного к радиусу элемента ( $U/R$ ).



- а) зависимость величины растягивающей силы от вертикального перемещения корпуса микросхемы; б) обобщенная зависимость максимума интенсивности напряжений в элементе BGA от вертикального перемещения корпуса микросхемы

Рисунок 1.9—Результаты решения

На рисунке 1.10 показано распределение интенсивности напряжений в элементе BGA перед началом его разрушения, когда достигается предел прочности материала. Видно, что пластические деформации охватывают нижнюю и верхнюю части объема элемента BGA (предел текучести  $2,6 \cdot 10^7$  Па). Центральная и периферийная части остаются в области упругих деформаций.

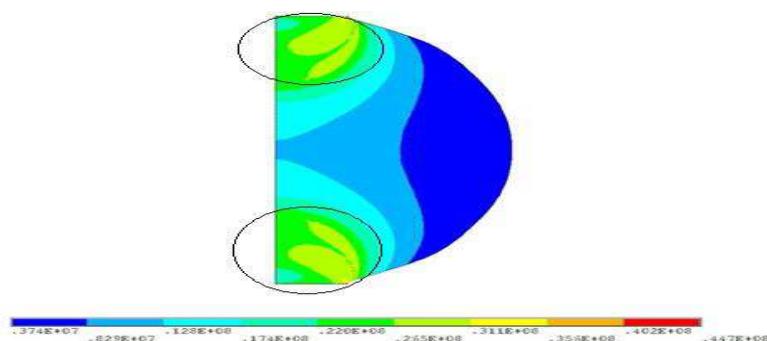


Рисунок 1.10- Распределение интенсивности напряжений в элементе BGA перед началом его разрушения (растягивающие нагрузки)

Несущие свойства элемента BGA при сдвиговых перемещениях корпуса микросхемы определяются из решения трехмерной задачи. Однако это решение обладает симметрией относительно плоскости проходящей через ось симметрии элемента BGA. Поэтому следует рассматривать только половину конструкции, которая лежит по одну из сторон плоскости симметрии представленный на рисунке 1.11.

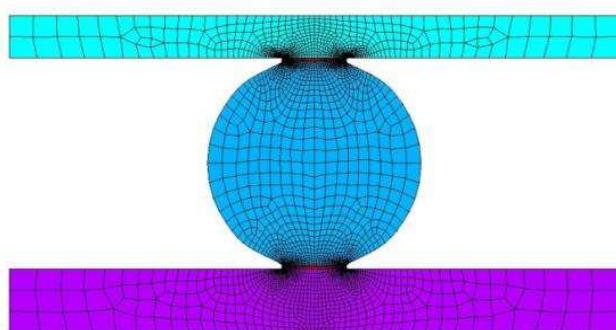
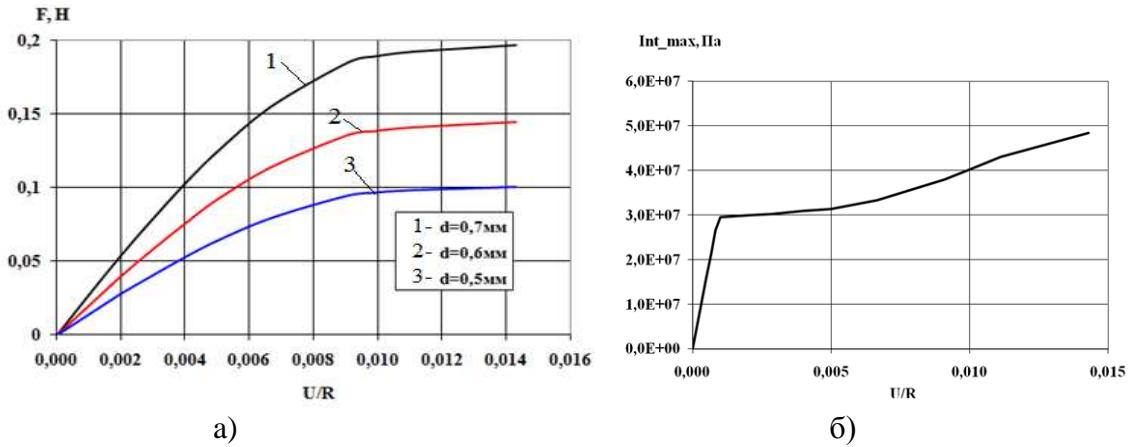


Рисунок 1.11 – Конечно-элементная модель элемента BGA

С использованием трехмерной модели были проведены расчеты, результаты которых представлены на рисунке 2.6. Построена зависимость величины силы, действующей в элементе BGA, при горизонтальном перемещении корпуса микросхемы представленный на рисунке 1.12(а). Расчеты показывают, что несущая способность элемента BGA при сдвиговой нагрузке равна: 0,2 Н ( $d=0,7$  мм); 0,15 Н ( $d=0,6$  мм); 0,1 Н ( $d=0,5$  мм).

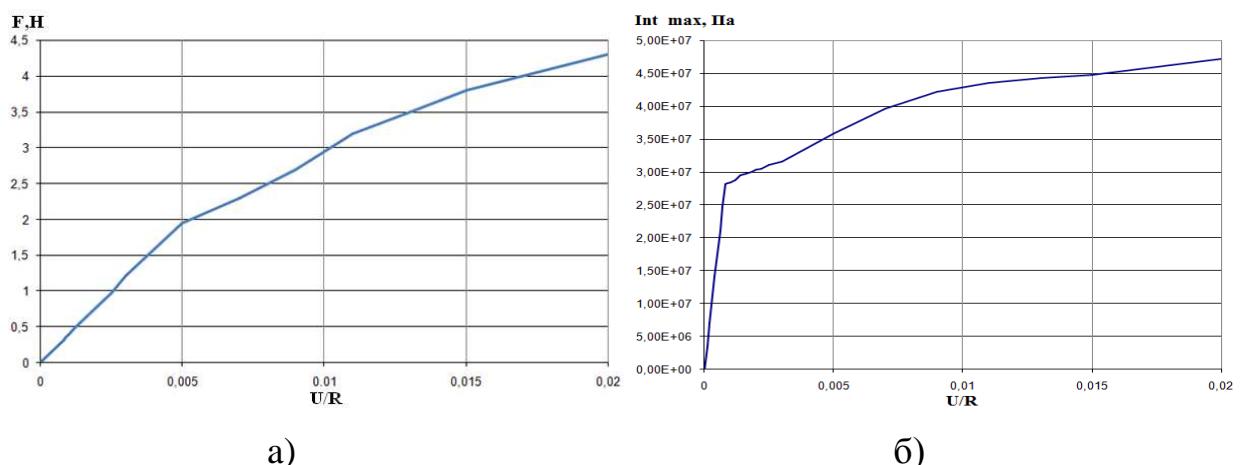
На рисунке 1.12 (б) показана зависимость максимума интенсивности напряжений в элементе BGA от величины горизонтального перемещения корпуса микросхемы. Видно, что при  $U/R < 0.001$  график является прямым. Это говорит о том, что элемент BGA работает в области упругих деформаций. При  $U/R > 0.001$  быстро растет влияние эффектов пластичности, что приводит к излому графика. Последующее увеличение величины максимальной интенсивности напряжений обусловлено постепенным упрочнением материала при росте пластических деформаций.



- а) зависимость величины силы, действующей в элементе BGA, от горизонтального перемещения корпуса микросхемы; б) зависимость максимума интенсивности напряжений в элементе BGA от величины горизонтального перемещения корпуса микросхемы

Рисунок 1.12 – Результаты решения

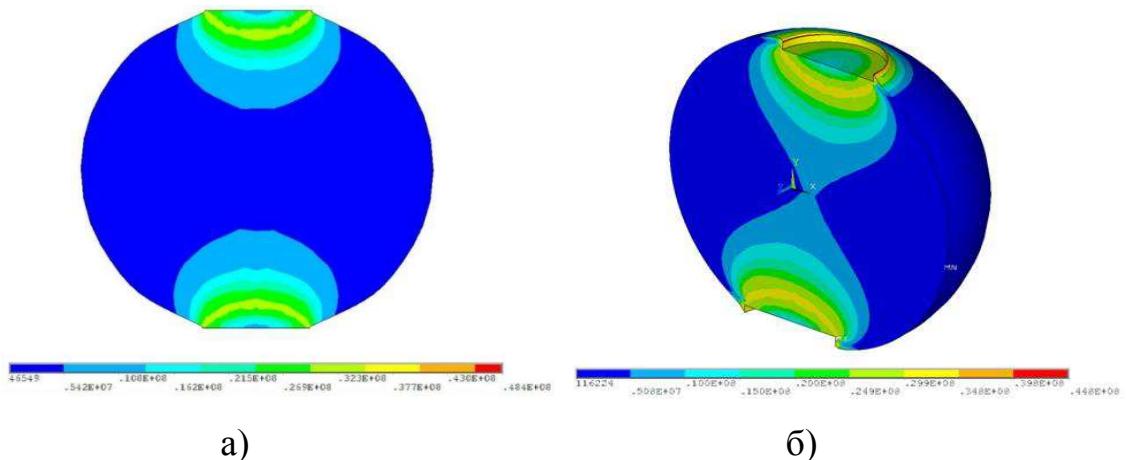
Рассмотрим случай натекания припоя наконтактную площадку. Из проведенного выше анализа определено, что прочностные свойства контактного соединения типа BGA линейно зависят от увеличения диаметра шарика, поэтому решено, для данного случая рассмотреть контактное соединение диаметром 0,7 мм, как наиболее прочное. С использованием трехмерной модели были проведены расчеты, результаты которых представлены на рисунке 2.7. Построена зависимость величины силы, действующей в элементе BGA, при горизонтальном перемещении корпуса микросхемы представленной на рисунке 1.13 (а). Расчеты показывают, что несущая способность элемента BGA при сдвиговой нагрузке равна 4,3 Н. На рисунке 1.13 (б) показана зависимость максимума интенсивности напряжений в элементе BGA от величины горизонтального перемещения корпуса микросхемы.



- а) зависимость величины силы, действующей в элементе BGA, от горизонтального перемещения корпуса микросхемы; б) зависимость максимума интенсивности напряжений в элементе BGA от величины горизонтального перемещения корпуса микросхемы

Рисунок 1.13 – Результаты решения

На рисунке 1.14 показано распределение интенсивности напряжений в элементе BGA в обоих случаях перед началом его разрушения, когда достигается предел прочности материала. Область пластических деформаций расположена вблизи контактных поверхностей.



а) случай без обтекания припояем контактной площадки, б) случай с обтеканием

Рисунок 1.14 - Распределение интенсивности напряжений в элементе BGA перед началом его разрушения (сдвиговые нагрузки)

Несущие свойства элемента PGA определялись для растягивающих нагрузок. В общей постановке эта задача не отличается от аналогичной задачи для элемента BGA и рассматривается как осесимметричная. Существенное различие состоит в том, что элемент BGA, связывающий микросхему и плату, является геометрически большим объектом в рамках рассматриваемой задачи. В случае с PGA припой является тонкой прослойкой между торцом стержневого контакта и контактной площадкой на плате. В тоже время напряженно-деформированное состояние этой прослойки представляет наибольший интерес, так как именно она отвечает за прочность рассматриваемого соединения.

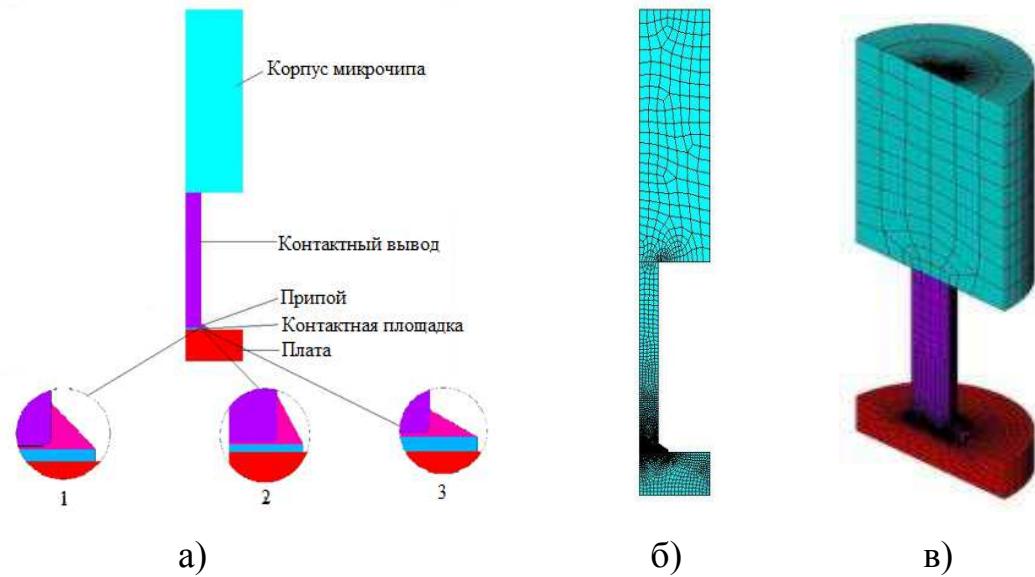
Общий вид соединения показан на рисунке 1.15. В представленной расчетной модели толщина припоя между стержневым контактом и контактной площадкой была постоянной. В задаче рассматривалось влияние объема припоя, нанесенного на контактную площадку, на прочность последующего соединения. Это влияние моделировалось путем высоты, на которую затекал припой при взаимодействии со стержневым контактом, как это показано на выносках рисунка 1.15 (а).

На рисунке 1.15 (б) показана конечно-элементная модель соединения. Ставились следующие граничные условия: нижняя сторона платы

закреплена; верхняя сторона микросхемы перемещается вертикально на заданную величину; на левой границе ставится условие симметрии.

Толщина слоя припоя под торцом стержневого контакта  $h=0.01$  мм.

Высота натекания припоя принимала значения  $H=0,14$  мм;  $0,21$  мм;  $0,07$  мм.



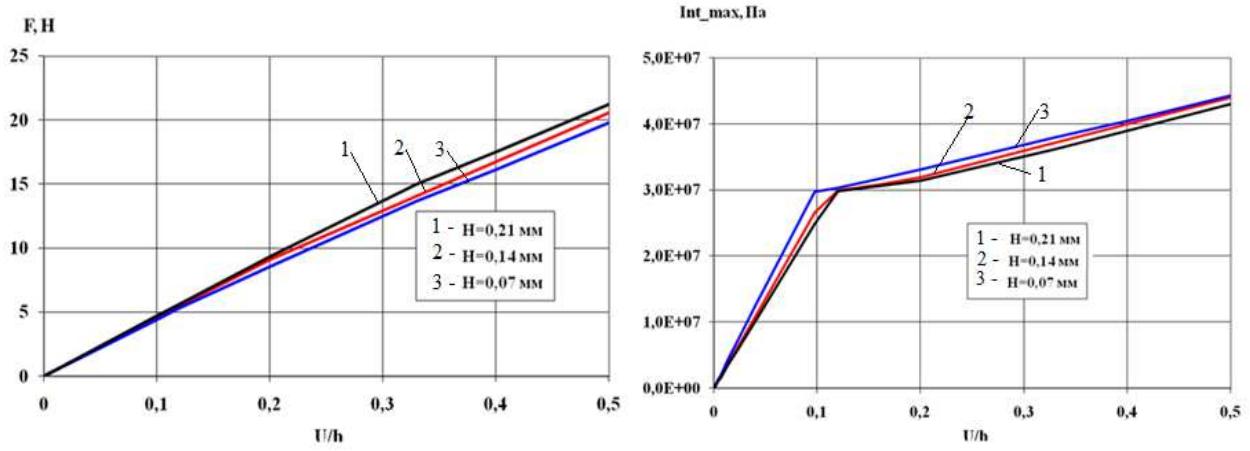
а) расчетная модель; б) конечно-элементная модель; в) объемный случай

Рисунок 1.15 – Исследования НДС PGA соединения

Физико-механические свойства припоя были такие же, что и в задачах о BGA соединении. Элемент PGA считался медным. Его размеры: диаметр – 0,52 мм; высота – 2,2 мм. На торце имеется скругление с радиусом, равным 0,026 мм.

На рисунке 1.16 (а) показано изменение растягивающей силы, действующей на элемент PGA в зависимости от вертикального перемещения корпуса микросхемы. Момент, когда интенсивность напряжений локально достигала величины предела прочности материала, считался началом разрушения элемента. Этому состоянию соответствует значение  $U/h=0,5$ . Максимальная нагрузка на элемент PGA равнялась 21,3 Н ( $H=0,07$  мм); 20,6 Н ( $H=0,14$  мм); 19,8 Н ( $H=0,21$  мм). Зависимость  $F(U/h)$  во всех случаях можно считать линейной. Результаты показали слабую зависимость максимальной растягивающей силы от высоты натекания припоя на элемент PGA.

На рисунке 1.16 (б) приведена зависимость максимума интенсивности напряжений в слое припоя от величины вертикального перемещения корпуса микросхемы. Все графики имеют линейные начальные участки, соответствующие линейным деформациям. При достижении предела текучести происходит излом графиков, и дальнейшее увеличение максимума интенсивности напряжений происходит за счет пластичного упрочнения материала.



а)

б)

- а) зависимость величины силы, действующей в элементе PGA, от вертикального перемещения корпуса микросхемы; б) зависимость максимума интенсивности напряжений в слое припоя от величины вертикального перемещения корпуса микросхемы

Рисунок 1.16 – Результаты расчета

Несущие свойства элемента PGA определялись для сдвиговых нагрузок. На рисунке 1.15 (в) показана конечно-элементная модель соединения. Ставились следующие граничные условия: нижняя сторона платы закреплена; левая сторона микросхемы перемещается горизонтально на заданную величину.

Толщина слоя припоя под торцом стержневого контакта  $h=0.01 \text{ mm}$ .

Высота натекания припоя принимала значения  $H=0,07 \text{ mm}$ ;  $0,14 \text{ mm}$ ;  $0,21 \text{ mm}$ .

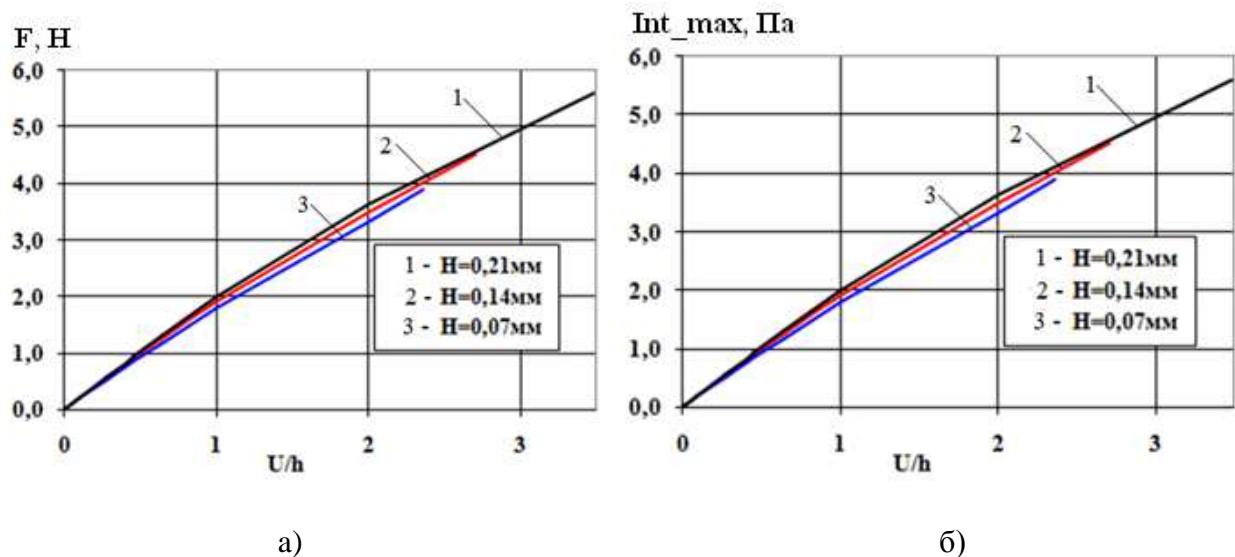
Несущие свойства элемента PGA при сдвиговых перемещениях определялись решения трехмерной задачи. Вследствие симметрии рассматривается только половина конструкции, как показано на рисунке 1.15 (в).

На рисунке 1.17 (а) показана зависимость сдвиговой силы, действующей в элементе PGA, от величины горизонтального перемещения корпуса микросхемы. Максимум сдвиговой силы ограничен достижением интенсивности напряжений, действующих в припое, предел прочности материала.

На величину сдвиговой силы оказывает существенное влияние уровень натекания припоя. Для  $H=0,21 \text{ mm}$  и  $H=0,07 \text{ mm}$  разница составляет  $1,5 \text{ N}$ .

На рисунке 1.17 (б) приведена зависимость максимума интенсивности напряжений в слое припоя от величины горизонтального сдвига корпуса микросхемы. Так же как и в случае BGA контакт представленный на рисунке 1.9 (б) графики состоят из двух участков: первый соответствует соответствующие линейным деформациям; второй - пластическим

деформациям. Эти участки разделяются точкой излома графика. В этом случае существенна зависимость максимума интенсивности напряжений от уровня натекания припоя.



а)  
б)

зависимость величины силы, действующей в элементе PGA, от величины горизонтального сдвига корпуса микросхемы; б) зависимость максимума интенсивности напряжений в слое припоя от величины горизонтального перемещения корпуса микросхемы

Рисунок 1.17 – Результаты решения

На рисунке 1.18 показано распределение интенсивности напряжений в припое, соединяющем элемент PGA с платой, при действии сдвиговых нагрузок. Показано распределение вблизи момента начала разрушения. Высота натекания припоя равна 0,07 мм. Из рисунка видно, что максимальные значения интенсивности напряжений достигаются на границе припой - элемент PGA.

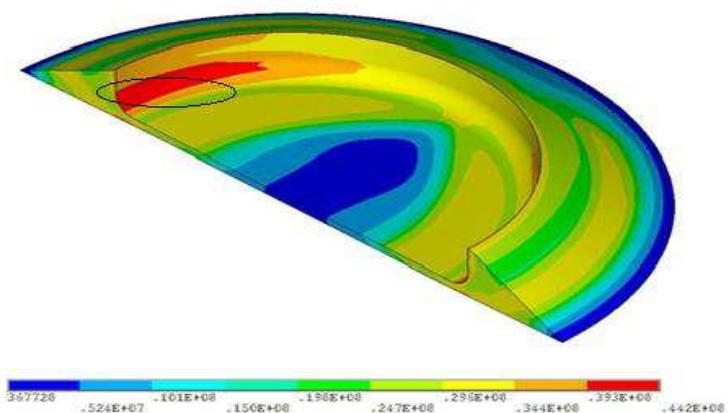


Рисунок 1.18 – Распределение интенсивности напряжений в припое, соединяющем элемент PGA с платой

Результаты численного моделирования показывают, что при сравнимых характерных размерах BGA контактов и PGA выводов последние являются более надежными с позиций отрывных нагрузок и по отрывному усилию на порядок превосходят BGA контакты.

При размерах наплывов припоя на цилиндрическую поверхность контакта PGA более четверти диаметра контактного вывода увеличения прочности при отрыве не несут.

Результаты исследования на растягивающие нагрузки показали, что системы выдерживают небольшие нагрузки, поэтому при изготовлении ЭП, содержащих в монтаже чипы с BGA и PGA корпусами, необходима проверка устойчивости паяных соединений этих систем к эксплуатационным нагрузкам.

#### Оценка несущей способности контактных соединений

По полученным результатам моделирования НДС контактных соединений корпусов микрочипов (BGA и PGA) и результатам других исследователей (данные о корпусах типа MCS взяты из отчета NASA) построен график зависимости максимума интенсивности напряжений в паяном соединении (в Па) от горизонтального перемещения чипа относительно платы (в мм) представленный на рисунке 1.19. На рисунке приняты обозначения: BGA\* - BGA при обтекании припоя контактной площадки, BGA – BGA без обтекания.

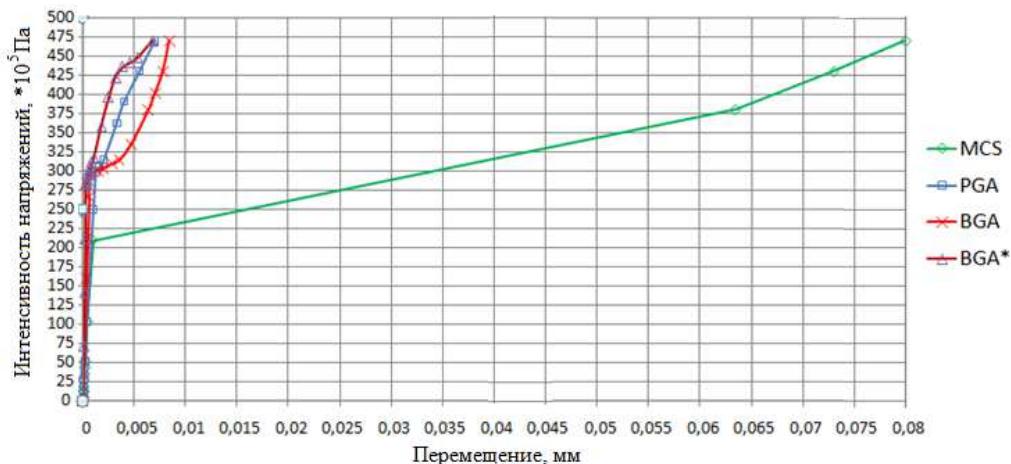


Рисунок 1.19 – Результаты расчета

Для оценки несущей способности рассмотренных контактных соединений, определяется сдвигт для них при температурном цикле от  $-30^{\circ}\text{C}$  до  $+70^{\circ}\text{C}$ по выражению (взято у R.R. Tumalla):

$$\tau = L(\alpha_b - \alpha_c)(T_{\max} - T_0) + L(\alpha_b - \alpha_c)(T_0 - T_{\min}) \quad (1.13)$$

где  $L$  – расстояние от контакта до геометрического центра корпуса микрочипа;

$\alpha_b$  и  $\alpha_c$  – коэффициенты теплового расширения печатной платы и корпуса микрочипа соответственно;

$T_0$ ,  $T_{min}$  и  $T_{max}$  – температура при нормальных условиях, минимальное и максимальное значение температуры в цикле соответственно.

Чтобы получить значения максимума интенсивности напряжений в паяном соединении контакта, соотносим сдвиг с результатами на графике.

Сдвиговая деформация вычисляется по соотношению (его вид определялся из испытаний на одноосное растяжение образцов из материала припоя)

$$\varepsilon(\sigma, t) = \left(\frac{\sigma}{E}\right) + A_1 \left(\frac{\sigma}{E}\right)^{B_1} \quad (1.14)$$

где  $A_1=1.17\cdot10^{57}$ ;

$B_1=22.26$ ;

$E=16.082\cdot10^9$  Па.

Для определения количества циклов до момента, когда контактное паяное соединение потеряет свою несущую способность при заданной нагрузке, используется выражение

$$\omega(t) = \left[ \frac{v}{C_1(a-bT)} \right]^{\frac{1}{m}} \Delta \varepsilon t^{\frac{1}{m}} \quad (1.15)$$

Для расчета применялись следующие данные:

- скорость нагружения  $v = 1.39\cdot10^3$  циклов/с (протяженность температурного);
- цикла по времени равна 1 циклу в 2 часа);
- константы модели  $C_1=3.3012$ ,  $a=6.4411$ ,  $b=0.0284$ ;
- повреждаемость изменяется в диапазоне  $0 \leq \omega(t) \leq 1$ .

По результатам решения построена зависимость степени повреждаемости паяного соединения от времени работы при данной скорости нагружения для каждого типа контактов представленный на рисунке 1.20. На графике показано, что при данной скорости нагружения корпус чипа на PGA контактах отработает 2500 часов, на BGA контактах (без натекания припоя на контактную площадку) – 3600 часов, на BGA контактах (с натеканием припоя на контактную площадку) – 2250 часов, на MCS контактах – 6500 часов.

По результатам теоретического расчета долговечности контактных соединений корпуса микрочипа с ЭП при термоциклировании самым надежным является корпуса на MCS контактах.

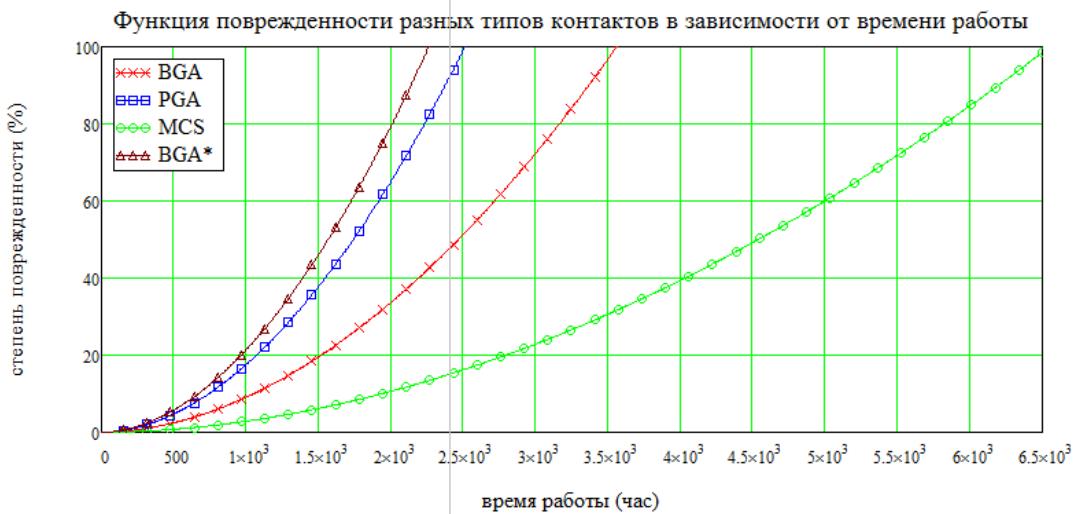


Рисунок 1.20 – Результаты расчета

## 2 Моделирование силовой конструкции

Большинство современной радиоэлектронной аппаратуры сочетает в своей конструкции механическую и электрическую составляющие. Однако, несмотря на постоянное совершенствование средств компьютерного моделирования, проектирование электрической части ведется отдельно от механической, в результате чего возникают ошибки компоновки, трансляции, затруднено определение массовоинерционных характеристик и т.п. Также необходим комплексный инженерный анализ с точки зрения механики, динамики, тепла, собственно радиоэлектроники, а иногда и оптики и светотехники.

Наиболее эффективным способом решения этих проблем является применение специализированного программного обеспечения, которое является популярной у специалистов в сфере автоматизированных инженерных расчётов САПР и конечно элементарные решения линейных и нелинейных, стационарных и нестационарных пространственных задач механики деформируемого твёрдого тела и механики конструкций (включая нестационарные геометрически и физически нелинейные задачи контактного взаимодействия элементов конструкций), задач механики жидкости и газа, теплопередачи и теплообмена, электродинамики, акустики, а также механики связанных полей. Для этих решений выбрана программа *Ansys* –универсальная программная система конечно-элементного анализа.

В этой программе были построены модели двух конструкций, рассматриваемой конструкции, которая используется на КА и разрабатываемая конструкция с применением ребер жесткости.

Для начала моделирования необходимо проверить принятые конструкторско-технологические решения на прочность при воздействии квазистатических нагрузок.

Критерием оценки прочности служит запас прочности по текучести (2.1) для металлов и запас прочности по пределу прочности (2.2) для неметаллов.

$$\eta_T = \frac{\sigma_T}{\sigma_P}, \quad (2.1)$$

$$\eta_B = \frac{\sigma_B}{\sigma_P}, \quad (2.2)$$

- где  $\eta_T$  – запас прочности по текучести;  
 $\eta_B$  – запас прочности по пределу прочности;  
 $\sigma_T$  – напряжение предела текучести;  
 $\sigma_B$  – напряжение предела прочности;  
 $\sigma_P$  – максимальное расчетное напряжение в приборе.  
Запасы прочности  $\eta_T$  и  $\eta_B$  должны быть не менее 1.  
Максимальные напряжения вычислялись по модели Фон Мизеса.

Резонансные частоты элементов конструкции должны быть больше 150 Гц.

## 2.1 Описание конструкции

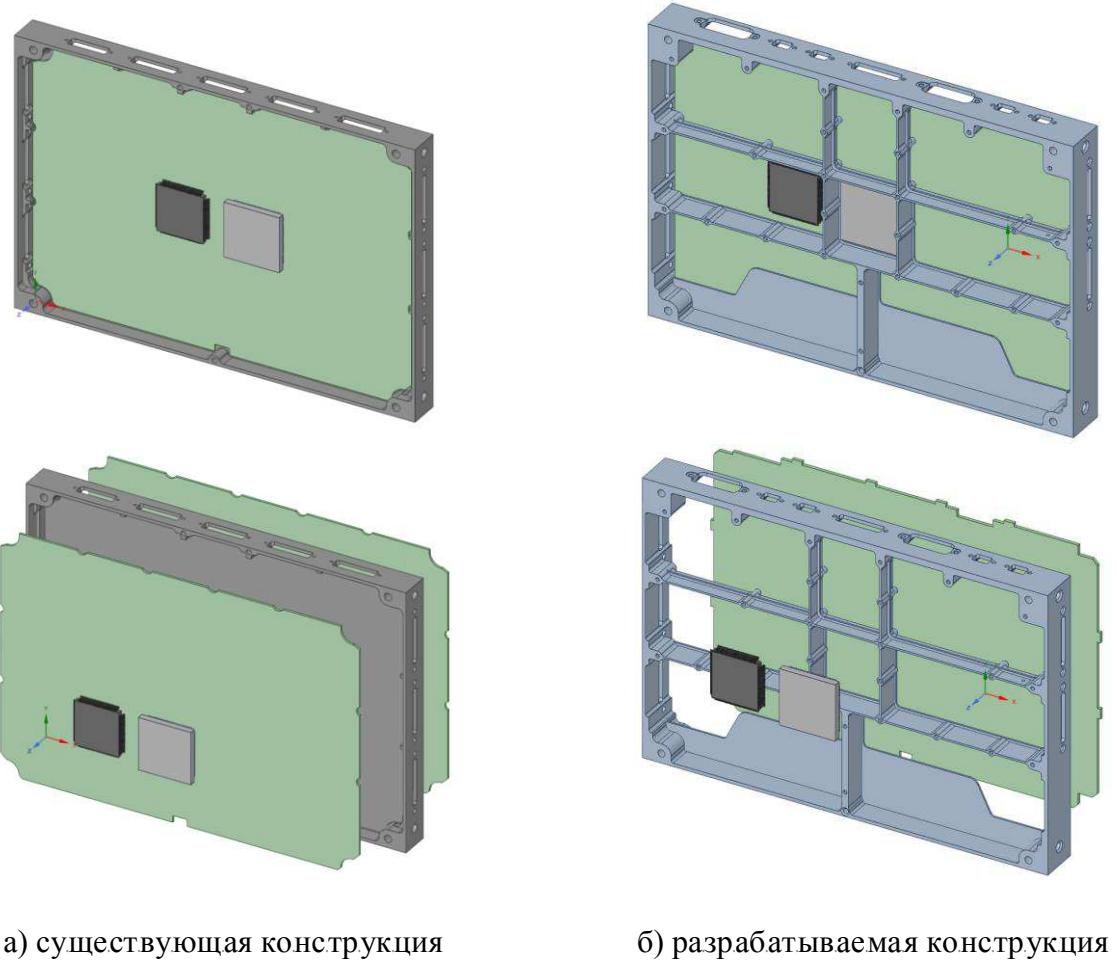


Рисунок 2.1 – Общий вид

Рассматриваются 2 варианта конструкции представленные на рисунке 2.1 одинаковой массы и габаритных размеров. Каждая конструкция состоит из алюминиевой рамки с платами со смонтированными многовыводными ЭРИ.

В таблице 2.1 представлены используемые материалы в модели.

Таблица 2.1 – Материалы, используемые в модели

Материал	Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Модуль Юнга $E$ , ГПа	Коэф. Пуассона $\mu$	Предел текучести $\sigma_t$ , МПа	Предел прочности $\sigma_b$ , МПа
Алюминий	2700	70	0,31	155	330
Медь	8940	130	0,4	280	450
Стеклотекстолит	1750	20	0,273	-	300

T					
Припой ПОС61	8500	120	0,46	26	47
Керамика	3880	247	0,22	-	280

Согласно нормам прочности, принятым в АО «ИСС», выбраны максимальные требования по стойкости бортовой радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) к квазистатическим нагрузкам, представленным в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Статическая нагрузка

Ускорение, м/с <sup>2</sup> (g)
±20 g

Конечно-элементная модель (КЭМ) создана для расчета в пакете ANSYS. Общая масса элементов геометрически отсутствующих в моделях (ЭРИ, соединители и пр.) равномерно распределялась по поверхностям, где предполагается их наличие. КЭМ конструкций представлен на рисунке 2.2.

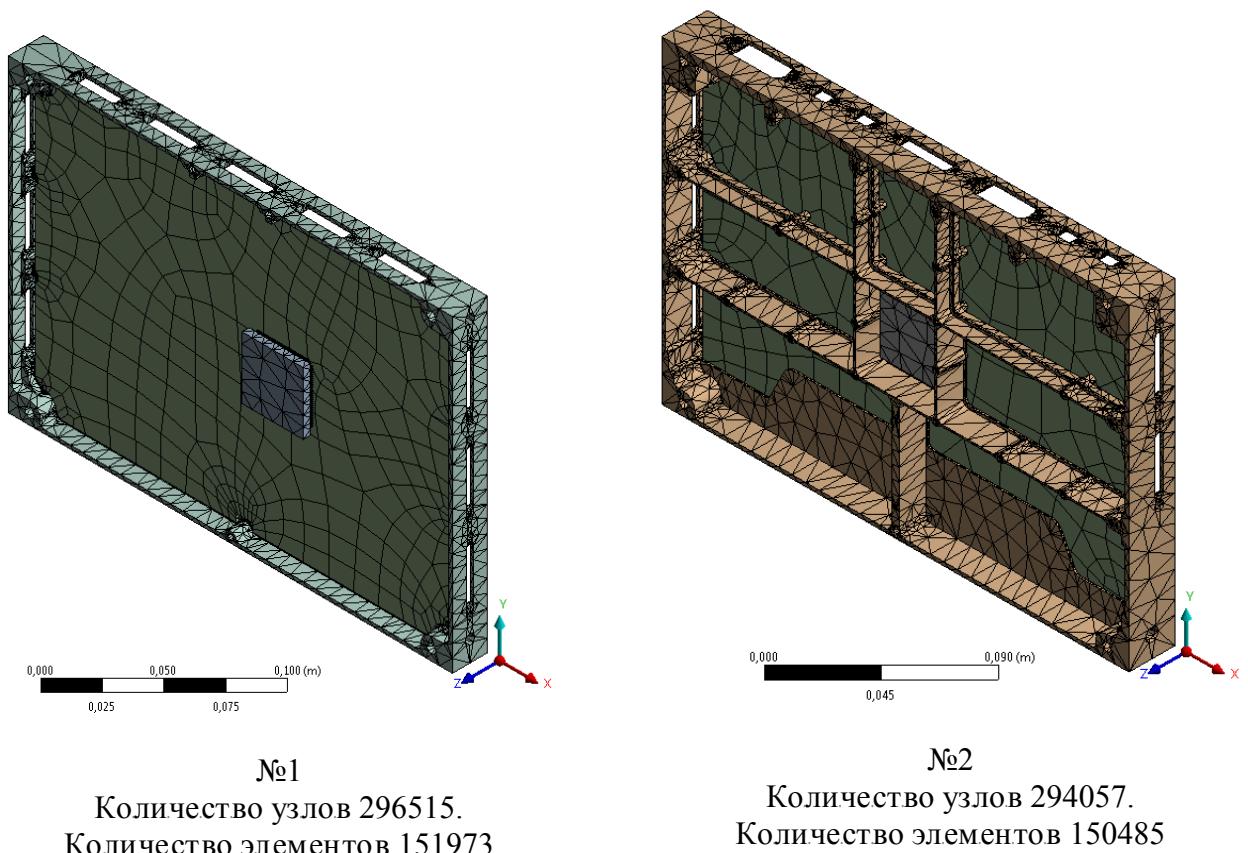


Рисунок 2.2 – КЭМ исследуемых конструкций

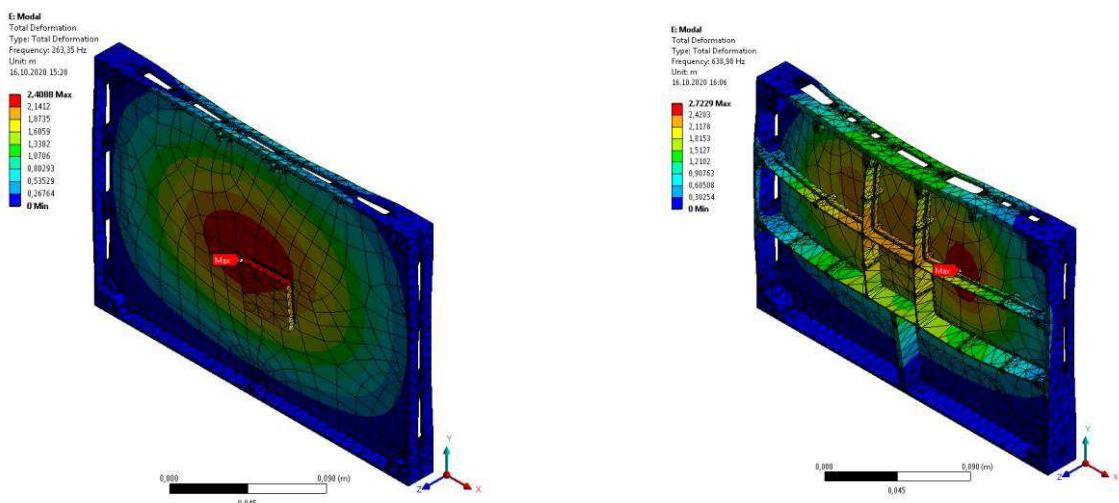
Граничные условия: нижняя плоскость (подошва) рамки, боковые отверстия для крепления рамки в приборе – жесткая заделка.

Модальный анализ проводился на КЭМ, показанной на рисунке 2.2. Для расчета использовался пакет ANSYS. В таблице 2.3 представлены результаты поиска резонансных частот. Максимальные эффективные массы принадлежат 1-ой, 2-ой и 3-ей резонансным частотам.

Таблица 2.3 – Результаты поиска резонансных частот

Мода. №	Частота (№1), Гц	Частота (№2), Гц
1	263,3	638,9
2	487,3	948,0
3	680,6	1045,4
4	806,5	1202,2
5	1045,7	1273,7
6	1182,2	1395,4
7	1205,7	1420,4
8	1437,6	1663,4
9	1585,5	1717,2
10	1688,4	1763,1
11	1843,4	1908,6
12	1891,3	1993,5

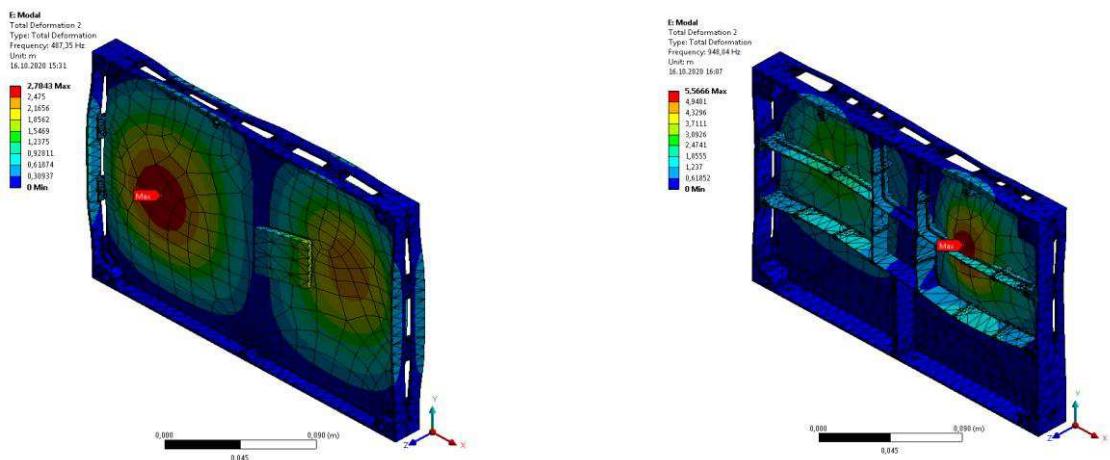
На рисунках 2.3-2.14 показаны формы с наибольшими эффективными массами.



$$F1_{\text{№1}}=263 \text{ Гц}$$

$$F1_{N_02}=638,9 \text{ Гц}$$

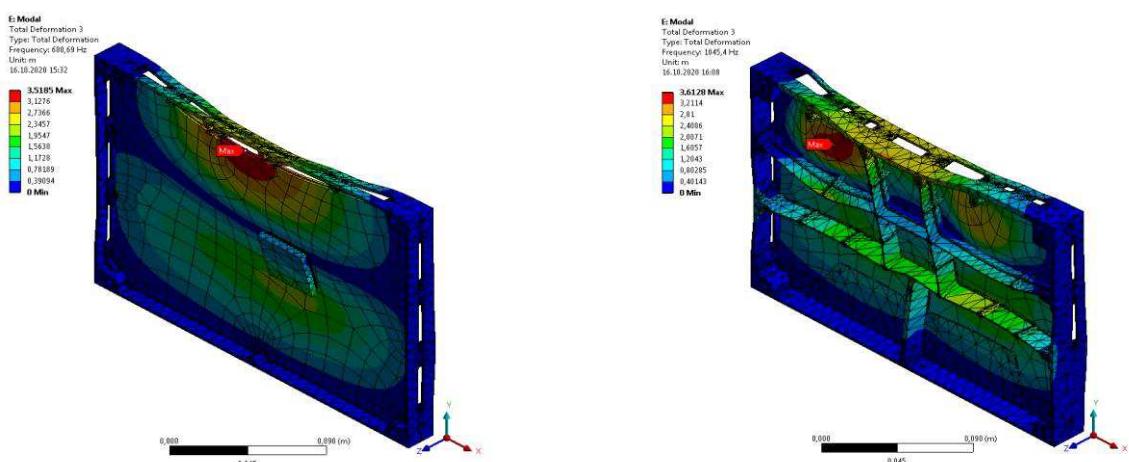
Рисунок 2.3 – Первая форма частот по оси OZ



$$F2_{N_01}=487 \text{ Гц}$$

$$F2_{N_02}=948,0 \text{ Гц}$$

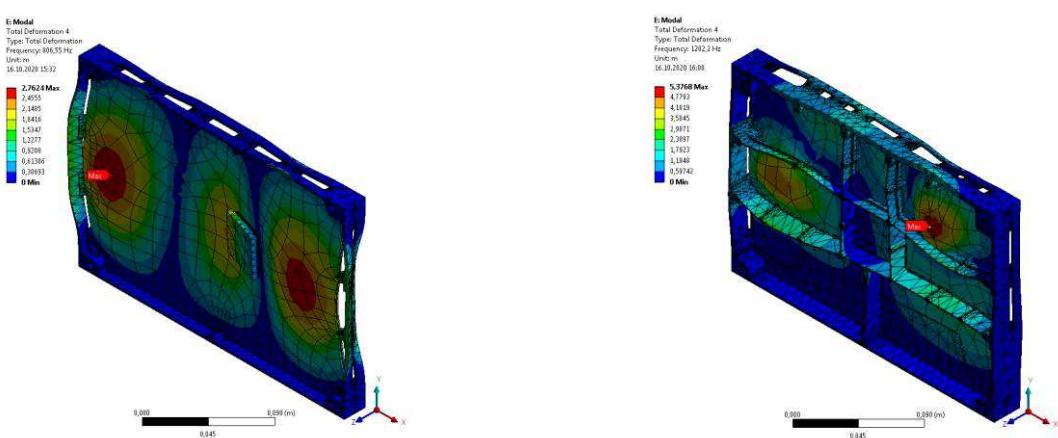
Рисунок 2.4 – Первая форма частот по оси OZ



$$F3_{N_01}=680 \text{ Гц}$$

$$F3_{N_02}=1045,4 \text{ Гц}$$

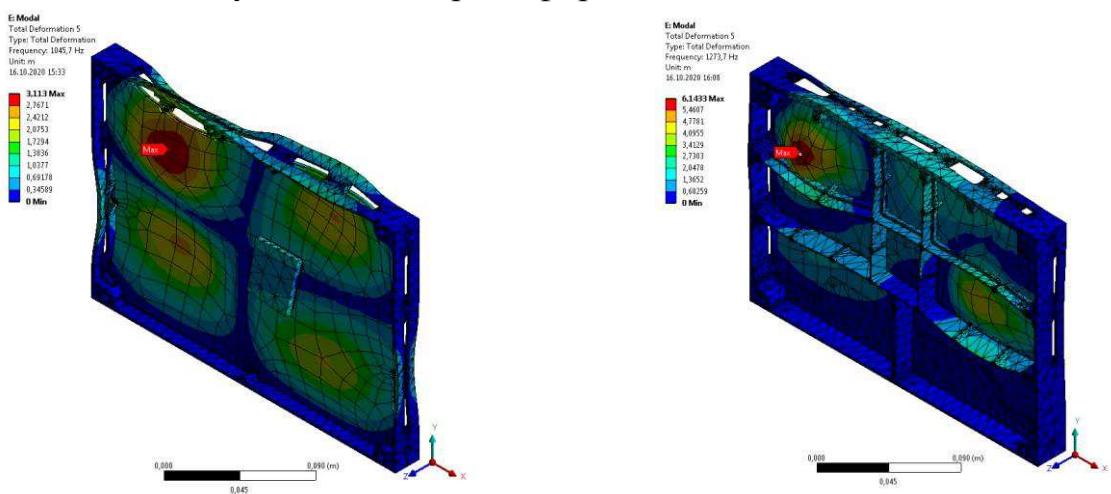
Рисунок 2.5 – Первая форма частот по оси OZ



F4<sub>N<sub>Ω</sub>1</sub>=806 Гц

F4<sub>N<sub>Ω</sub>2</sub>=1202,2 Гц

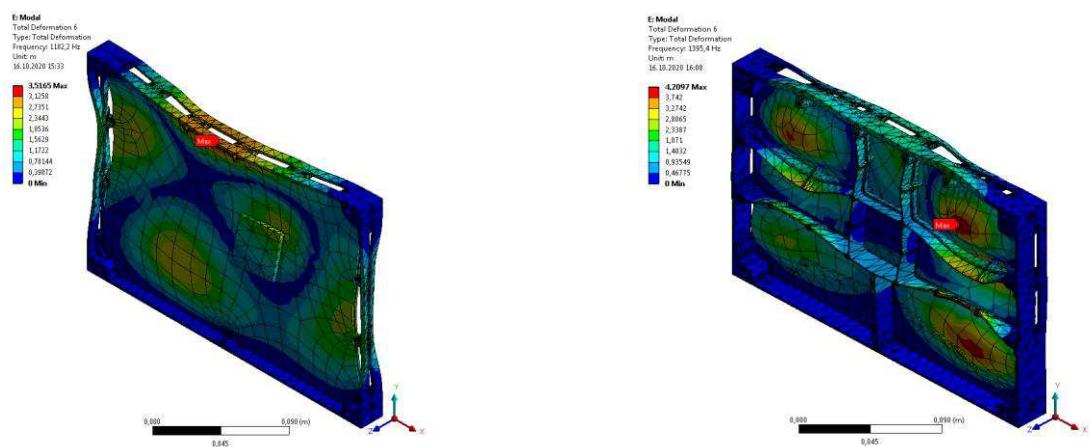
Рисунок 2.6 – Первая форма частот по оси OZ



F5<sub>N<sub>Ω</sub>1</sub>=1045 Гц

F5<sub>N<sub>Ω</sub>2</sub>=1273,7 Гц

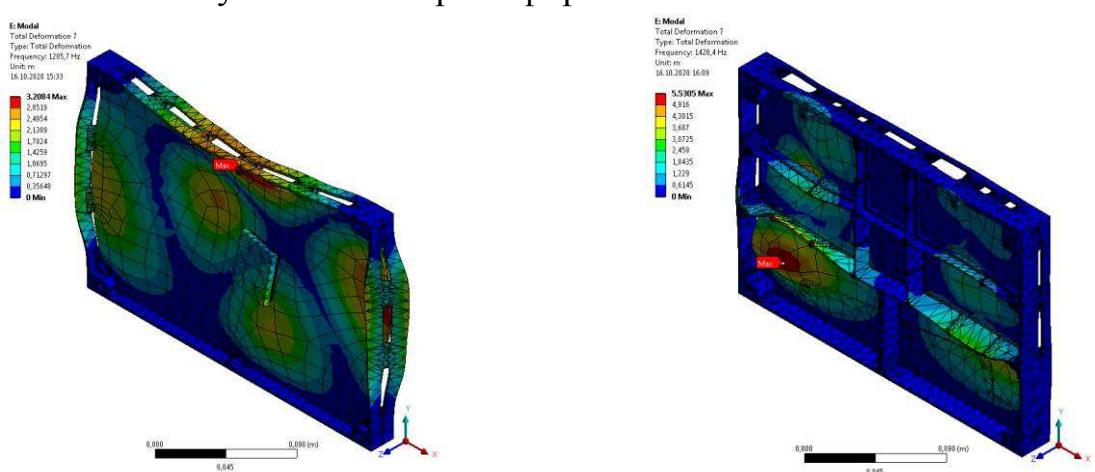
Рисунок 2.7 – Первая форма частот по оси OZ



F6<sub>N<sub>Ω</sub>1</sub>=1182 Гц

F6<sub>N<sub>Ω</sub>2</sub>=1395,4 Гц

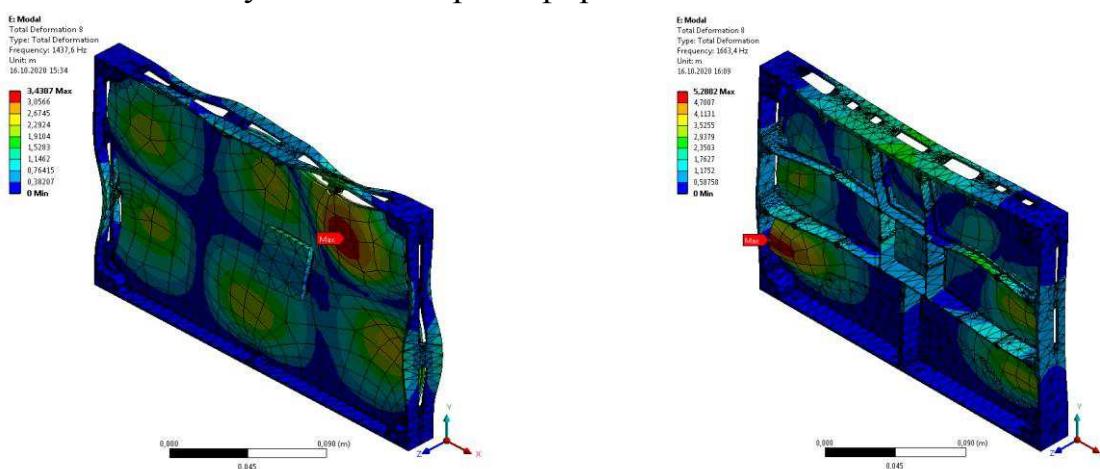
Рисунок 2.8 – Первая форма частот по оси OZ



F7<sub>No1</sub>=1205 Гц

F7<sub>No2</sub>=1420,4 Гц

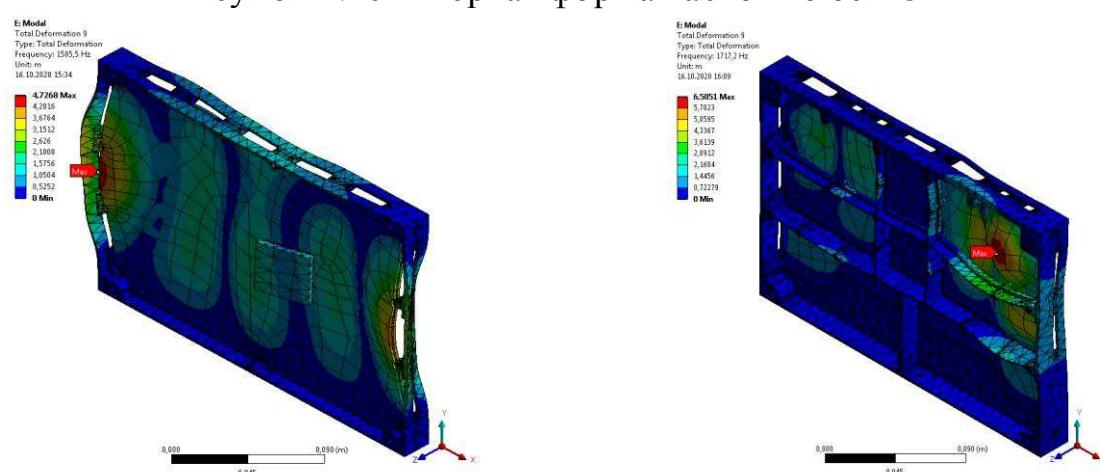
Рисунок 2.9 – Первая форма частот по оси OZ



F8<sub>No1</sub>=1437 Гц

F8<sub>No2</sub>=1663,4 Гц

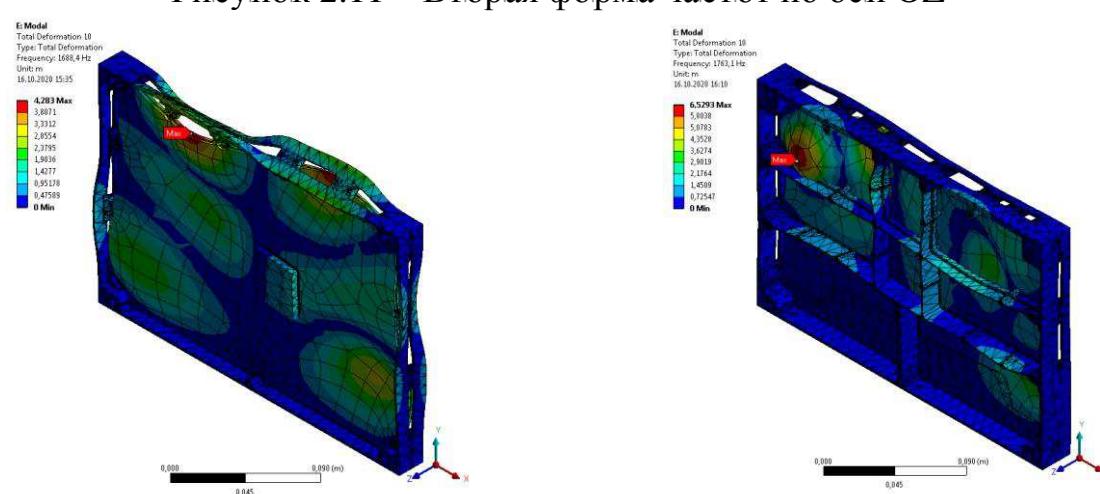
Рисунок 2.10 – Первая форма частот по оси OZ



F9<sub>No1</sub>=1585 Гц

F9<sub>No2</sub>=1717,2 Гц

Рисунок 2.11 – Вторая форма частот по оси OZ



F10<sub>№1</sub>=1688 Гц

F10<sub>№2</sub>=1763,1 Гц

Рисунок 2.12 – Третья форма частот по оси OZ

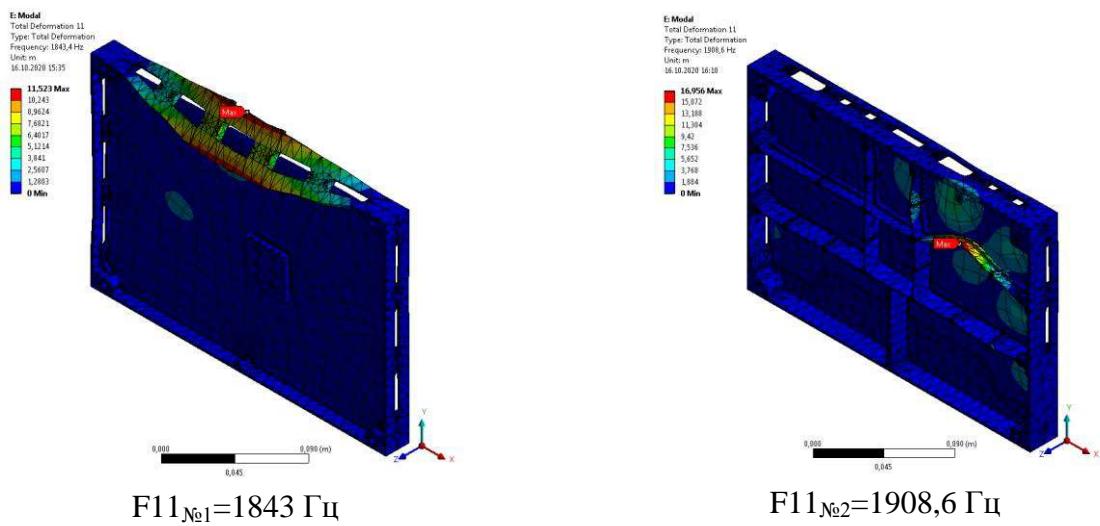


Рисунок 2.13 – Первая форма частот по оси OZ

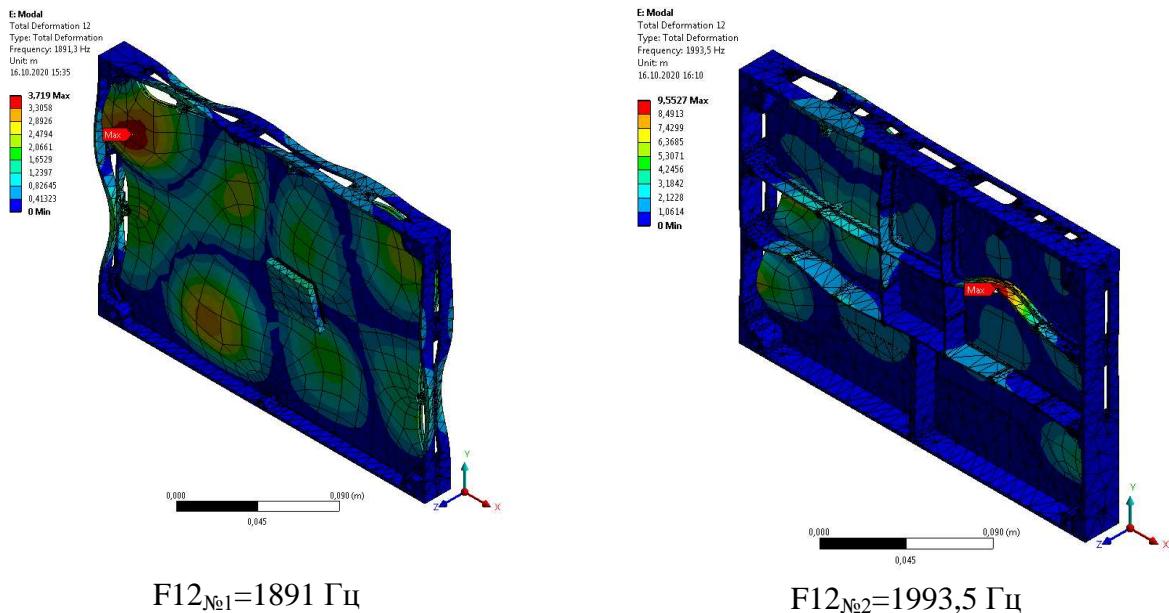


Рисунок 2.14 – Первая форма частот по оси OZ

Реакция конструкции на воздействие статических нагрузок определялись в пакете ANSYS. Требования по данному воздействию заданы в таблице 2.2

Максимальные перемещения (0,1 мм) по оси OZ представленные на рисунках 2.6-2.8.

Минимальный запас прочности ( $\eta_T=4$ ) имеет медь при воздействии нагрузки по оси OZ представленные на рисунках 2.15 – 2.17 и на таблице 2.3.

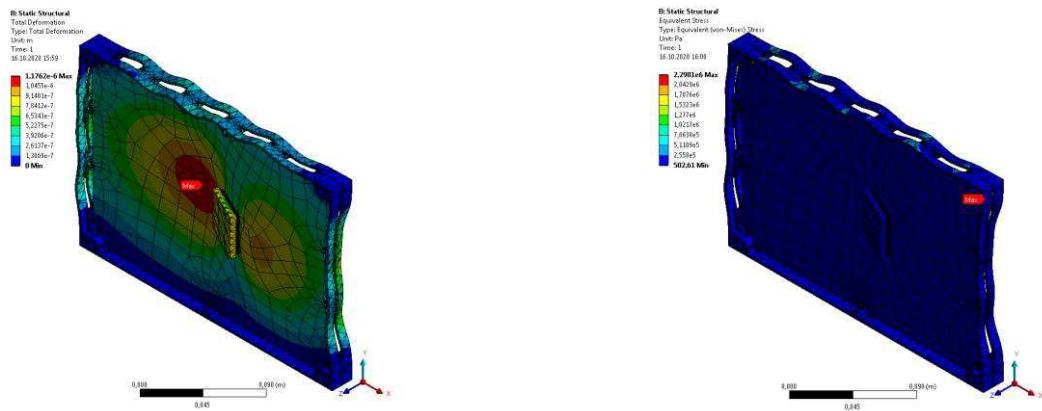


Рисунок 2.15 – Максимальные перемещения (слева) и максимальные напряжения (справа) при воздействии статической нагрузки на конструкцию №1 по оси ОХ

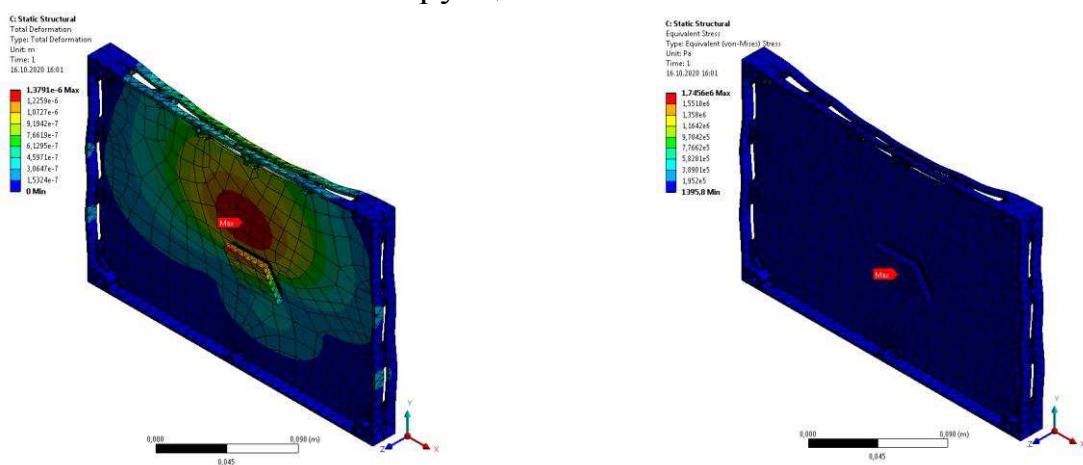


Рисунок 2.16 – Максимальные перемещения (слева) и максимальные напряжения (справа) при воздействии статической нагрузки на конструкцию №1 по оси ОY

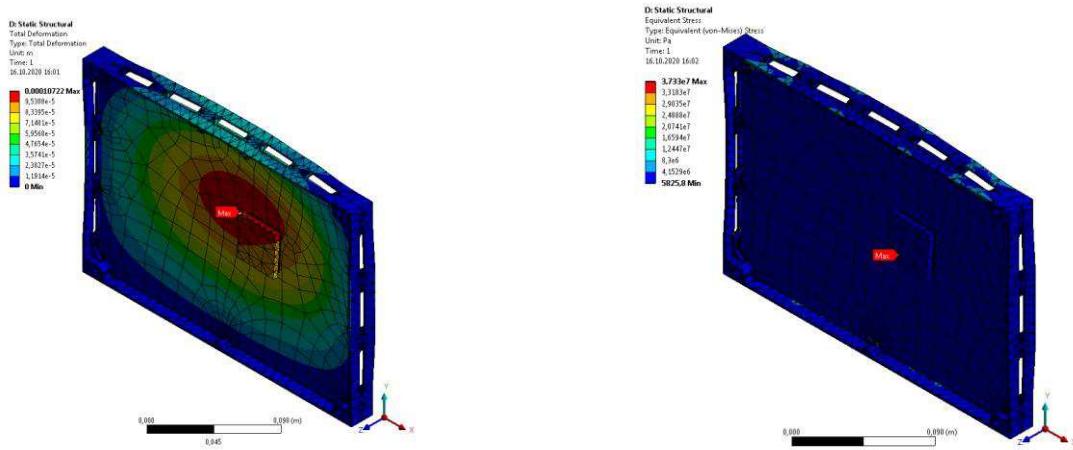


Рисунок 2.17 – Максимальные перемещения (слева) и максимальные напряжения (справа) при воздействии статической нагрузки на конструкцию №1 по оси ОZ

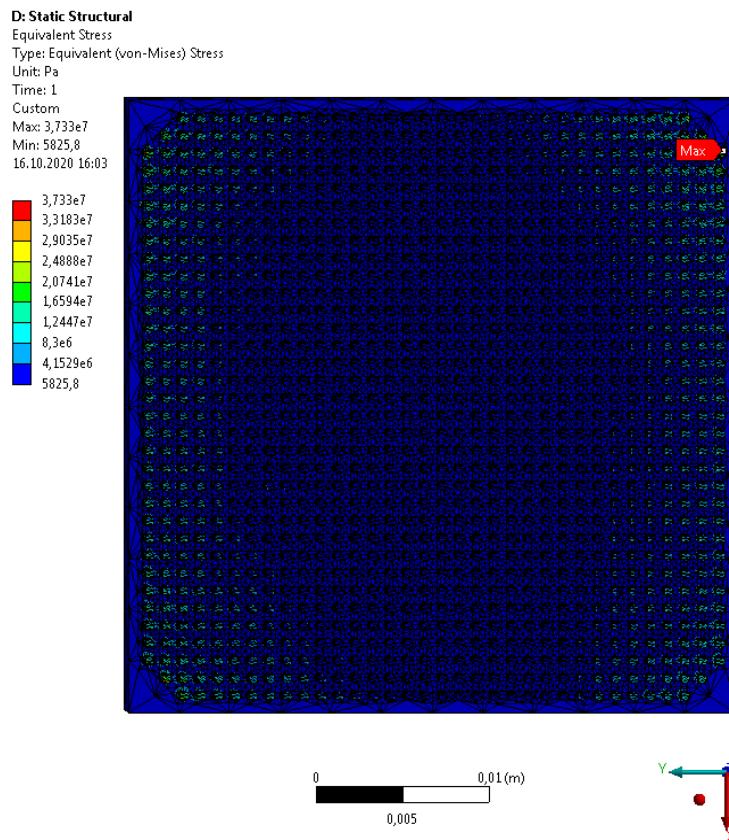


Рисунок 2.18 – Значения напряжений при статических на микросхему

Таблица 2.4 – Значения максимальных напряжений и соответствующие им запасы при статических нагрузках

Материал	Предел текучести ( $\sigma_T$ ) Предел прочности ( $\sigma_B$ ), МПа	Ось					
		OX		OY		OZ	
		Max. напряжение ( $\sigma_{MAX}$ ), МПа	Запас прочности ( $\eta$ )	Max. напряжение ( $\sigma_{MAX}$ ), МПа	Запас прочности ( $\eta$ )	Max. напряжение ( $\sigma_{MAX}$ ), МПа	Запас прочности ( $\eta$ )
Алюминий	155 ( $\sigma_T$ )	2,2		1,1		24,6	
Медь	280 ( $\sigma_T$ )	4,7		6,7		7,1	
Стеклотекс-толит	300 ( $\sigma_B$ )	0,5	>10	0,2	>10	6,1	>10
ПОС 61	26 ( $\sigma_T$ )	2,7		4,8		37,3	0,7
Керамика	280 ( $\sigma_B$ )	0,8		1,2		7,3	>10

Реакция конструкции на воздействие статических нагрузок определялись в пакете ANSYS. Требования по данному воздействию заданы в таблице 2.2.

Максимальные перемещения (0,01 мм) по оси OZ представленные на рисунках 2.15-2.17.

Минимальный запас прочности ( $\eta_T=4$ ) имеет медь при воздействии нагрузки по оси OZ представленные на рисунках 2.19-2.21 и на таблице 2.4.

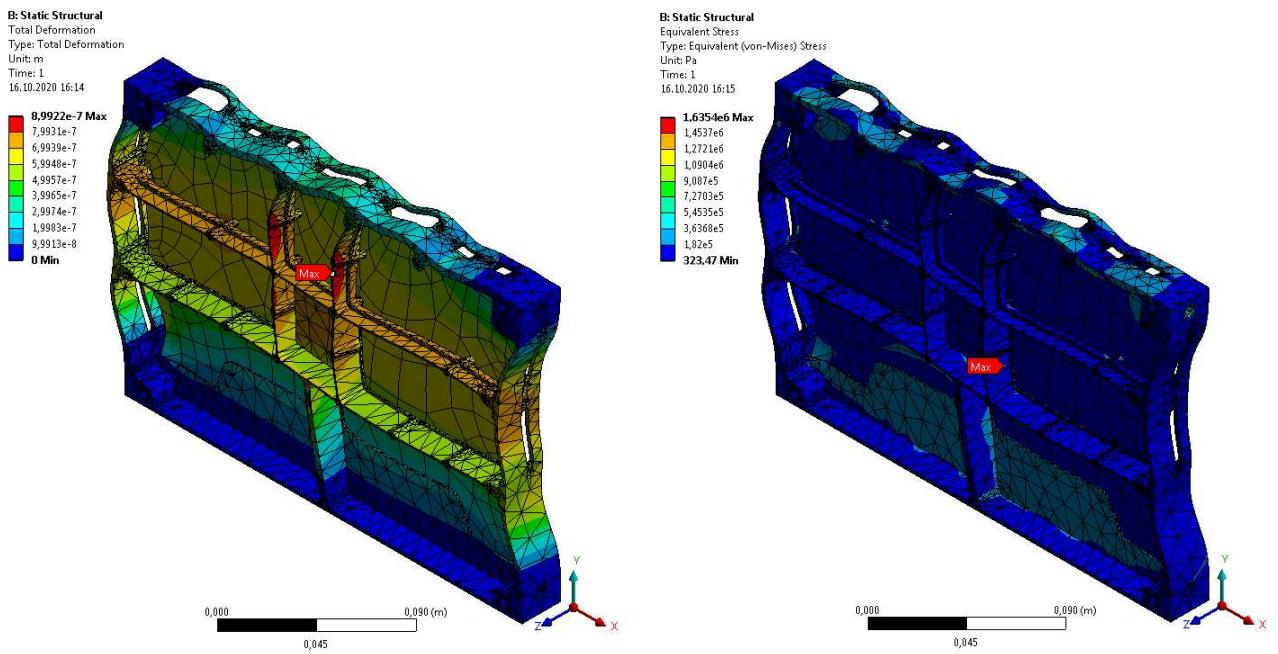


Рисунок 2.19 – Максимальные перемещения (слева) и максимальные напряжения (справа) при воздействии статической нагрузки на конструкцию №2 по оси ОХ

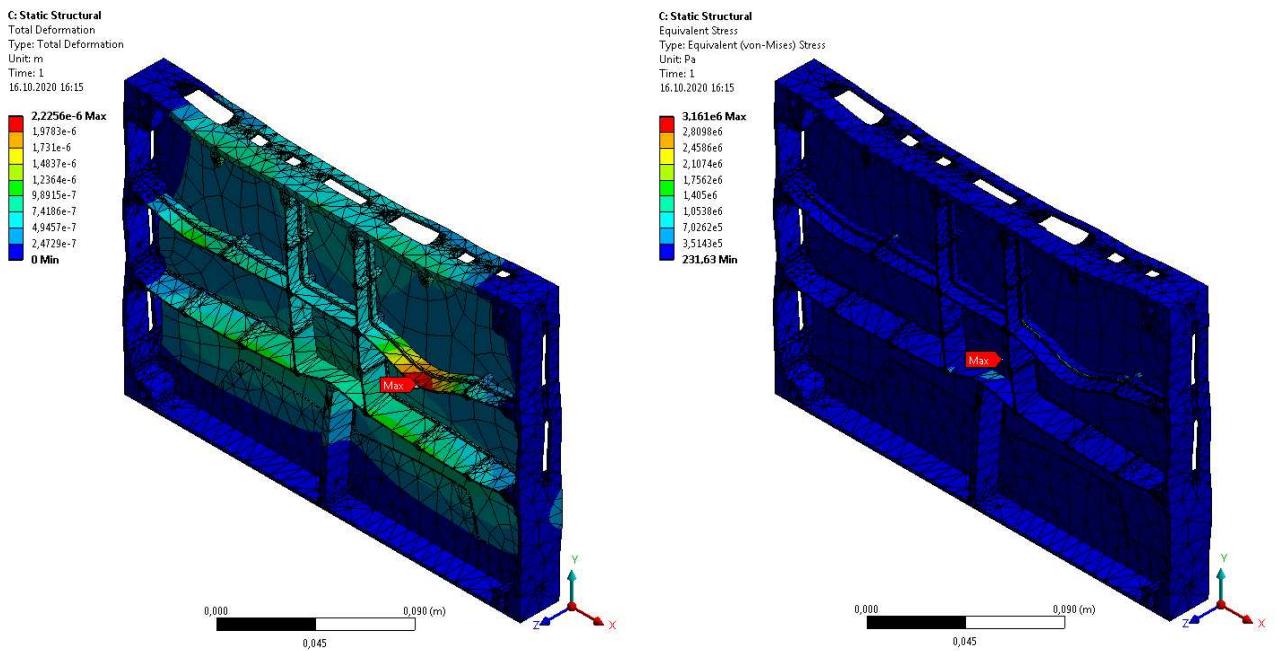


Рисунок 2.20 – Максимальные перемещения (слева) и максимальные напряжения (справа) при воздействии статической нагрузки на конструкцию №2 по оси ОY

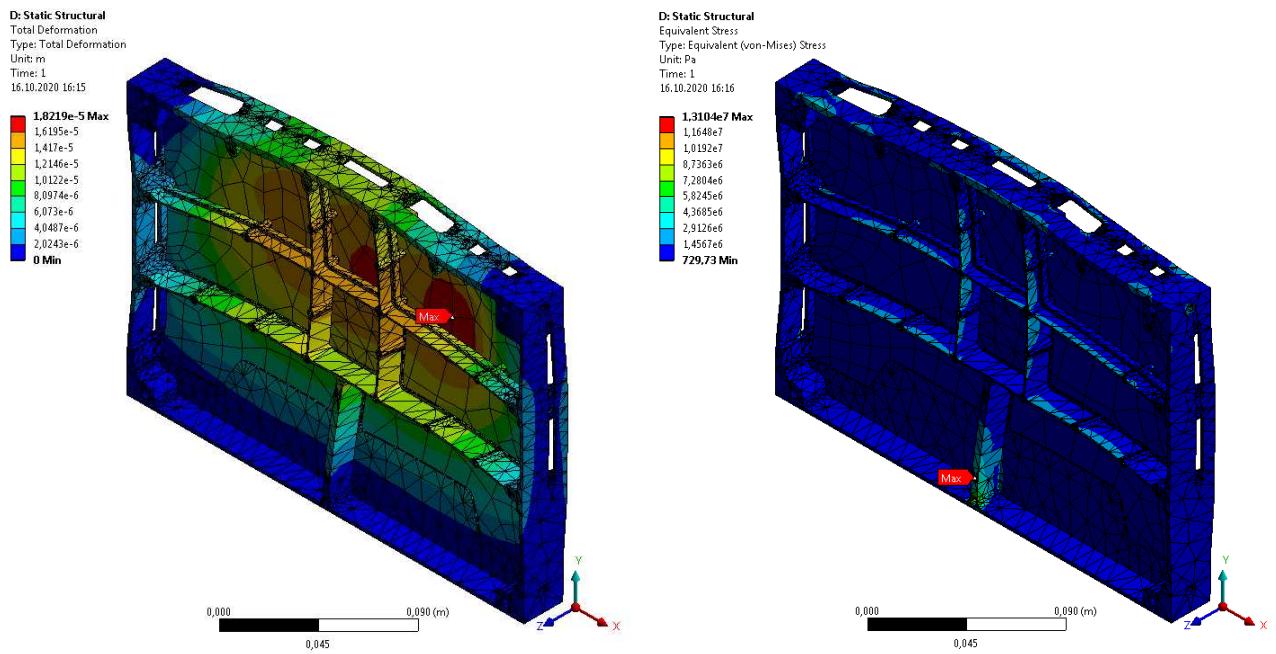


Рисунок 2.21 – Максимальные перемещения (слева) и максимальные напряжения (справа) при воздействии статической нагрузки на конструкцию №2 по оси OZ

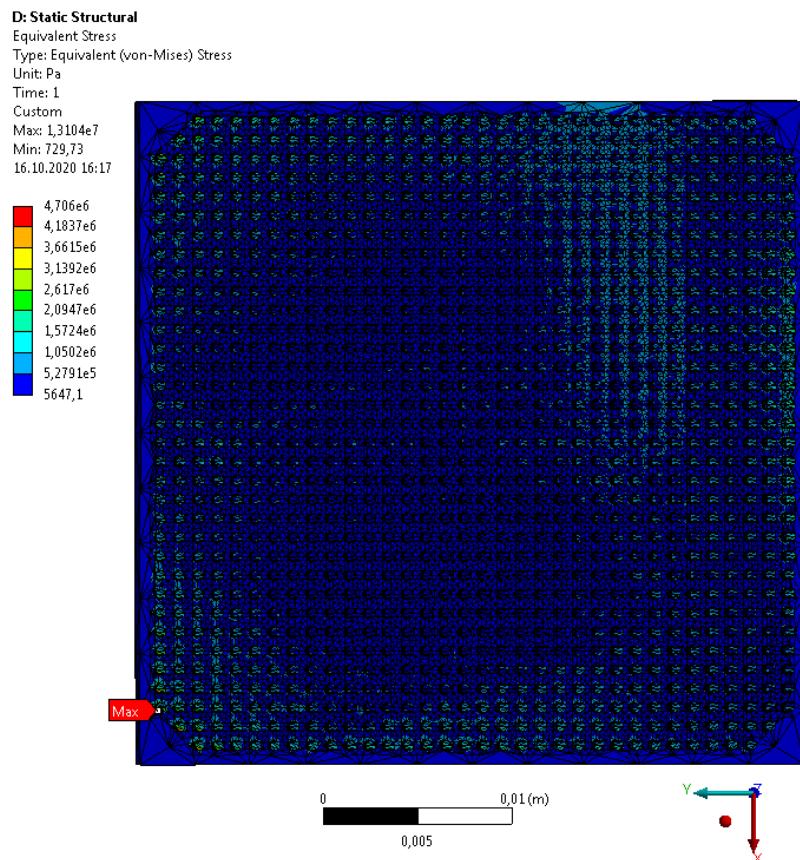


Рисунок 2.21 – Значения напряжений при статических на микросхему

Таблица 2.5 – Значения максимальных напряжений и соответствующие им запасы при статических нагрузках

Материал	Предел текучести ( $\sigma_T$ ) Предел прочности ( $\sigma_B$ ), МПа	Ось					
		OX		OY		OZ	
		Max. напряжение ( $\sigma_{MAX}$ ), МПа	Запас прочности ( $\eta$ )	Max. напряжение ( $\sigma_{MAX}$ ), МПа	Запас прочности ( $\eta$ )	Max. напряжение ( $\sigma_{MAX}$ ), МПа	Запас прочности ( $\eta$ )
Алюминий	155 ( $\sigma_T$ )	0,9	>10	0,8	>10	13,1	>10
Медь	280 ( $\sigma_T$ )	1,8		2,5		5,4	
Стеклотекс-толит	300 ( $\sigma_B$ )	0,6		0,3		1,3	
ПОС 61	26 ( $\sigma_T$ )	1,6		3,1		4,7	
Керамика	280 ( $\sigma_B$ )	0,4		0,8		1,6	

### 3 Испытания силовой конструкции

При работе приборов в составе различных машин и оборудования (например, космических аппаратов) платы с электрорадиоэлементами подвергаются различного вида внешним воздействующим факторам: механическим, климатическим, ионизационному излучению и т.д. К механическим воздействиям относят: статические, вибрационные, линейные, ударные нагрузки и акустический шум. Изделия, предназначенные для функционирования в условиях воздействия механических нагрузок, должны быть прочными и устойчивыми при воздействии этих факторов. Эта способность проверяется в процессе проведения испытаний на механические воздействия. Испытания ЭП на все виды воздействий требуют длительного времени, наличие разнообразного дорогостоящего оборудования и, кроме того, ЭП будут повторно проходить этот объем испытаний уже в составе аппаратуры. Поэтому необходим метод, который не требует сложного оборудования и способный проверить надежность работы разрабатываемой ЭП при эксплуатационных нагрузках.

В разрабатываемом методе сначала создают подробную конечно-элементную модель ЭП, и проводят анализ прибора на все виды механических нагрузок. Например, для аппаратуры применяемой на космических аппаратах, - это квазистатические (линейные), вибрационные (гармоническая и случайная вибрация) и ударные воздействия. По результатам такого моделирования получают поле перемещений, возникающих в ЭП при эксплуатации в составе прибора. Затем строят огибающую максимальных значений перемещений. Реализация этого поля перемещений с соблюдением соответствующих граничных условий закрепления платы в приборе обеспечит при отработочных испытаниях (испытания проводят на расчетные нагрузки, включающие коэффициенты безопасности) создание напряжений, которые не будут превышены при эксплуатации. Расчетным путем далее выбирают точки приложения нагрузки точку с максимальным перемещением.

На рисунке 3.1 представлена схема расчета метода нахождения нагрузки. Величина нагрузки в каждой из выбранных точек определяют по формуле:

$$\delta_j(x_i, y_i) = \frac{G \cdot P_i(x_j, y_j)}{D}, \quad (3.1)$$

где  $\delta_j(x_i, y_i)$  – перемещение в  $j$ -точке под влиянием нагрузки приложенной в  $i$  точке;

$P_i(x_j, y_j)$  – нагрузка приложенная в точке  $i$ ;

$G$  – коэффициент пропорциональности связывающий перемещение с усилием и цилиндрической жесткостью платы;

$D = E \cdot h^3 / 12(1-v^2)$  – цилиндрическая жесткость платы ( $E$  – модуль упругости материала печатной платы,  $h$  – толщина печатной платы,  $v$  – коэффициент Пуассона материала печатной платы).

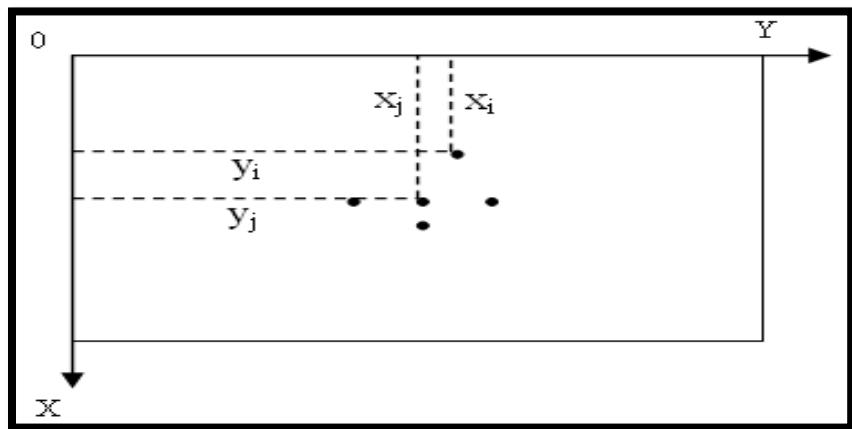


Рисунок 3.1 – Схема расчета метода нахождения нагрузки

Затем переходят к проведению испытаний, при этом в оснастке для установки ЭП обеспечивают граничные условия, аналогичные условиям закрепления ЭП в составе прибора. Это обеспечивает нагружение ЭП в зоне закрепления, как при работе в составе прибора. Причем нагружение выбранных точек проводят последовательно, контролируя перемещения в остальных точках, и при необходимости увеличивают перемещение в последующих точках, обеспечивая создание поля перемещений с реальными возможностями оборудования без опасения не нужного перегружения ЭП, при этом напряжения, возникающие в плате, не превышают допустимых значений для материала электронной платы и комплектующих элементов. Присозданном таким образом напряженном состоянии ЭП проверяют целостность электрических цепей проходящих через наиболее напряженные контакты.

Таким образом, метод применяют при использовании стендов с механическим приводом или других стендов, последние - при специальном техническом обосновании:

- вибрационная установка должна обеспечивать получение в контрольной точке синусоидальной вибрации с требуемыми параметрами. Контрольную точку выбирают в соответствии с требованиями ГОСТ 30630.0.0.

- испытание проводят с учетом общих требований, установленных для метода.

- испытание проводят под механической и (или) электрической нагрузкой.

Диапазон частот, соответствующий предъявленным к изделию требованиям, разбивают на поддиапазоны с граничными частотами, значения которых выбирают из ряда: 1; 2; 3; 4; 5; 6; 7; 8; 9; 10; 12,5; 16; 20; 25; 31,5; 40; 50; 63; 80; 100; 125; 160; 200; 250; 315; 400; 500; 630; 800; 1000;

1250; 1600; 2000 Гц. Если верхняя граничная частота диапазона не совпадает с одной из вышеуказанных граничных частот, то ее значение округляют до значения ближайшей большей граничной частоты.

При частотах, значение которых составляет более 10 Гц, испытание проводят путем плавного изменения частоты при поддержании в каждом поддиапазоне постоянной амплитуды перемещения, мм, определяемой по формуле:

$$A = \frac{25j}{f^2} \quad (3.2)$$

где  $j$ - средняя частота поддиапазона, Гц;

$f$  - амплитуда ускорения, соответствующая частоте, Ам·с<sup>2</sup>.

Значение скорости изменения частоты устанавливают равным одной-двум октавам в минуту; допускается в диапазоне частот 1-50 Гц устанавливать значение этой скорости 10 Гц/мин. Если время, затрачиваемое на контроль параметров изделий больше, чем то, которое требуется при данной скорости изменения частоты, допускается снижать значение скорости менее одной октавы в минуту или 10 Гц/мин, при этом скорость изменения частоты должна быть максимальной, но достаточной для обеспечения контроля необходимых параметров.

В каждом диапазоне частоту изменяют от низшей к верхней и обратно, а для изделий с линейными резонансными характеристиками - только в одном направлении.

Если низшая резонансная частота изделия и верхняя частота диапазона испытаний превышают 200 Гц, то испытания проводят начиная со 100 Гц.

При значениях частоты 10 Гц и менее испытание проводят на граничных частотах при продолжительности выдержки на каждой частоте, необходимой для проверки и регистрации контрольных параметров (10-30 с).

Точность поддержания параметров испытательного режима - в соответствии с требованиями, установленными для метода.

В процессе испытания контролируют параметры изделий. Проверяемые параметры, их значения и методы проверки указывают в стандартах и ТУ на изделия и ПИ.

При испытаниях для регистрации проверяемых параметров рекомендуется осуществлять запись их абсолютного значения или изменения по сравнению с первоначальными значениями в функции от частоты вибрации с помощью регистрирующих устройств.

При обнаружении частот, на которых наблюдается нестабильность работы или ухудшение параметров изделий, дополнительно проводят выдержку на этих частотах в течение времени, указанного в стандартах и

ТУ на изделия и ПИ, но не менее 5 мин; эту выдержку не проводят, если изделия испытывают на вибропрочность методом качающейся частоты.

Изделия считают выдержавшими испытание, если в процессе испытаний они удовлетворяют требованиям, установленным в стандартах и ТУ на изделия и ПИ для испытаний данного вида.

### **3.1 Цели и задачи испытаний**

#### Цели и задачи КДИ:

- проверка соответствия параметров прибора требованиям ТЗ;
- проверка соответствия технических и эксплуатационных характеристик материалов и ЭРИ требованиям ТЗ;
- проверка электрических режимов;
- проверка стойкости к механическим воздействиям;
- проверка соответствия требованиям по помехоустойчивости и помехоэмиссии;
- проверка уровня помех по внутренним интерфейсам;
- определение запасов работоспособности по климатическим воздействиям, изменению питающих напряжений, помехоустойчивости;
- отработка КД, ЭД;
- отработка КПА;
- комплексная отработка программного обеспечения;
- отработка технологической документации;
- определение готовности к ПиР в частности оснащения рабочих мест;
- определение возможности предъявления прибора на ПиР и допуск к испытаниям в составе отработанных изделий.

#### Цели и задачи ПиР:

- подтверждение соответствия параметров прибора требованиям ТЗ;
- подтверждение стойкости к механическим воздействиям;
- подтверждение соответствия требованиям по помехоустойчивости и помехоэмиссии;
- оценка уровня помех по внутренним интерфейсам;
- подтверждение работоспособности прибора в условиях, близких к реальным эксплуатационным;
- оценка электрических режимов ЭРИ;
- оценка отработанности технологии изготовления и испытаний прибора;
- оценка качества КД, ТД и ЭД;
- оценка пригодности КПА;
- оценка качества программного обеспечения;
- оценка возможности подтверждения требований ТЗ средствами контроля;

- оценка соответствия ЭРИ и материалов ограниченными перечням, их технических и эксплуатационных характеристик и условий применения требованиям ТЗ;
- оценка полноты и правильности изложения в КД вопросов метрологического обеспечения;
- определение возможности допуска прибора к испытаниям в составе КА.

### **3.2 Объем и условия проведения испытаний**

Перечень испытательного оборудования и средств измерений, необходимых для проведения испытаний, приведен в таблице 1 настоящей программы

Средства измерений должны быть измерений и проверены, испытательное оборудование – исправно и аттестовано.

*Примечание – Допускается использовать средства измерения и оборудование с аналогичными техническими характеристиками.*

Все испытания проводить в нормальных климатических условиях, если иные не оговорены в методике испытаний.

Таблица 3.1 – Испытательное оборудование и средства измерений

Наименование	Обозначение	Кол.	Техническая характеристика	Допустимая замена
Штангенциркуль	MITUTOYO-300-0,02	1	0-300 мм, ±0,02мм	—
Штангенциркуль	ШЩ-111-500-0,05	1	0-500 мм, ±0,05мм	—
Штангенрессанс	ШР-630-0,05	1	60-630 мм, ±0,05мм	—
Щупы 70	Щупы-70 ТУ 2-034-225	1	Набор №2, кл.т.1	—
Плита поверочная	ПЛИТА 1-1-1000x630 ГОСТ 10905	1	Допуск плоскостности 0,02 мм	—
Вибrostенд	V8-440	1	5-2500Гц, 1-140g, ±20%	ВЭДС-10000T
Специализированное рабочее место динамических испытаний РЭА		1	—	—
Комплект оборудования для ударных испытаний		1	—	—
Ударный стенд	УУЭ 20/200	1	20кг, 2000м/с <sup>2</sup> (200g), ±20%	—
Вибропреобразователь	4501A	1	1-25000Гц	—

### **3.3 Методики проведения испытаний и контроля**

Проверка габаритных, установочных и присоединительных размеров прибора на соответствие габаритному чертежу.

Проверку габаритных, установочных и присоединительных размеров на соответствие габаритному чертежу выполнять универсальными средствами измерений, указанными в таблице 3.1.

Габаритные размеры прибора 368x492x182 мм,

Размеры указаны на рисунке 3.2.

Установочные размеры  $L_1=(348\pm 1)$  мм,  $L_2=(141\pm 0,2)$  мм,  $L_3=(282\pm 0,2)$  мм,  $L_4=(423\pm 0,2)$  мм.

Допуск плоскостности установочной поверхности 0,3 мм.

Размер  $L_1$  определить расчетным путем по формуле:

$$L_1 = 368 - (2L_6 + L_5) \quad (3.3)$$

Размеры  $L_5$ ,  $L_6$  измерить штангенциркулем МИТUTOYO-300-0,02.

При определении размеров 182 мм и 0,3 мм прибор установить на поверочную плиту.

Размер 182мм измерить штангенрейсмасом ШР-630-0,05. Отклонение от плоскостности измерить щупами.

Размеры 492 мм, 368 мм измерить штангенциркулем ШЦ -111-500-0,05.

Проверку установочных размеров  $L_2=(141\pm 0,2)$  мм,  $L_3=(282\pm 0,2)$  мм,  $L_4=(423\pm 0,2)$  мм не выполнять. Размеры обеспечиваются при изготовлении деталей.

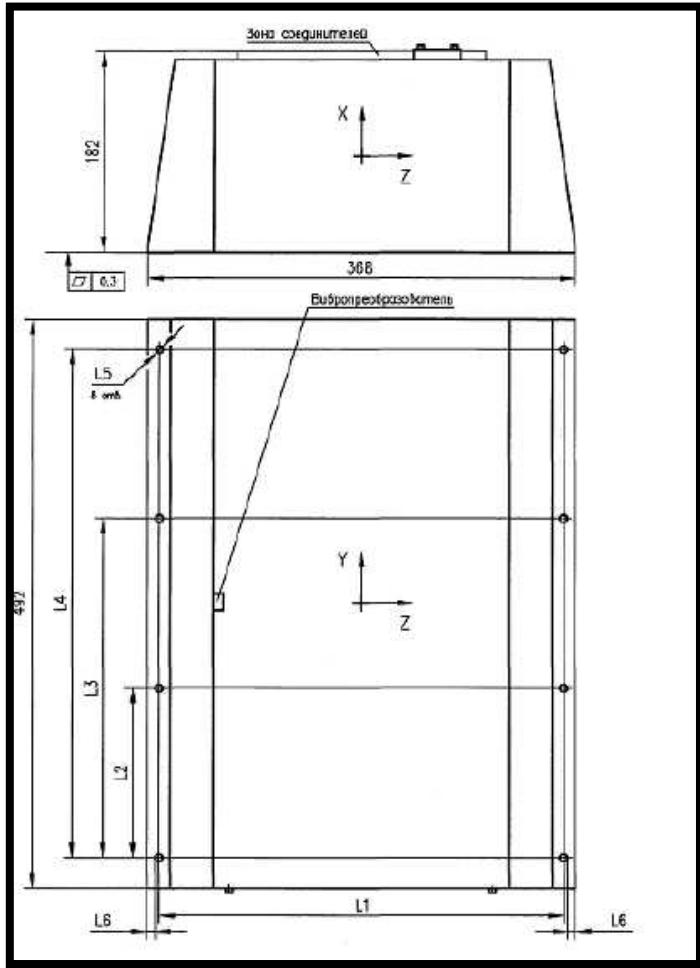


Рисунок 3.2– Блок интерфейсный комплекса управления

Диапазон частот для испытания на синусоидальные вибрации определяется согласно таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Синусоидальная вибрация

Диапазон частот, Гц	Уровень	Время воздействия по оси, мин.
5-10	$\pm 10\text{мм}$	20, не менее
10-20	от $\pm 4g$ до $\pm 15g$	
20-100	$\pm 15g$	

Примечание – Скорость сканирования в направлении от нижней границы частоты к верхней границы частоты к верхней составляет не более 1 окт/мин. Изменение ускорения от частоты в каждом поддиапазоне частот по линейному закону.



Рисунок 3.3 – готовая конструкция

По данной методики была испытана готовая конструкция модуля бортовой аппаратуры, представленный на рисунке 3.3.

В ходе испытания мы получили график влияния частоты на конструкцию, представленный на рисунке 3.4. Который совпадает с результатами моледирования в системе ANSYS.

Проведенный конечно-элементный анализ доказывает, что с использованием разработанной силовой конструкции модуля бортовой аппаратуры, можно применять многовыводные электронные компоненты без нарушения целостности контактных соединений, потому что учитываются условия эксплуатации и реальное нагружение ЭП в составе прибора.

14Ф151.1516ГМ-0 Е001 КДИ ГВ НУ2 5-2000 Гц LMS 5-2000 Hz YY 0 5.3.19 14:22:09  
14Ф151.1516ГМ-0 Е001 КДИ ГВ НУ1 5-2000 Гц LMS 5-2000 Hz YY 0 5.3.19 14:07:03

B19Y - На основании блока 14Ф151.1516ГМ-9000 бортового комплекса  
управления 14Ф151.1516ГМ-0

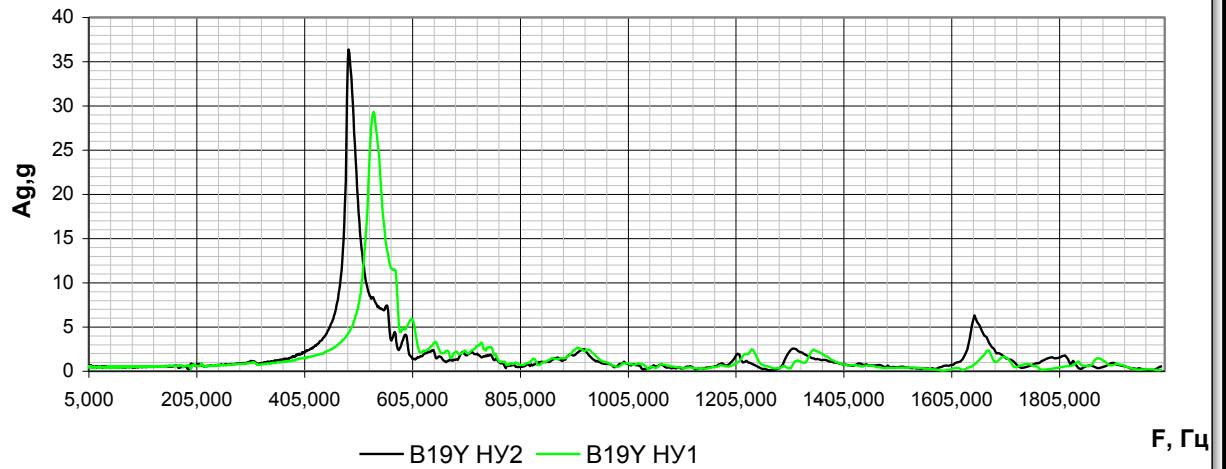


Рисунок 3.4 – влияние частоты на конструкцию

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В магистерской диссертационной работе были рассмотрены вариации контактных соединений для поверхностного монтажа современных корпусов микрочипов и сделан их анализ, что позволит разработать силовую конструкцию для применения многовыводных контактов.

Был сделан краткий обзор конструкций бортовой аппаратуры КА, а именно их компоновку, для разработки силовой конструкции, а также был рассмотрен стандарт евромеханики.

При рассмотрении внешних и внутренний дестабилизирующие факторов, влияющих на весь модуль бортовой аппаратуры, были выделены наиболее разрушающие факторы влияния на конструкцию и многовыводные контакты.

Полученные результаты моделирования показали, что существующая конструкция модулей создает риски при использовании многовыводных ЭРИ, что не позволяет применять современные многовыводные компоненты из-за разрушения контактов микросхем.

Моделирование позволило определить максимально допустимое напряженно-деформационное состояние на ЭП старой конструкции и разработанной.

Разработана конструкция (модуль бортовой аппаратуры), с применением ребер жесткости. В результате трехмерного моделирования деформации были получены оценки прочности конструкции при рабочих нагрузках.

Проведенные испытания позволили получить график влияния частоты на конструкцию, который показывает уменьшение деформации на ЭП, что позволяет использовать ЭП с многовыводными электронными компонентами.

В ходе магистерской диссертации мы получили положительные результаты анализа и исследования смоделированных процессов нагрузок на конструкцию и подтвердили эффективность данной конструкции.

## **СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ**

БНК – базовая несущая конструкция;  
ЕСКД – единая система конструкторской документации;  
ИМС – интегральная микросхема;  
КА – космический аппарат;  
КД – конструкторская документация;  
КЭМ – конечно-элементарная модель;  
МВ – механические воздействия;  
НДС – напряженно-деформированное состояние;  
ПЗУ – постоянное запоминающее устройство;  
ПП – печатная плата;  
РДП – рельефная двухслойная плата;  
РП – рельефная плата;  
РЭА – радиоэлектронная аппаратура;  
РЭС – радиоэлектронное средство;  
РЭУ – радиоэлектронное устройство;  
РЭФУ – радиоэлектронный функциональный узел;  
САПР – система автоматизированного проектирования;  
ТЗ – техническое задание;  
ТКС – температурный коэффициент сопротивления;  
ТТ – технические требования;  
ТУ – техническое условие;  
ЦМ – центр масс;  
ЦТ – центр тяжести;  
ЭА – электронная аппаратура;  
ЭМ – электронный модуль;  
ЭРИ – электрорадио изделие  
ЭРЭ – электрорадио элемент.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Кротова, Елена Ивановна Основы конструирования и технологии производства РЭС : учебное пособие / Е. И. Кротова ; Яросл. гос. ун-т им. П. Г. Демидова. – Ярославль : ЯрГУ, 2013. – 192 с.
- 2 Яроцкий, В. Г. Основы проектирования радиоэлектронных средств: учеб. пособие. – Рыбинск: РГАТА, 2000. – 175 с.
- 3 Ушаков, Н. Н. Технология производства ЭВМ: учебник для вузов / Н. Н. Ушаков. – Москва: Высш. шк., 1991. – 416 с.
- 4 Государственные стандарты СССР, РФ. Открытая база ГОСТов. – URL:[hp://www.Sandar GOST.ru](http://www.Sandar GOST.ru)
- 5 Конструирование РЭС: учеб. пособие по курсовому и дипломному проектированию / авт.-сост. В. Ф. Борисов и др. – Москва: МАИ, 1991. – 96 с.
- 6 Справочник конструктора РЭА: Компоненты, механизмы, надежность / под ред. Р. Г. Варламова. – Москва: Радио и связь, 1985. – 384 с.
- 7 Каленкович, Н. И. Радиоэлектронная аппаратура и основы её конструкторского проектирования : учебно-методическое пособие для студентов спец. «Моделирование и компьютерное проектирование» и «Проектирование и производство РЭС» / Н.И. Каленкович [и др.]. – Минск : БГУИР, 2008 – 200 с.
- 8 Азин, А. В. Экспериментально-теоретическое исследование напряженно-деформируемого состояния и оценка долговечности BGA и CGA контактов электронных модулей : известия вузов. / А. В. Азин – Томск : 2011. –146-153 с.
- 9 Азин, А. В. Исследование напряженно-деформированного состояния и долговечности контактных соединений электронных модулей космических аппаратов : автореферат. / А. В. Азин – Томск : 2013. – 26 с.
- 10 Карманова, А. В. Разработка силовой конструкции модуля бортовой аппаратуры для применения многовыводных компонентов : международная научно-практическая конференция «Решетневские чтения» / А. В. Карманова – Красноярск: СФУ, 2020 – Т. 1 – С. 90-91.
- 11 Туманов, А. В. Основы компоновки бортового оборудования космических аппаратов : учеб. пособие / А. В. Туманов В. В. – Москва : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. – 344 с.
- 12 Бабаков, И. М.. Теория колебаний : учеб. Пособие / Бабаков И. М. – Москва : 1958. – 658 с.
- 13 Бидерман, В. Л. Теория механических колебаний : учебник для вузов / И. М. Бидерман – Москва.: Высш. шк., 1980. – 408 с.
- 14 Чеботарев, В.Е. Основы проектирования космических аппаратов информационного обеспечения : учеб. пособие / В. Е. Чеботарев, В.Е. Косенко – Красноярск : Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т., 2011. – 488 с.

Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение  
высшего образования  
**«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Политехнический институт  
институт  
Межинститутская базовая кафедра  
«Прикладная физика и космические технологии»  
кафедра

УТВЕРЖДАЮ  
Заведующий кафедрой  
В.Е. Косенко  
подпись инициалы, фамилия  
« 25 » 06 2021г.

## МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

«Работка силовой конструкции модуля бортовой аппаратуры для применения  
многовыводных электронных компонентов»

тема

15.04.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение  
машиностроительных производств»  
код и наименование направления

15.04.05.02 «Технология космических аппаратов»  
код и наименование магистерской программы

Научный  
руководитель

RL  
подпись, дата

доцент МБК ПФиКТ  
канд.физ-мат.наук  
должность, ученая степень

А.А.Хвалько  
инициалы, фамилия

Выпускник

25.06.2021  
подпись, дата

инженер-конструктор  
1 кат. АО «ИСС»  
имени академика  
М.Ф. Решетнева»  
должность, ученая степень

А.В.Карманова  
инициалы, фамилия

Референт

С.С.Р  
подпись, дата

профессор  
МБК ПФиКТ, доцент  
должность, ученая степень

А.В.Селоустьев  
инициалы, фамилия

Термо контролер

В.Е.Ч  
подпись, дата

профессор  
МБК ПФиКТ, доцент  
должность, ученая степень

В.Е. Чеботарев  
инициалы, фамилия

Красноярск 2021