

Министерство науки и высшего образования РФ
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

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

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой
_____ А.В. Кузовников
подпись инициалы, фамилия
« ____ » _____ 2024 г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

«Разработка оснастки для механических испытаний автономного источника
питания на основе энергоёмких радиоизотопов»
тема

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

15.04.05.02 «Технологии производства космических аппаратов»
код и наименование магистерской программы

Руководитель	_____	доцент МБК ПФиКТ канд. физ-мат. наук подпись, дата должность, ученая степень	<u>А.А. Хвалько</u> инициалы, фамилия
Выпускник	_____	ведущий инженер- конструктор отдела 817 подпись, дата	<u>А.В. Поляковская</u> инициалы, фамилия
Рецензент	_____	АО «РЕШЕТНЁВ» подпись, дата должность, ученая степень	<u>С.В. Агашкин</u> инициалы, фамилия
Нормоконтролер	_____	профессор, МБК ПФиКТ д-р техн. наук, доцент подпись, дата должность, ученая степень	<u>В.Е. Чеботарев</u> инициалы, фамилия

Красноярск 2024

Министерство науки и высшего образования РФ
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Политехнический

институт

Межинститутская базовая кафедра

«Прикладная физика и космические технологии»

кафедра

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

_____ А.В. Кузовников

подпись

инициалы, фамилия

« ____ » _____ 2024 г.

ЗАДАНИЕ
НА ВЫПУСКНУЮ КВАЛИФИКАЦИОННУЮ РАБОТУ
в форме магистерской диссертации

Красноярск 2024

Студенту Поляковской Алене Владиславовне

фамилия, имя, отчество

Группа МТ22-04

номер

Направление (специальность)

15.04.05.02

код

«Технологии производства космических аппаратов»

наименование

Тема выпускной квалификационной работы: «Разработка оснастки для механических испытаний автономного источника питания на основе энергоемких радиоизотопов»

Утверждена приказом по университету № 18281 от 08.11.2022

Руководитель ВКР: А.А. Хвалько, канд. физ-мат. наук, доцент МБК

«Прикладная физика и космические технологии»

инициалы, фамилия, должность, ученое звание и место работы

Исходные данные для ВКР: в процессе выполнения выпускной квалификационной работы необходимо произвести сбор и систематизацию информации об объекте исследования, оценить и сравнить значимость полученных результатов, разработать новый вариант конструкции технологической оснастки для испытаний.

Перечень разделов ВКР: введение; анализ автономных источников питания и технологических оснасток; анализ объекта исследования и разработка технологической оснастки; механические испытания; заключение.

Перечень графического материала: слайды презентация Power Point в количестве 15 шт.

Руководитель ВКР

подпись

А.А. Хвалько

инициалы и фамилия

Задание принял к исполнению

подпись

А.В. Поляковская

инициалы и фамилия студента

«25» апреля 2024 г.

РЕФЕРАТ

Магистерская диссертация по теме «Разработка оснастки для механических испытаний автономного источника питания на основе энергоёмких радиоизотопов» содержит 76 страницы текстового документа, 18 использованных источников, 42 рисунков, 22 таблицы.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ОСНАСТКА, АВТОНОМНЫЙ ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ, РАДИОИЗОТОП, КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНАЯ МОДЕЛЬ, ИСПЫТАНИЯ.

Объектом исследования является автономный источник питания (АИП) на основе энергоёмких радиоизотопов, который предназначен для питания энергозависимой микросхемы в бортовой аппаратуре космического аппарата (КА).

Предмет исследования – технологическая оснастка для механических испытаний АИП.

Цель данной работы состоит в разработке нового типа технологической оснастки, обеспечивающей надёжную фиксацию объекта исследования (АИП).

Для достижения поставленных целей основными задачами являются:

- сбор и систематизация информации об объекте исследования, оценка и сравнение значимости полученных результатов;
- разработка нового варианта конструкции технологической оснастки для испытаний.

Актуальность диссертационной работы показывает значимость АИП в КА. Важность ее заключается в том, что в случае аварийной работы основного источника питания, аппаратура КА не останется без энергии и будет работать в штатном режиме до устранения неисправности или принятий каких-либо мер. Не мало важным являются испытания, но так как реальные испытания материально и энерго-затратные, то на этапе моделирования необходимо выявить по максимуму все ошибки и недоработки.

Научная новизна диссертационной работы – разработана новая технология изготовления технологической оснастки.

Практическая значимость – внедрение новой технологий, изготовление нового изделия для проведения механических испытаний.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	8
1 Анализ автономных источников питания и технологических оснасток.....	11
1.1 Конструкции атомных батарей и их принцип работы.....	11
1.2 Технология изготовления автономного источника питания.....	16
1.3 Конструкционные и вспомогательные материалы.....	18
1.4 Обзор существующих разработок.....	19
1.4.1 Разработка компании City Labs	19
1.4.2 Разработка компании Beta Batt	21
1.4.3 Разработка компании Widetronix.....	22
1.4.4 Разработка кафедры	23
1.5 Обзор технологических оснасток для испытаний.....	24
1.6 Варианты исполнения технологических оснасток.....	27
1.6.1 Требования, предъявляемые к разработке технологической оснастки	29
1.6.2 Технологии производства технологических оснасток	30
2 Анализ объекта исследования и разработка технологической оснастки.....	32
2.1 Описание объекта исследования, общий вид, размеры и масса	32
2.2 Анализ и разработка конструкции технологической оснастки	35
2.2.1 Выбор материала и заготовки	37
2.2.2 CAD модель	38
2.3 Анализ конструкции, нагрузок и расчеты.....	41
2.4 Расчет объекта исследования с технологической оснасткой.....	43
2.4.1 Расчет на воздействие квазистатической нагрузки	47
2.4.2 Расчет на воздействие синусоидальной нагрузки	49
2.4.3 Расчет на воздействие широкополосной случайной вибрации.....	51
2.4.4 Расчет на воздействие ударных нагрузок.....	53
2.4.5 Анализ результатов расчетов.....	55

3 Механические испытания.....	57
3.1 Виды испытаний	57
3.2 Испытательное оборудование	58
3.3 Методика проведения испытания технологической оснастки.....	60
3.3.1 Испытания на воздействия вибрационных нагрузок	61
3.3.2 Испытания на прочность при транспортировании в составе изделия и упаковки.....	63
3.4 Методика проведения испытаний автономных источников питания совместно с технологической оснасткой	64
3.4.1 Испытания на воздействия вибрационных нагрузок	64
3.4.2 Испытания на прочность при транспортировании в составе изделия и упаковки.....	69
3.4.3 Испытания на воздействие ударных нагрузок	70
3.5 Результаты проведения механических испытаний	71
Заключение	74
Список сокращений	75
Список использованных источников	76

ВВЕДЕНИЕ

Внедрение инновационных решений в различных отраслях экономики и промышленности требует новых безопасных источников энергии, которые могут удовлетворить производственные и бытовые нужды там, где применение традиционных технологий нерентабельно или невозможно. К их числу относятся источники на основе радиоактивного распада ядер с выделением большого количества энергии, которую можно преобразовать в электроэнергию. Это так называемые радиоизотопные источники энергии. Они принципиально отличаются от ядерных реакторов тем, что в них используется не энергия цепной реакции деления, а энергия радиоактивного распада ядер.

Для успешного участия в гонке передовых технологий АО «РЕШЕТНЁВ» необходимо совершенствовать и создавать новые технологии в области спутникостроения. Необходимо создавать более эффективные и долговечные источники энергии, которые позволят продлить срок службы спутников и уменьшить затраты на их эксплуатацию. Развитие технологий спутникостроения идет в направлении создания более компактных и легких спутников, что сделает их более доступными для запуска и эксплуатации. Это откроет новые перспективы для применения спутников и увеличит их число в космосе. Средний срок активного существования космического аппарата составляет около 15 лет.

Современные технологии позволяют уменьшить размер и массу спутников, при этом сохраняя их функциональность и возможности. Более компактные спутники могут выполнять широкий спектр задач, начиная от связи и навигации до научных исследований и наблюдения Земли. Это также способствует снижению затрат на запуск и обслуживание спутниковых систем. Автономные источники питания (далее по тексту - АИП) действительно являются одними из наиболее актуальных и перспективных решений в области обеспечения бесперебойного и автономного энергоснабжения в различных условиях работы. Ключевое использование в таких сферах как, космическая отрасль, где длительный срок службы и надежность играют важную роль. АИП

отличаются своей компактностью и надежностью в самых экстремальных условиях.

Важной частью в работе являются механические испытания. Механические испытания, которые будут проводиться в данной работе нужны для того, чтобы на начальных этапах выявить наличие дефектов на технологической оснастки и образцах для испытаний.

В работе использованы такие методы решения задач, как: теория планирование эксперимента, метод экспертных оценок, теория сравнения и выявления результатов.

Средства для решения задач магистерской диссертации: измерительные инструменты, образцы АИП, вибростенд, ударный стенд, акселерометр пьезоэлектрический.

Научная значимость диссертационной работы заключается в разработке новаторской конструкции технологической оснастки на основе анализа современного уровня развития техники и компьютерного моделирования при воздействии нагрузок.

Цель работы разработать на основе анализа современных тенденций развития новых технологий, актуального варианта конструкции технологической оснастки применительно к автономному источнику питания (АИП) для систем КА.

Актуальность работы заключается в том, что нужно определить современный подход к механическим прочностным испытаниям элементов КА и особенностям конструкции технологической оснастки для их осуществления.

Для реализации цели в магистерской работе сформулированные следующие задачи:

- определение и анализ предметной области, выявление проблем и характеристик, особенностей конструктивных решений и особенностей подходов к механическим испытаниям применительно для элементов КА с радиоактивными изотопами;

– анализ имеющихся на сегодняшний день передовых научных и технических разработок в области производства и испытаний гальванических элементов с радиоактивными изотопами;

– анализ конструкций технологических оснасток для механических испытаний, подбор возможных вариантов применительно к требуемым характеристикам по массе, частотным характеристикам и виду виброиспытаний;

– разработать окончательный вариант 3D модели в ПО CATIA V5 для анализа конструкции, по квазистатическим, вибрационным и ударным нагрузкам создание конечно-элементарной модели (КЭМ) для расчета на поиск резонансных частот и эффективных масс (по трем осям) в пакете ПО ANSYS:

- 1) расчет на воздействие квазистатических нагрузок;
- 2) расчет на воздействие синусоидальных вибраций;
- 3) расчет на воздействие широкополосной случайной вибрации;
- 4) расчет на воздействие ударных нагрузок;
- 5) анализ результатов расчетов.

1 Анализ автономных источников питания и технологических оснасток

1.1 Конструкции атомных батарей и их принципы работы

Автономный источник питания (АИП) представляет собой важное устройство, способное генерировать электроэнергию из распада радиоактивных изотопов. Важно отметить, что они отличаются от ядерных реакторов, поскольку в них не происходит цепной ядерной реакции. Интересный факт, что термин «батарея» хотя и широко используется для обозначения автономных источников питания, технически они не являются электрохимическими устройствами и не могут быть заряжены или перезаряжены. Такие устройства могут быть полезны в различных областях, например, в космической технике.

Реальный образец АИП разработанный компанией «РОСАТОМ» и испытан совместно с АО «РЕШЕТНЁВ» представлен на рисунке 1.



Рисунок 1 – автономный источник питания ИРМ «РОСАТОМ»

Технология ядерных батарей началась в 1913 году, когда Генри Мозли впервые продемонстрировал ток, генерируемый излучением заряженных частиц. В 1950-х и 1960-х годах область получила значительное углубленное исследовательское внимание для приложений, требующих источников питания с длительным сроком службы для космических нужд. В 1954 году *RCA* исследовала небольшую атомную батарею для небольших радиоприемников и слуховых аппаратов. С момента начала исследований и разработок *RCA* в начале 1950-х годов было разработано множество типов и методов извлечения электрической энергии из ядерных источников. Научные принципы хорошо известны, но современные нано-технологии и новые широкополосные полупроводники создали новые устройства и интересные свойства материалов, ранее не доступные.

АИП можно разделить по технологии преобразования энергии на две основные группы:

- тепловые преобразователи представлен на рисунке 2;
- нетепловые преобразователи представлен на рисунке 3.

Тепловые типы преобразуют часть тепла, выделяемого при ядерном распаде, в электричество. Наиболее заметным примером является радиоизотопный термоэлектрический генератор (далее по тексту – РИТЭГ) представленный на рисунке 2, часто используемый в КА.

Нетепловые преобразователи извлекают энергию непосредственно из испускаемого излучения, прежде чем оно преобразуется в тепло. Их легче миниатюризировать, и для их работы не требуется температурный градиент, поэтому они подходят для использования в небольших приложениях. В диссертационной работе нетепловой преобразователь имеет принцип работы благодаря изотопу, который заряжает две металлические пластины и имеет небольшое напряжение, измеряемое в мА. Благодаря компактности разрабатываемого устройства в будущем он сможет отдавать свою энергию небольшим устройствам в аппаратуре КА.

Следует заметить, что бета-вольтаические батарейки не следует путать с РИТЭГ, которые тоже иногда называют ядерными батареями. В этих устройствах энергия радиоактивных распадов используется для нагрева и создания потока тепла, который потом конвертируется в электрический ток с помощью термоэлектрических элементов. Эффективность РИТЭГ составляет всего несколько процентов и зависит от температуры. Тем не менее из-за своей долговечности и относительно простого устройства радиоизотопные генераторы широко используются для питания КА – например, зонда *New Horizons* или марсохода *Curiosity*. Ранее РИТЭГ также устанавливали на радиомаяках и метеостанциях, расположенных в труднодоступных областях, однако сейчас эту практику приостановили из-за трудностей утилизации и риска утечки радиоактивных веществ.

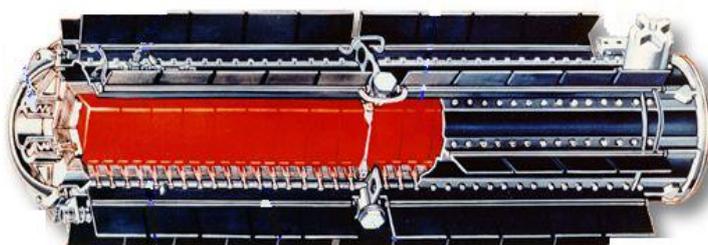


Рисунок 2 – Радиоизотопный термоэлектрический генератор (РИТЭГ)



Рисунок 3 – Образцы нетеплового преобразователя

Группа ученых придумала способ по повышению удельной мощности "атомных батареек" которые демонстрируют значительный прогресс в области использования радиоактивных изотопов и их преобразования в электроэнергию. Использование алмазных преобразователей на основе барьера Шоттки для поглощения бета-частиц от радиоактивного изотопа никеля-63 является инновационным подходом, способствующим значительному увеличению эффективности таких устройств. Благодаря таким исследованиям и разработкам можно ожидать более компактных и эффективных источников питания для различных устройств в будущем.

Результаты исследования "атомной батарейки" продемонстрировали значительную электрическую мощность и высокую удельную мощность данного типа источника энергии. Это открывает перспективы для его применения в различных устройствах с высокими энергетическими потребностями, таких как медицинские имплантаты. Удельная мощность в 1 мкВт на кубический сантиметр свидетельствует о высокой эффективности данной технологии. Структура батарейки, состоящая из алмазных преобразователей, слоев никеля-63 и стабильного никеля, требует тщательной оптимизации для максимизации ее энергетических характеристик. В дальнейшем исследовании необходимо уделить внимание оптимальному балансу внутренних параметров батарейки с целью обеспечения ее стабильной и эффективной работы.

Схема устройства «атомной батарейки» представлена на рисунке 4. Розовым цветом отмечены слои никеля-63, фиолетовым – алмазная ячейка, голубым – контакт Шоттки, желтым – омический контакт, а зеленым – электрические соединители

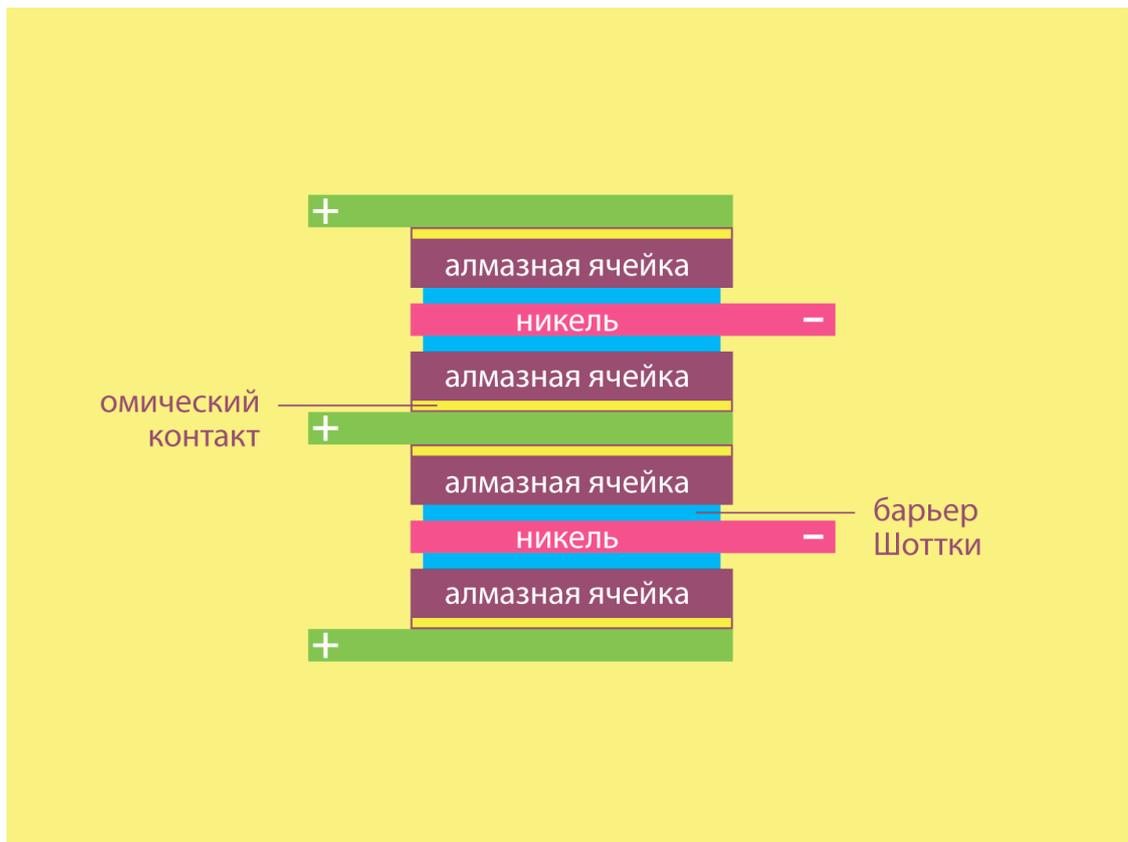


Рисунок 4 – Схема устройства атомной батарейки

Ученые поставили перед собой задачу разработать батарею на основе изотопа никеля–63 с максимальной удельной мощностью, минимизируя объем устройства. Для достижения этой цели они провели численное моделирование движения электронов в бета-источнике и смежных преобразователях, определив оптимальные толщины каждого элемента. По результатам исследования было установлено, что наиболее эффективное функционирование бета-источника на основе никеля–63 достигается при толщине около двух микрометров, а алмазный преобразователь на основе барьера Шоттки – при толщине около 10 микрометров.

Из графика зависимости, представленного на рисунке 5, видно, что насыщение от никелевой фольги происходит при ее толщине около двух микрометров, а при поглощении алмазным преобразователем зависит от его толщины – около десяти микрометров.

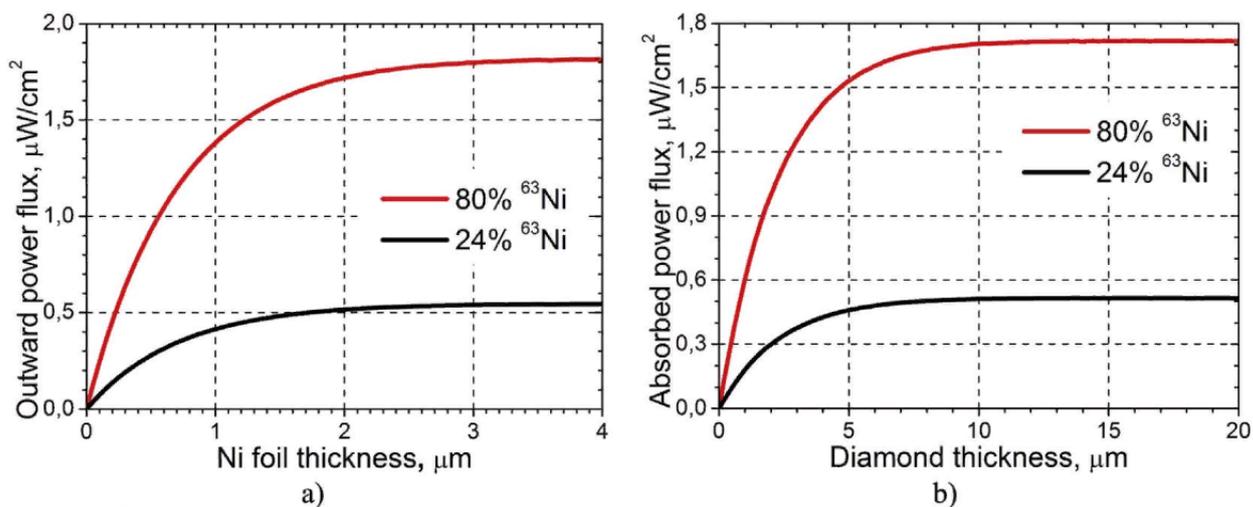


Рисунок 5 – График зависимости потока энергии

1.2 Технология изготовления автономного источника питания

Наиболее затруднительной задачей считается изготовление большого количества алмазных преобразователей со сложной внутренней структурой толщиной всего в несколько десятков микрон. Традиционные механические и ионные методы уменьшения толщины алмаза не подходят для ее решения. Разработка уникальной технологии синтеза и отщепления тонких алмазных пластин от многоразовых алмазных подложек для массового создания сверхтонких преобразователей позволит в будущем изготовить образец атомной батарейки.

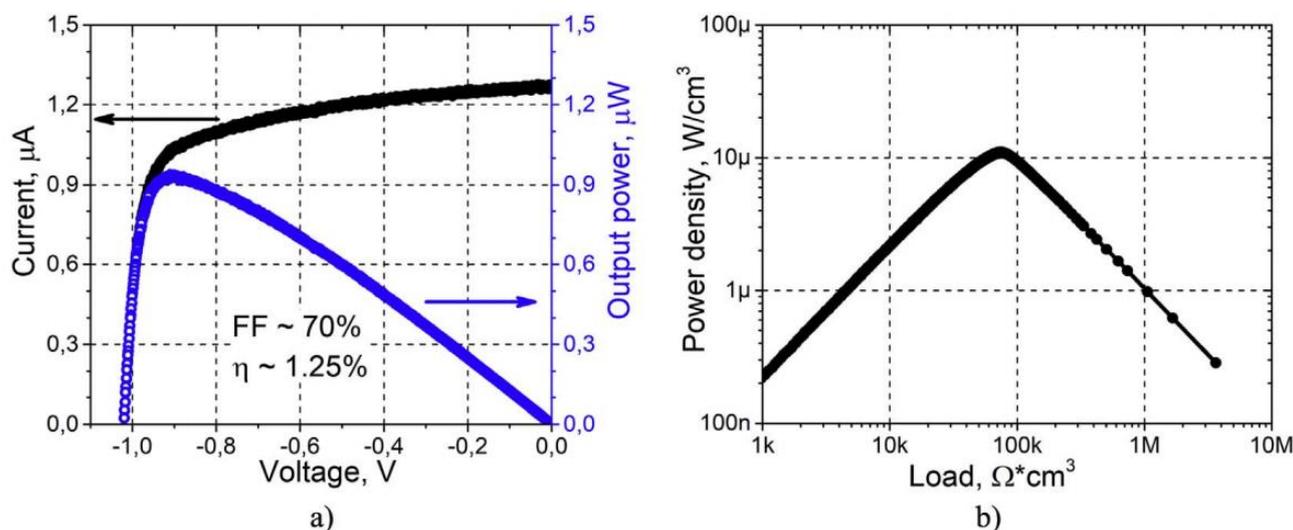
В качестве исходного материала используют 20 толстых подложек из легированного бором алмаза представленный на рисунке 6, выращенного методом температурного градиента. При помощи ионной имплантации в подложках создается дефектный слой толщиной около 100 нанометров на глубине около 700 нанометров. Поверх этого слоя методом осаждения из газовой фазы синтезируется гомо-эпитаксиальный слой слабо легированного бором алмаза толщиной 15 мкм. Затем методом высокотемпературного отжига дефектный слой подвергают графитизации, после чего удаляют методом

электрохимического травления. После удаления дефектного слоя заготовку преобразователя снимают с подложки и покрывают контактами: омическим и Шоттки.

В ходе всего описанного процесса подложка теряет менее 1 мкм толщины, после чего операции повторялись. Таким образом на 20 подложках будет выращены 200 преобразователей.

Разработанная технология чрезвычайно важна с экономической точки зрения: высококачественные алмазные подложки стоят очень дорого, поэтому не подходят для массового производства преобразователей методом уменьшения толщины.

Все преобразователи были объединены параллельно, согласно схеме, показанной на рисунке 7. Технология изготовления фольги никеля-63 толщиной в 2 микрона была разработана в НПО «Луч». Батарею залили эпоксидным клеем для герметичности.



a – зависимость силы тока и выходной мощности, выдаваемой батареей, от напряжения;

b – зависимость выходной мощности от сопротивления подключенной к батарее

Рисунок 6 – Схема зависимости

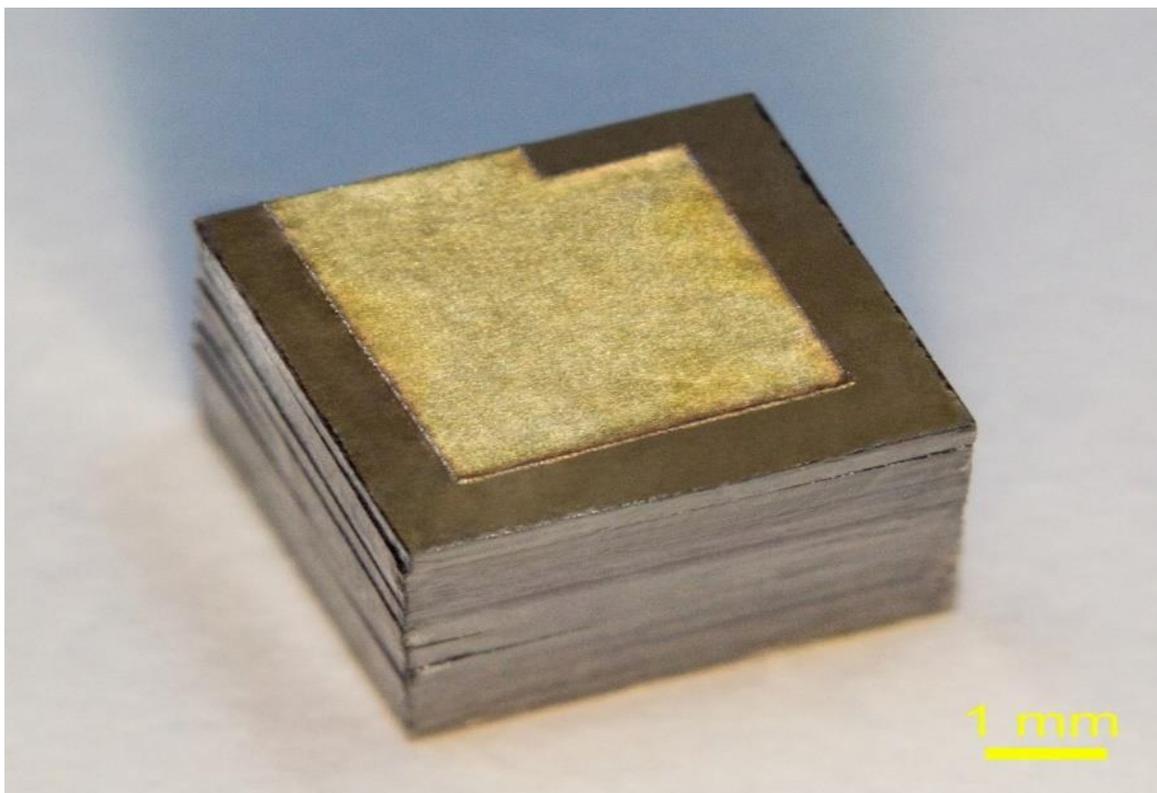


Рисунок 7 – Образец атомной батарейки ФГБНУ ТИСНУМ и НПО «Луч»

1.3 Конструкционные и вспомогательные материалы для производства автономных источников питания

При производстве АИП применяются различные конструкционные и вспомогательные материалы, обладающие специфическими физико-химическими, механическими и ядерно-физическими свойствами, позволяющими повысить коэффициент полезного действия (КПД) устройств и обеспечить высокий уровень безопасности как при нормальной эксплуатации, так и в аварийных условиях:

- высокопрочные стали (в зависимости от назначения);
- медь (теплообменники);
- облегчённые (титан, алюминий, магний, иттрий, бериллий и сплавы);
- радиационная защита (свинец, обеднённый уран, бориды, кадмий, европий, гадолиний, самарий и сплавы);

- теплоносители (ртуть, легкоплавкие сплавы висмута, цезия, натрия, калия, лития, галлия и других металлов, вода и др.);
- термоэлектрические материалы (в зависимости от температурного режима работы);
- разбавители рабочего изотопа (медь, свинец, золото, иттрий, никель);
- припои для герметизации, электрической коммутации, монтажа теплообменной аппаратуры и др.

1.4 Обзор существующих разработок

1.4.1 Разработка компании City Labs

Проведенный обзор предметной области по теме имеющихся на сегодняшний день АИП показал факт наличия большого количества научных и технических разработок как в Российской Федерации, так и за рубежом.

Небольшая американская компания City Labs, Inc., запустила коммерческое производство компактных и сравнительно недорогих бета-гальванических элементов питания, не требующих технического обслуживания и способных вырабатывать энергию в течении десятков лет.

Батареи на основе радиоактивных элементов используются человечеством уже не один десяток лет, однако до сегодняшнего момента они оставались весьма дорогими и требовали соблюдения особых правил эксплуатации. Тем важнее виделась задача создать доступный по цене, компактный и надежный элемент питания, который можно производить серийно, а значит, и без особых проблем найти на массовом рынке.

Разработанные в компании City Labs компактные батареи по своим размерам не превышают стандартную «флэшку». Наверное, это послужило одной из причин, чтобы дать новым элементам питания название NanoTritium. Готовые поступить в продажу бета-гальванические батареи NanoTritium

представлены на рисунке 8 предназначаются для конечных пользователей – в основном организаций и компаний, не имеющих каких-либо «разрешительных» лицензий или штатных специалистов, прошедших особую подготовку.

Новые батареи могут питать, к примеру, сенсоры в глубоководных бурильных установках, миниатюрные медицинские имплантаты.

По словам Питера Кабая, доктор прикладной физики, бывший руководитель научно-коммерческого отдела в Международном Университете во Флориде, со-основатель и главный исполнительный директор компании City Labs, одно устройство будет стоить не более «пары тысяч долларов», однако со временем цены снизятся, по мере того как компания начнет расширять производство.

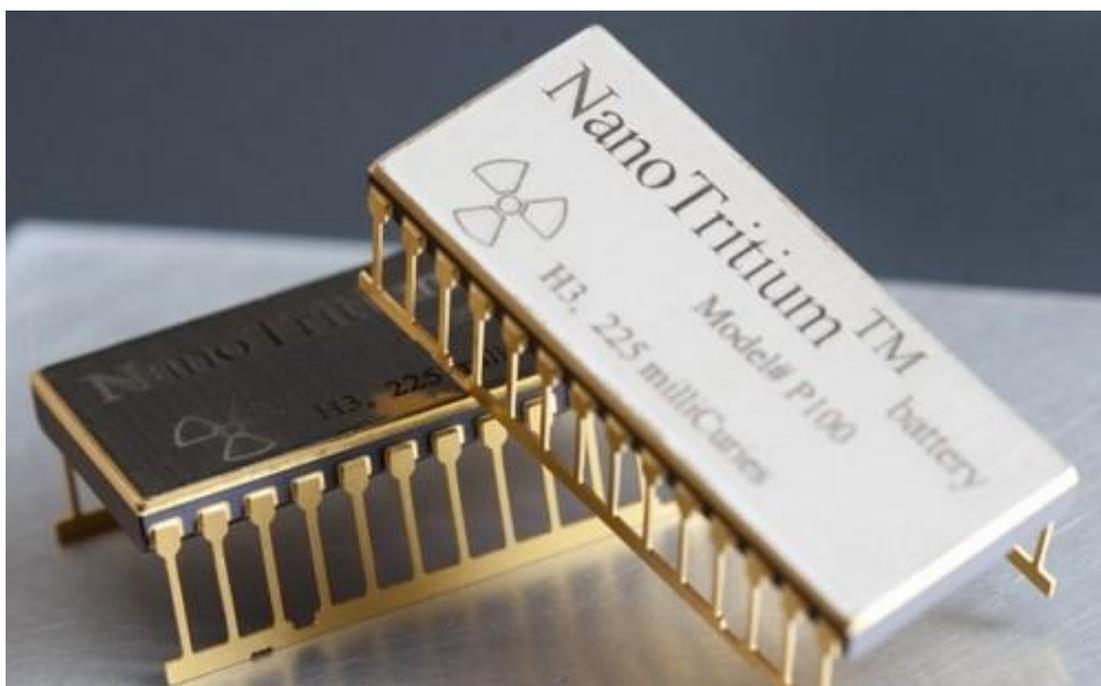


Рисунок 8 – Батареи NanoTritium производство компании City Labs, Inc.

В настоящее время компанию спонсирует NASA. City Labs производит батареи на основе трития, который является наиболее безопасным среди радиоактивных материалов, пригодных для использования в автономных источниках питания. Источники питания используются там, где труднодоступна

замена батарей и требуется маломощный источник непрерывного питания с длительным сроком службы.

Фирма City Labs предлагает модели батареек NanoTritiu, с напряжением 0.8, 1.6 и 2.4В и максимальным током 350 нА. Размер этой батарейки составляет 16 x 35 мм [9].

1.4.2 Разработка компании Beta Batt

Американская компания BetaBatt, Inc. получила грант на коммерциализацию технологии создания автономных источников питания образец представлен на рисунке 9 от Национального научного фонда, финансировавшего также первоначальные исследования. Компания имеет патенты на 3D конструкции преобразователей энергии на основе нано-пористого кремния. Ключевым новшеством патентов является распределение бета-излучения по всему объему ячейки. Ожидается что, первое и второе поколение батареек BetaBatteries будет работать на основе трития. Выходная мощность должна составлять 50 и 175 мкВт/см³, с будущим потенциалом до 2000 мкВт/см³. По состоянию на 2010 год производство компанией BetaBatt, Inc. так и не было начато по неизвестной причине.

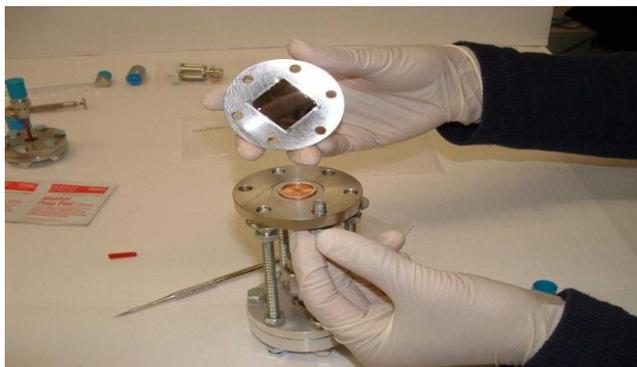


Рисунок 9 – Батареи BetaBatteries производство компании BetaBatt, Inc.

1.4.3 Разработка компании Widetronix

В 2003 году была основана компания Widetronix Inc., которая была награждена грантом в 1,2 млн долларов и 1 млн долларов от министерства обороны США. Widetronix производит бета-вольтаические батарей, с относительно низким энергопотреблением и долгим сроком эксплуатации. В качестве полупроводникового материала для создания бета-батарей используется карбид кремния.

Бета-вольтаический источник питания, представленный на рисунке 10 состоит из трех основных частей: полупроводника, изотопа и корпуса. Полупроводник генерирует постоянный ток, собирая высокоэнергетические бета-частицы, испускаемые изотопным источником. Напряжение неотъемлемо от выбора полупроводника. В нашем случае карбид кремния обеспечивает очень высокое напряжение холостого хода. Этот твердотельный физический процесс преобразования энергии, аналогичный процессу фотоэлектрического (солнечного) элемента, происходит эффективно даже в экстремальных условиях окружающей среды.

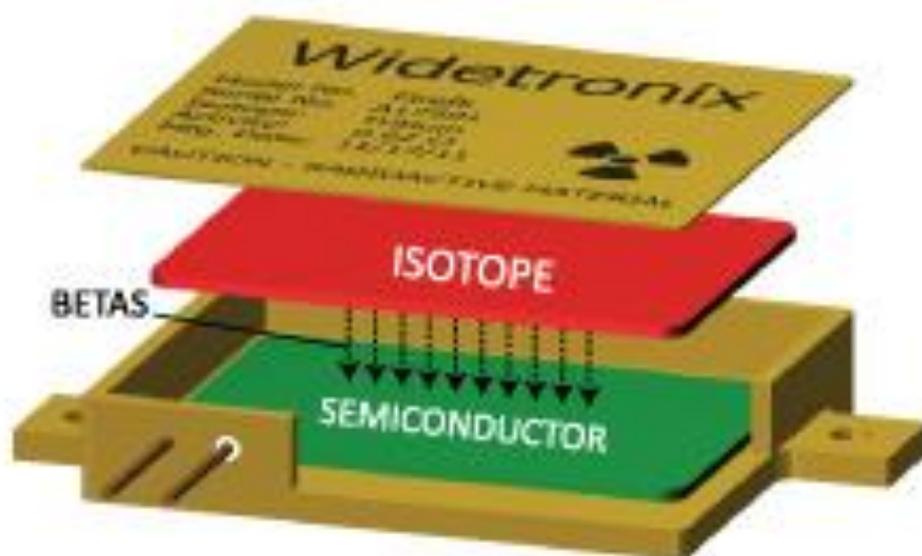


Рисунок 10 – Батарей Firefli производство компании Widetronix Inc

Изотоп определяет текущую производительность прибора. Выбирая количество и тип изотопа, можно создать индивидуальный источник питания с заданной мощностью и сроком службы. Энергия, вырабатываемая бетавольтаикой, может быть использована немедленно или сохранена для использования позже с помощью конденсатора или тонкопленочной батареи.

Плотность энергии устройства продиктована упаковкой. Передовые технологии упаковки полупроводников могут быть использованы для создания небольшого, безопасного и надежного устройства.

Последние разработки фирмы Widetronix лежат в области создания миниатюрного источника питания для физиомониторинга и терапевтических применений. Ожидается, что выходная мощность будет достигать 10 мкВт/см^2 . Работа должна была завершиться в 2013 году, на данный момент нет никакой информации о результатах работы [14].

1.4.4 Разработка кафедры университета науки и технологии

Новая разработка, представленная на рисунке 11 имеет бета-вольтаический элемент с двусторонним нанесением радиоактивного элемента и оригинальной трехмерной структурой, из-за чего данный источник питания имеет небольшие размеры, повышенную удельную мощность, а также низкую себестоимость при массовом производстве.

В перспективе новинку можно будет применять как источник питания (в том числе и аварийный), а также датчик температуры, в разном плане устройствах, эксплуатация которых подразумевается в труднодоступных и удаленных местах с экстремальными температурами – космос, высокогорье, большие водные глубины.

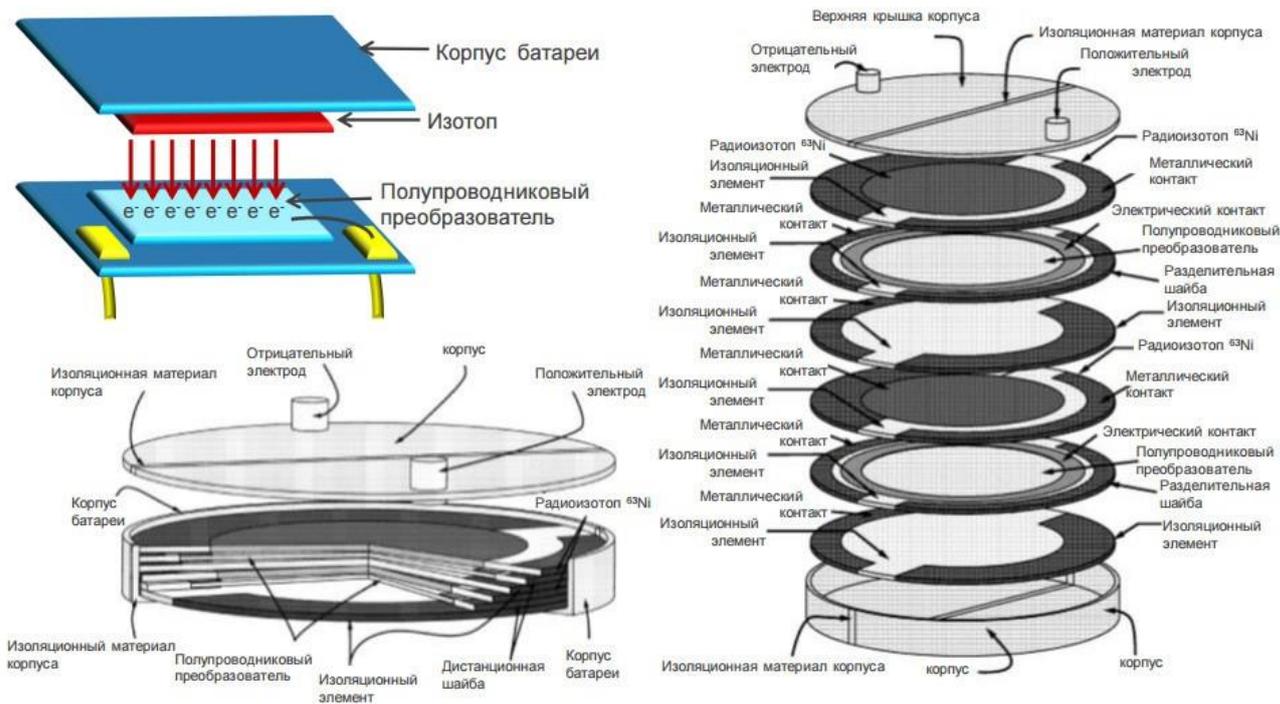


Рисунок 11 – Конструкция атомной батарейки кафедры университета науки и технологии

1.5 Обзор технологических оснасток для испытаний

Развитие производства в машиностроении неразрывно связано с техническим оснащением и модернизацией средств производства на базе применения новейших достижений науки и техники. Подготовка производства новых видов продукции машиностроения, несмотря на техническое перевооружение и модернизацию производства, неизбежно включает процессы проектирования технологической оснастки, составляющей приблизительно 50% от общего объема технологического оснащения. Технологическая оснастка является одним из важнейших факторов, влияющих на качество выпускаемой продукции машиностроительного предприятия [15].

Технологической оснасткой являются средства технологического оснащения производства, дополняющие основное технологическое оборудование для выполнения определенных операций технологического

процесса. К технологической оснастке относятся приспособления различного назначения, режущий инструмент, пресс-формы, штампы, литейные формы, модели [16].

При изготовлении различных приборов и изделий проводится тестирование на механические воздействия внешней среды в соответствии с заданными методиками и техническими условиями. Это необходимо для того, чтобы продукция была конкурентоспособной и обладала высоким качеством. Обычно такие тесты проводят на современных электродинамических вибростендах.

Для размещения и закрепления испытуемых изделий на арматуре виброустановки необходимо использовать специальную переходную конструкцию, которая позволяет с одной стороны закрепить на себе изделие, а с другой стороны присоединиться к арматуре вибростенда.

Кроме функции закрепления, оправка для виброиспытаний является промежуточным звеном для передачи толкающего усилия от движущегося стола оборудования к объекту испытаний.

Технологическая оснастка классифицируется по нескольким признакам:

- по целевому назначению;
- по степени механизации и автоматизации;
- по степени специализации.

По целевому назначению приспособления делят на пять групп:

- станочные приспособления;
- приспособления для установки, крепления и регулирования рабочих инструментов;
- сборочные приспособления – применяются на операциях сборки изделий;
- контрольные приспособления – применяют для контроля геометрических параметров заготовок.

Классификация универсальных, специализированных и специальных приспособлений представлена на рисунке 12.

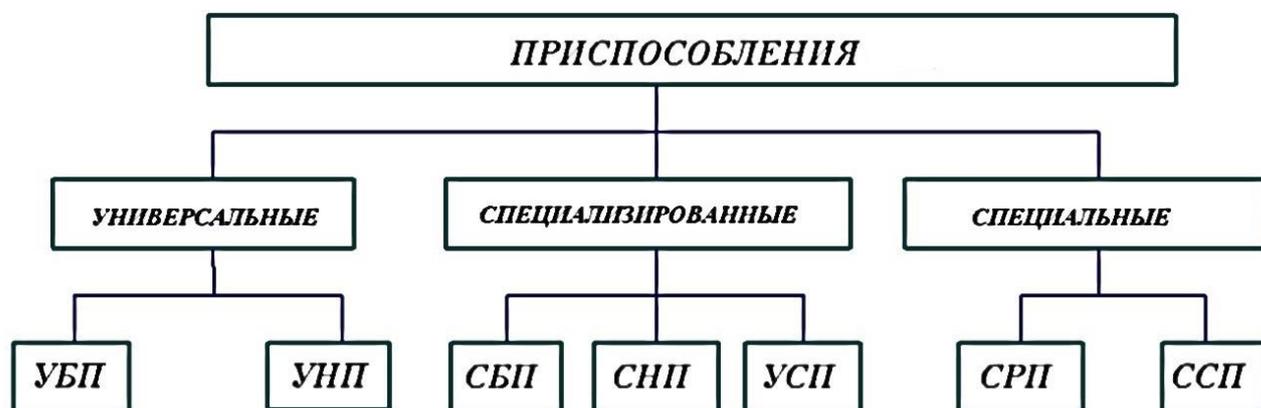


Рисунок 12 – Классификация приспособлений

Универсальные безналадочные приспособления (УБП) – используют для закрепления заготовок широкой номенклатуры и различной конфигурации.

Универсальные наладочные приспособления (УНП) – многократного применения применяют для установки и закрепления определенной группы, схожих по форме заготовок и деталей, обрабатываемых на токарных, фрезерных, сверлильных станках.

Специализированные безналадочные приспособления (СБП) – используют для закрепления заготовок, близких по конструктивно-технологическим признакам, с одинаковыми базовыми поверхностями, требующих одинаковой обработки.

Специализированные наладочные приспособления (СНП) – состоят из двух частей: 1 часть – базовый агрегат и 2 часть – специальная сменная наладка.

Универсально - сборные приспособления (УСП) – представляют собой систему, состоящую из набора стандартных деталей и сборочных единиц, из которых komponуют и собирают различные приспособления одноцелевого назначения.

Сборно-разборные приспособления (СРП) - являются разновидностью оснастки многократного применения.

Специальные станочные приспособления (ССП) – используют для выполнения определенной операции при обработке конкретной детали. Такие приспособления являются одноцелевыми. Их используют в массовом производстве при постоянном закреплении операций на рабочих местах. Является действительностью, что такие приспособления трудоемки и дороги в изготовлении их изготавливают в единичном количестве, а применяют главным образом в крупносерийном и массовом производстве.

При выборе приспособлений нужно ориентироваться в первую очередь на следующее:

- тип производства;
- программа выпуска деталей;
- формы и габаритные размеры деталей;
- точность изготовления деталей;
- технических требований, предъявляемых к деталям.

1.6 Варианты исполнения технологических оснасток

Исходя из особенностей эксплуатации изделия, требований для проверки его характеристик, существуют различные варианты исполнения оснастки для испытаний.

Расширительные столы, представленные на рисунке 13 являются самым идеальным решением, т.к. имеют большую рабочую площадь, частотный диапазон может достигать 2500 Гц.



Рисунок 13 – Виды расширительных столов

Расширительные столы в данной модификации имеют, как правило, коническую оребренную конструкцию с квадратной или круглой рабочей поверхностью для приложения воздействия к объекту испытания в вертикальном направлении. Объект испытания закрепляется на горизонтальной рабочей поверхности стола;

Угловая, Т-образная, П-образная. Данные варианты исполнения предназначены для имитации приложения нагрузки к объекту испытания в поперечном направлении. Объект испытания закрепляется на вертикальной рабочей поверхности оснастки. Частотный диапазон может достигать 2500 Гц и зависит от технологии изготовления.

Индивидуальные конструкции оснастки для виброиспытаний. В случае, если объект испытания имеет сложную форму и нестандартное расположение

зон крепления рисунок 14, мы готовы осуществить индивидуальное проектирование для конкретного объекта с учетом всех необходимых технических особенностей. Частотный диапазон может достигать 2500 Гц и зависит от технологии изготовления.

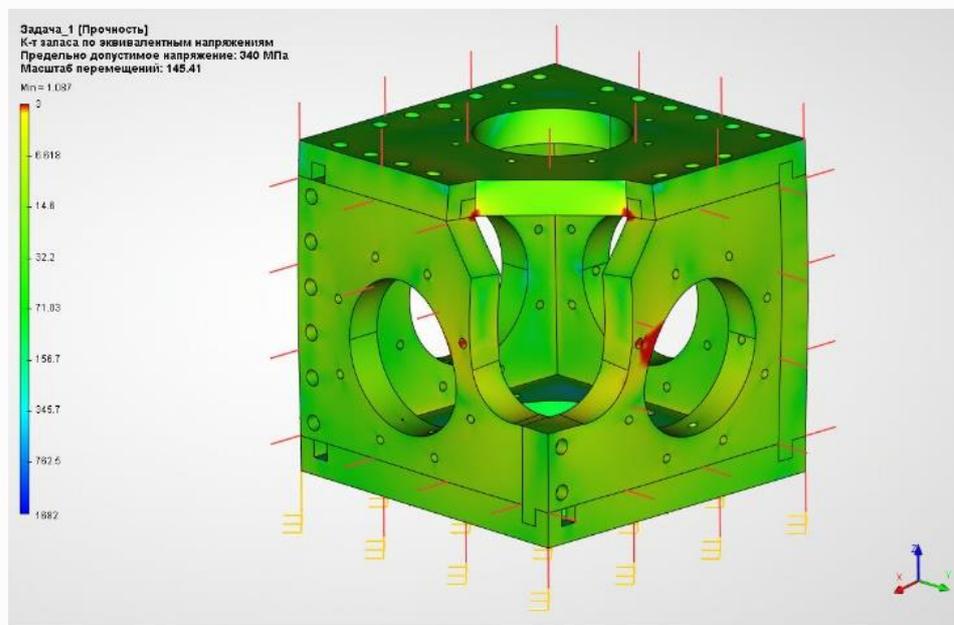


Рисунок 14 – Специализированная оснастка

1.6.1 Требования, предъявляемые к разработке технологических оснасток

Порядок организации работ по разработке, изготовлению, эксплуатации и авторскому надзору за изготовлением и эксплуатацией средств технологического оснащения должен соблюдаться согласно СТП 107-68-2005.

Требования настоящего стандарта обязательны для персонала всех смежных организаций по изготовлению того или иного технологического оборудования.

Для обеспечения эффективного проведения виброиспытаний следует учитывать следующие требования к конструкции и размерам рабочей поверхности:

- габариты и конструкция рабочей поверхности должны обеспечивать надежное крепление объекта испытания;
- центр масс оснастки в сборе с объектом испытания должен располагаться на минимально возможном расстоянии от оси вибростенда в пределах заданного допуска для исключения избыточного опрокидывающего момента и паразитных поперечных колебаний;
- конструкция должна обладать достаточной прочностью с учетом массы объекта и максимальной расчетной интенсивности режима нагружения;
- необходимо обеспечить проведение тестирования в требуемом диапазоне частот (для этого проектирование осуществляется таким образом, чтобы конструкция не имела собственных резонансов в заданной полосе частот теста);
- конструкция должна обладать минимальной массой при выполнении перечисленных выше условий для обеспечения максимально возможного уровня нагружения на имеющемся оборудовании.

1.6.2 Технологии производства технологических оснасток

В зависимости от необходимого Заказчику варианта исполнения конструкции, применяются различные технологии производства.

Цельнофрезерованная. Технология может применяться при производстве оснастки небольших размеров (ориентировочно до 350x350x120 мм), а также при производстве комплектов переходных пластин. Преимуществом является отсутствие разъемных соединений, что обеспечивает широкий частотный диапазон, по сравнению со сборной технологией, а также большую прочность, по сравнению с литой технологией, за счет применения термообработанных алюминиевых сплавов с повышенными механическими характеристиками.

Универсальная сборная технология представляет собой метод изготовления крупногабаритной оснастки для виброиспытаний в низком диапазоне частот (от 200 до 700 Гц в зависимости от размеров и массы объекта

испытания, а также от допустимой массы оснастки). Одним из главных преимуществ сборной конструкции является ее небольшой вес и возможность разработки универсальных переконфигурируемых П-образных конструкций. Это позволяет регулировать положение центра тяжести в сборе с объектом испытания, что делает такие механизмы применимыми для широкого спектра изделий с значительно различающимися габаритами и массой.

Сварная технология применяется при изготовлении орбренной оснастки средних и крупных габаритов, обеспечивая возможность проведения виброиспытаний в широком диапазоне частот за счет отсутствия разъемных стыков. Преимуществом данного подхода является возможность формирования индивидуальной сложной формы изделия, а также более низкая экономическая затрата в случае изготовления оснастки для объектов крупных размеров по сравнению с аналогичными изделиями, произведенными с применением литейной технологии. Однако имеются недостатки данного метода, включая необходимость проведения термической обработки, ограниченную геометрическую точность изготовленных конструкций из-за возможного появления деформаций при релаксации сварных остаточных напряжений, а также вероятность образования трещин в сварных соединениях при эксплуатации под воздействием значительных нагрузок.

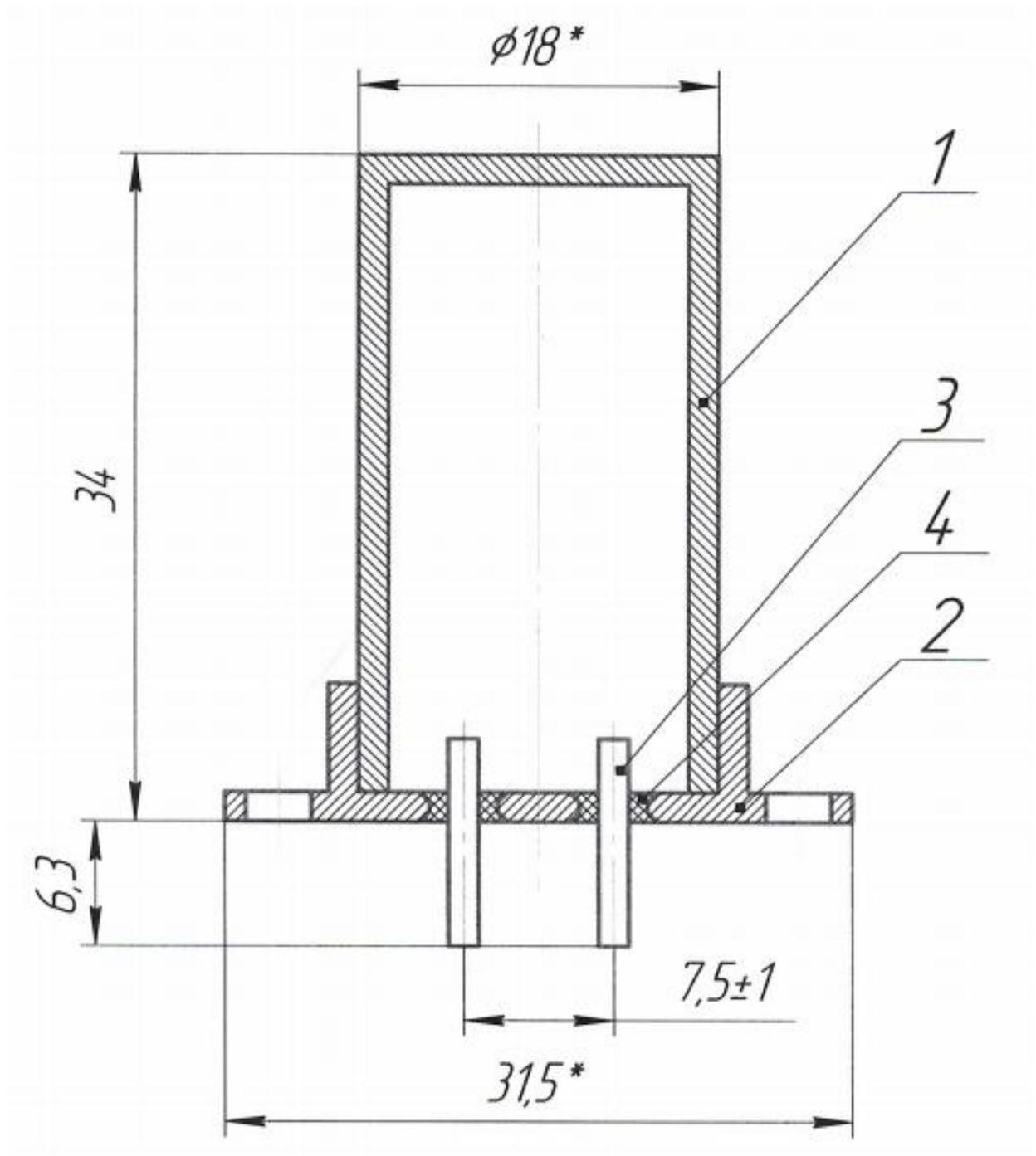
Литая технология позволяет получить наилучшие характеристики, необходимые для успешного проведения виброиспытаний. Однако производство литейной оснастки характеризуется более высокой стоимостью из-за сложной технологической цепочки (включающей механическую обработку деревянной модели, изготовление литейной формы из песчаной смеси, отливку, и последующую механическую обработку полученной заготовки), а также более низким пределом текучести у литейных алюминиевых сплавов по сравнению с материалами, применяемыми в других технологиях производства.

2 Анализ объекта исследования и разработка технологической оснастки

2.1 Описание объекта исследования, общий вид, размеры и масса

Рассматриваются четыре образца АИП, одинаковой массы и габаритных размеров. Конструкция, представленная на рисунке 11 состоит из корпуса (основание и крышка) и смонтированными в него элементами питания (сборка). Элементы питания электрически соединены с двумя выводами (электроды) и механически зафиксированы в корпусе компаундом представленный на рисунке 15. АИП к установочной плоскости крепится двумя винтами М2 в отверстия, расположенными на основании.

Для проведения анализа из геометрической модели АИП представленный на рисунке 16 исключены элементы, не влияющие на прочность его конструкции, а также 3D-модели которых не имеет полного соответствия с реальным объектом (провод, резьбы, клеевые слои и т.д.). Масса исключенных элементов равномерно распределена по поверхностям их установки. Элементы питания моделируются весовыми имитаторами. Для оптимизации вычислительных ресурсов, участвующие в расчете 3D-модели упрощены в части исключения нулевых толщин, надписей и т.д.



1 – сборка; 2 – крышка; 3 – основание; 4 – электрод; 5 – стекло; 6 – компаунд; 7 – провод.

Рисунок 15 – Внешний вид АИП

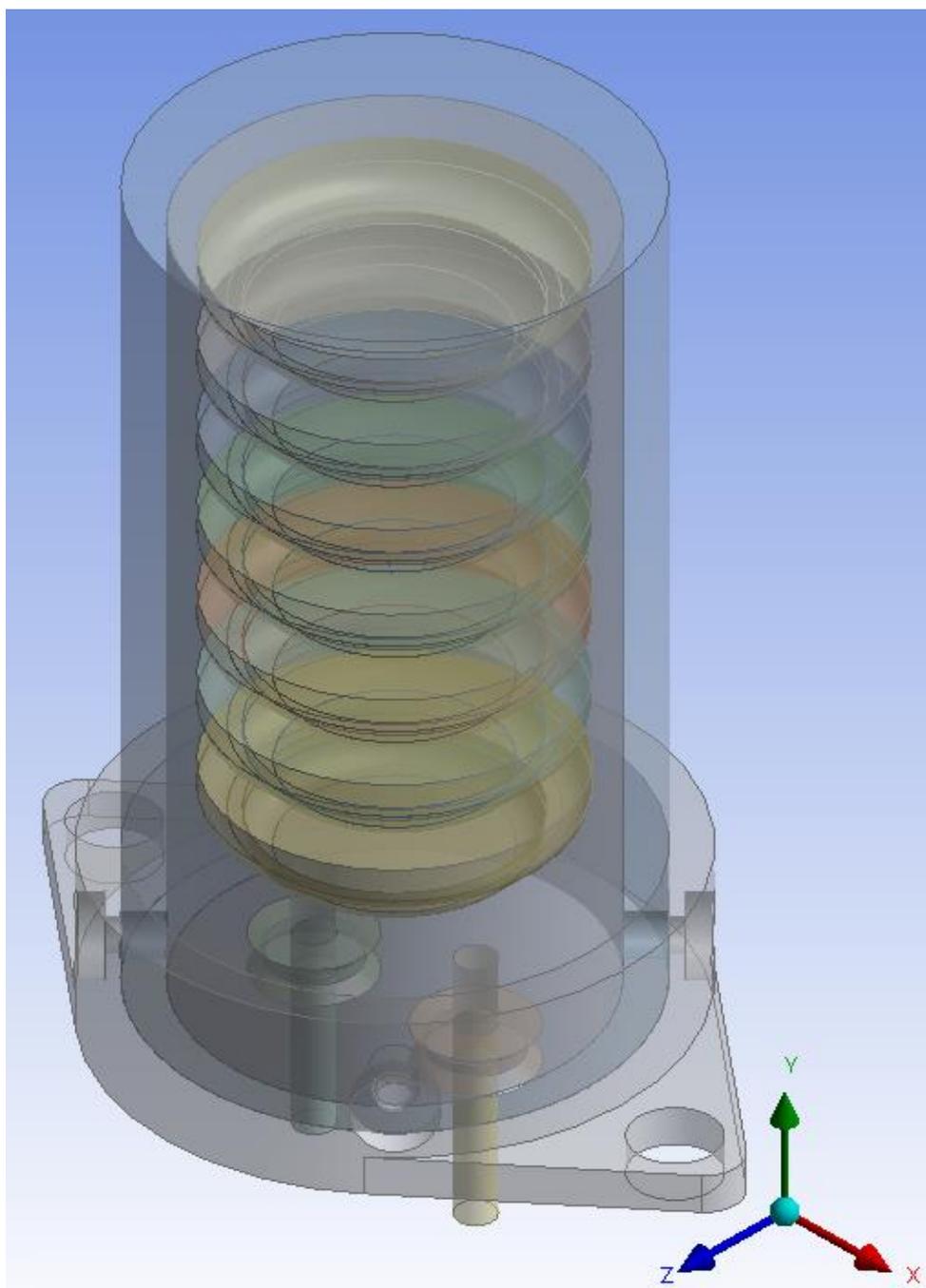


Рисунок 16 – Общий вид геометрической модели конструкции АИП

Габариты – 40,3x21x31,5 мм (ВxШxД).

Масса – 0,038 кг.

В таблице 1 представлены используемые материалы в модели АИП.

Таблица 1 – Материалы, используемые в модели АИП

Материал	Плотность ρ , кг/м ³	Модуль Юнга E, ГПа	Коэф. Пуассона μ	Предел текучести σ_T , МПа	Предел Прочности σ_B , МПа
Сталь 12X18H10T (корпус)	7630	220	0,31	200	520
Сталь 29НК (электроды)	8200	145	0,31	-	490
Полиамид	1150	2	0,28	-	40

2.2 Анализ и разработка конструкции технологической оснастки

Для проведения испытаний на прочность при вибрационных и ударных нагрузках в процессе эксплуатации, вибрационных нагрузках при транспортировании в составе изделия, нужно разработать и изготовить специализированную оснастку.

В ходе разработки специализированной оснастки необходимо выбрать её вариант исполнения и разработать конструкцию.

В п.3.2.2 мы рассмотрели варианты исполнений и выбрали подходящую конструкцию – цельнофрезерованную.

Цельнофрезерованная оснастка не способствуют внесению дополнительных резонансных колебаний, обеспечивает широкий частотный диапазон, и обладает повышенной прочностью по сравнению с литой и сварной технологиями изготовления за счет отсутствия разъёмных соединений и собственных конструктивных элементов.

Конструктивно оснастка представляет собой плиту с технологическими отверстиями для крепления к испытательным стендам и размещением образцов. Для крепления ТО используются металлические втулки, винты, шайбы. Образцы фиксируются винтами с использованием пружинных шайб предотвращающих

раскручивание винтов в процессе испытаний. Оснастка изображена на рисунках 17, 18.



Рисунок 17 – Готовая технологическая оснастка

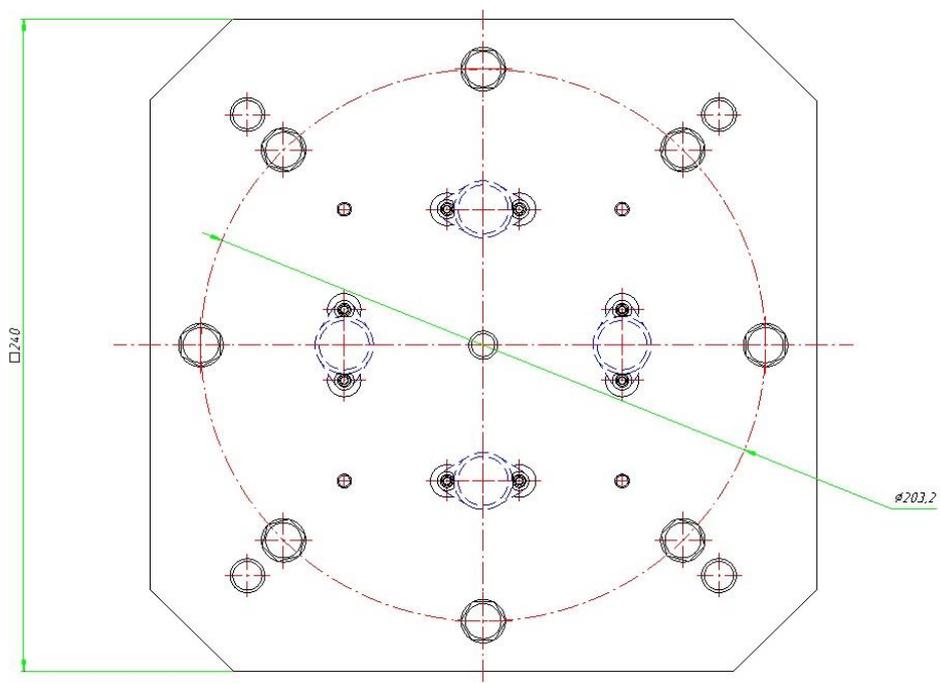


Рисунок 18 – Цельнофрезованная оснастка для испытаний образцов

Перед вводом в эксплуатацию оснастка должна пройти аттестацию для проведения испытаний, в ходе которой подтверждают, что оснастка не имеет отклонений по резонансным частотам, разбросу ускорения по точкам крепления изделия по отношению к точкам управления.

2.2.1 Выбор материала и заготовки

Для изготовления оснастки мы выбрали заготовку из плиты АМгББ по ГОСТ 17232-99.

Алюминиевая плита представляет собой плоский профиль легкого серебристого металла, толщиной более 10 мм. Это полуфабрикат прямоугольного сечения для производства конструктивных элементов и деталей, в частности пресс-форм специальных заготовок. Плиты получают из чистого алюминия и его сплавов в процессе прокатки или литья, химический и механический состав которого представлен в таблице 2,3.

Плиты подразделяют по способу изготовления:

- неплакированные;
- плакированные:
 - 1) с технологической плакировкой – Б;
 - 2) с нормальной плакировкой – А;

Толщина плакирующего слоя на каждой стороне плиты от номинальной толщины должна составлять не более 1,5%.

По точности изготовления, по толщине:

- нормальной точности;
- повышенной точности – П.

Таблица 2 – Химический состав АМг6Б

Кремний	Железо	Медь	Марганец	Магний	Хром	Цинк	Титан	Примеси
0,4	0,4	0,1	0,5-0,8	5,8-6,8	-	0,02	0,02-0,1	Каждая 0,05%, всего 0,1%

Таблица 3 – Механические свойства АМг6Б при T=20°C

Сортамент	σ_B , МПа	σ_T , МПа	δ_5 , %
Плита, ГОСТ 17232-99	275-305	130-145	4-11

Механические свойства образцов, вырезанных из плит, должны соответствовать требованиям, приведенных в ГОСТ 17232-99.

Предъявляемые требования к плитам:

- плиты изготавливают без обрезки боковых кромок;
- на плитах с обрезанными концами не должно быть расслоений;
- поверхность плит должна быть без трещин, расслоений, пятен коррозионного происхождения и т.д.;
- допускается зачистка дефектов поверхности в пределах минусовых отклонений по толщине.

Из выше приведенных характеристик, выбираем алюминиевую плиту марки АМг6Б с технологической плакировкой нормально точности, размер плиты 240x240x25 мм.

2.2.2 САД модель

В соответствии с выбранными характеристиками и данными параметрами технологической оснастки, конструктор должен спроектировать модель и отдать документацию на изготовление изделия.

Данная технологическая оснастка разрабатывалась в программе CATIAV5 совместно с программным обеспечением NanoCAD.

Приведенные результаты моделирование представлены на рисунке 19.

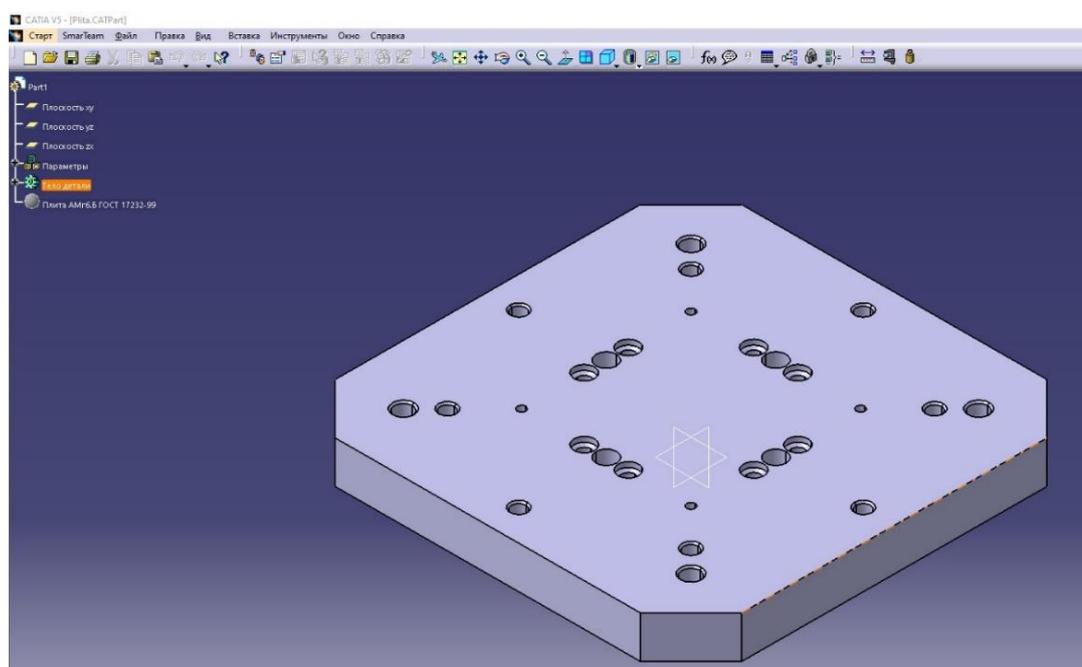


Рисунок 19 – Модель в ПО САТИАV5

Отверстия расположенные на корпусе плиты были выполнены согласно конструкторскому решению по расположению АИП на его корпусе. Такое расположение считается наилучшим для того, чтобы одновременно испытать четыре образца АИП.

Для того, чтобы все характеристики в программе были правильно подсчитаны, нужно назначить материал изделия АМг6Б ГОСТ 17232-99. После того как были введены правильные параметры программа покажет конструкционные свойства изделия, а также массу детали рисунок 20, 21.

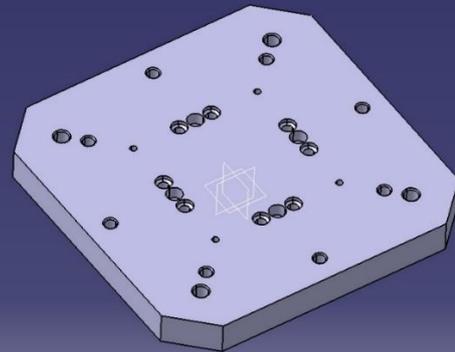
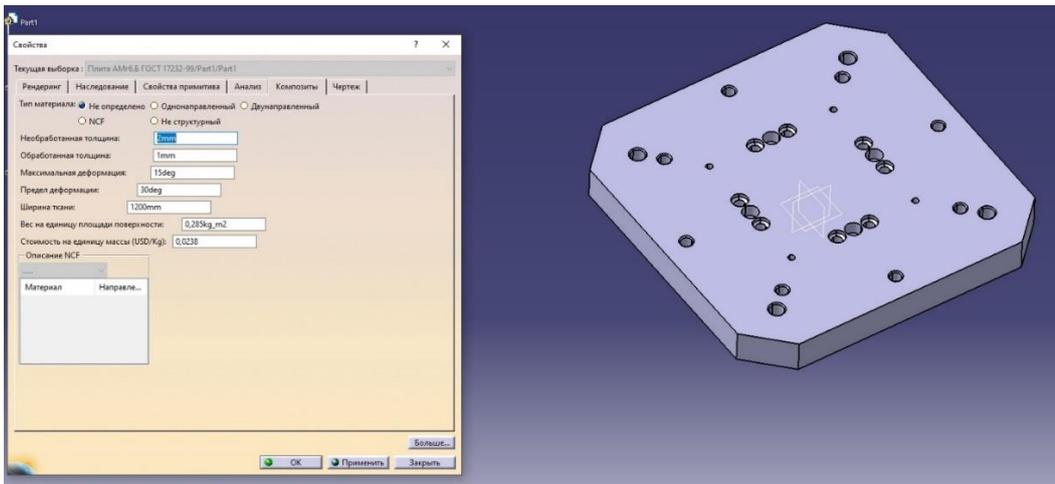
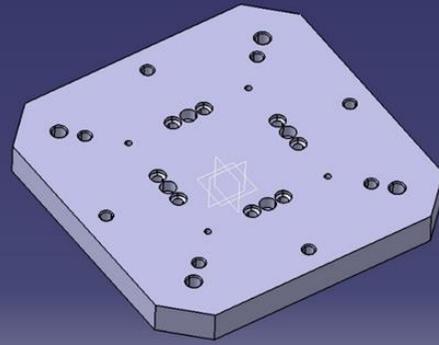
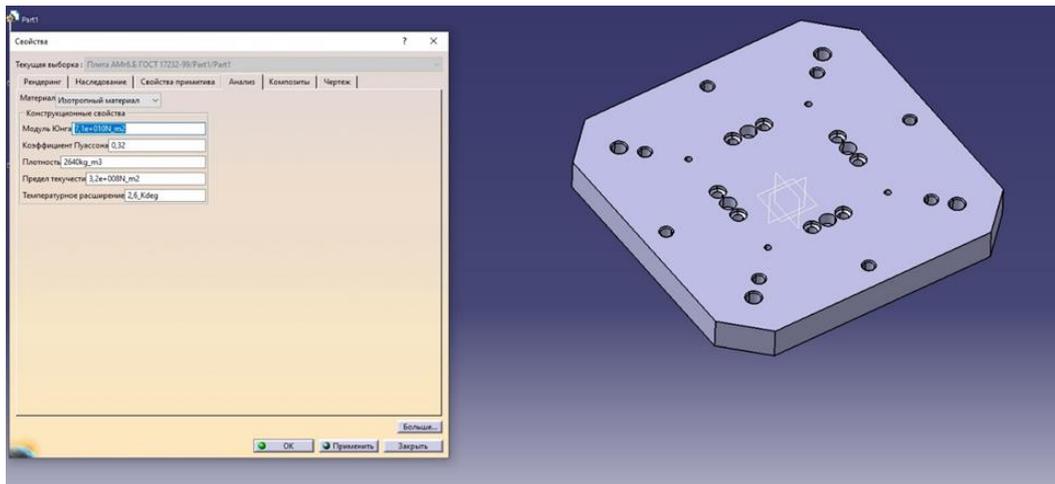


Рисунок 20 – Конструкционные свойства

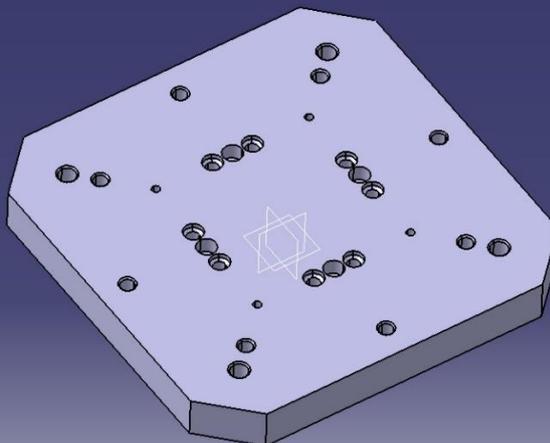
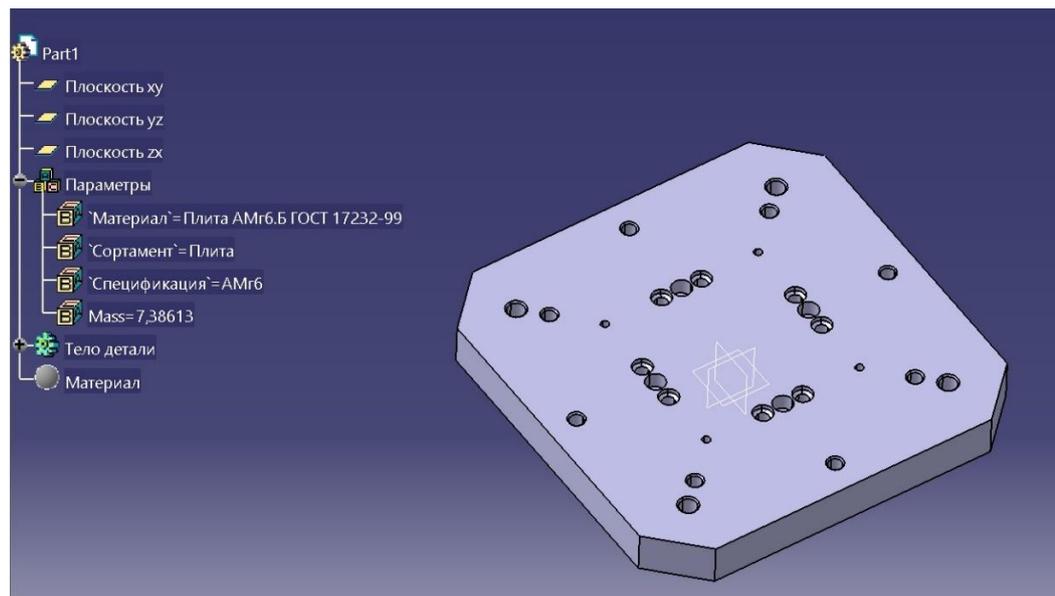


Рисунок 21 – Масса изделия

2.3 Анализ конструкции, нагрузок и расчеты

Бортовая аппаратура является важной частью КА, предназначенной для его управления, поддержания обеспечивающих систем и использования по целевому назначению на протяжении срока активного существования.

Для того чтобы обеспечить устойчивость к нагрузкам, которые влияют на аппаратуру в КА рассмотрим факторы внешней среды.

Факторы внешней среды подразделяются на:

- климатические (температура, атмосферное давление, влажность и т.д.);
- механические (вибрации, удары, акустические шумы и т.д.);
- радиационные (космическая радиация).

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

Рассмотрим такой фактор как температура который может приводить к пересыханию защитных покрытий с деформацией или растрескиванием; изменение электрических характеристик; деформации сопрягаемых деталей с различными температурными коэффициентами расширения.

Повышение влажности в среде приводит к тому, что снижается сопротивление изоляции между гальванически не связанными цепями, к электролизу, коррозии.

Поскольку различные факторы внешней среды могут привести к выходу из строя аппаратуры, процесс разработки и конструирования должны быть направлены на выбор таких материалов, которые бы в совокупности обеспечили стойкость аппаратуры к внешним воздействующим факторам заданной интенсивности.

Механические воздействия на АИП появляются под действием внешних нагрузок (вибрации, удары, ускорения, акустические шумы) и могут возникнуть,

как в работающем состоянии, если установлен на подвижном объекте, так и при транспортировке в нерабочем состоянии.

Механические воздействия могут приводить к взаимным перемещениям деталей и узлов, деформации крепёжных, несущих и других элементов конструкций. При незначительных механических воздействиях в элементах конструкции возникают упругие деформации, не сказывающие на работоспособность аппаратуры. Увеличение нагрузки приводит к появлению остаточной деформации и при определенных условиях разрушению конструкции. Разрушение может наступит и при нагрузках, много меньших предельных значений статистической прочности материалов, если конструкция окажется подверженной знакопеременным нагрузкам [17].

Квазистатическая нагрузка – это один из видов перегрузок, который испытывает спутник при выводе на орбиту. Проверочный расчет проводится с помощью программных модулей T-FLEX или ANSYS.

Основной целью статистического прочностного анализа конструкции заключается в оценке напряжённого состояния конструкции, находящейся под действием не изменяющихся во времени (статистических) силовых воздействий.

Необходимо проверить приняты конструкторско-технологические решения на прочность при воздействии квазистатических нагрузок.

Критерием оценки устойчивости к нагрузкам служит запас прочности по текучести рассчитывается по формуле

$$\eta_T = \frac{\sigma_T}{\sigma_P}, \quad (1)$$

для металлов и запас прочности по пределу прочности, представленной формулой:

$$\eta_B = \frac{\sigma_B}{\sigma_P}, \quad (2)$$

для неметаллов.

где η_T – запас прочности по текучести;

η_B – запас прочности по пределу прочности;

σ_T – напряжение предела текучести;

σ_B – напряжение предела прочности;

σ_P – максимальное расчетное напряжение.

Максимальные напряжения вычислялись по модели Фон Мизеса.

Критерии:

– резонансные частоты элементов конструкции должны быть больше 150 Гц;

– запасы прочности η_T и η_B должны быть не менее 1.

Конструкция АИП должна обеспечивать устойчивость к квазистатическим, вибрационным и ударным нагрузкам, что должно подтверждаться механически анализом.

Четыре элемента автономного источника питания рассчитывались совместно с технологической оснасткой.

2.4 Расчет объекта исследования с технологической оснасткой

Руководствуясь нормам прочности в АО «РЕШЕТНЁВ», были выбраны требования к квазистатическим, вибрационным и ударным нагрузкам, таблицы 4-6.

Таблица 4 – Квазистатические нагрузки

Направление действия	Ускорение, m/c^2 (g)
Ось OZ ЭРИ	± 12 g
Оси XOY ЭРИ	± 6 g

Таблица 5 – Вибрационные нагрузки

Направление действия относительно плоскости крепления оборудования	по оси OZ ЭРИ		по оси XOY ЭРИ	
	Частота, Гц	Амплитуда	Частота, Гц	Амплитуда, g
Синусоидальная вибрация	5 – 10 10 – 20 20 – 100	±10 мм от 4 до 12 g 12 g	5 – 10 10 – 20 20 – 100	±10 мм от 4 до 6 g 6 g
Случайная вибрация	20 – 100 100 – 300 300 – 360 360 – 1000 1000 – 2000	+9 дБ/окт 0,2 g ² /Гц -12 дБ/окт 0,1 g ² /Гц -12 дБ/окт	20 – 100 100 - 1000 1000 – 2000	+6 дБ/окт 0,1 g ² /Гц -6 дБ/окт
Среднеквадратичное значение, g	12,1		12,0	

Таблица 6 – Ударный нагрузки

Частота, Гц							
30-50	50-100	100-200	200-500	500-1000	1000-2000	2000-5000	5000-10000
Значение ударного спектра ускорения, g							
13-25	25-75	75-200	200-875	875-2500	2500	2500	2500

Сигнал, соответствующий требованиям таблицы 5 – представлен на рисунке 22 и является производной (ударным спектром) от полусинусоиды длительностью 0,3 м/с, с амплитудой 1750 g. Отличия по ударным спектрам не превышают 30 %.

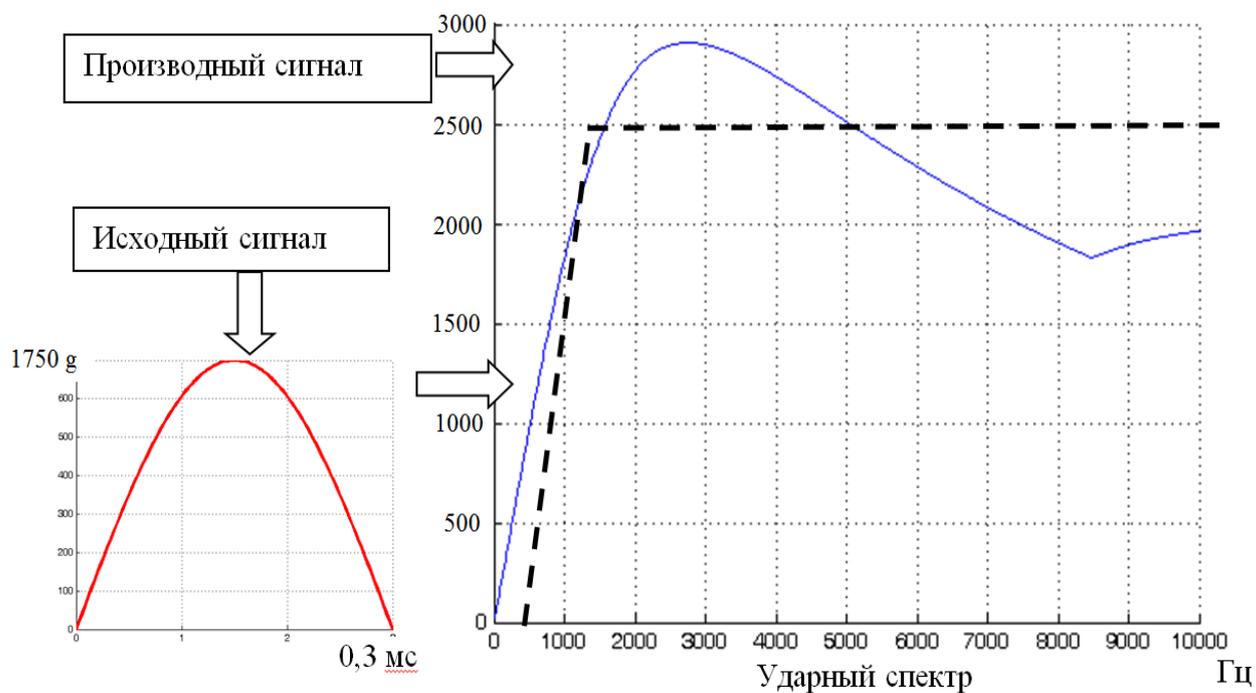


Рисунок 22 – Требования по ударному спектру

Конечно-элементная модель (далее по тексту - КЭМ) создана для расчета в САЕ пакете. КЭМ АИП представлена на рисунке 23.

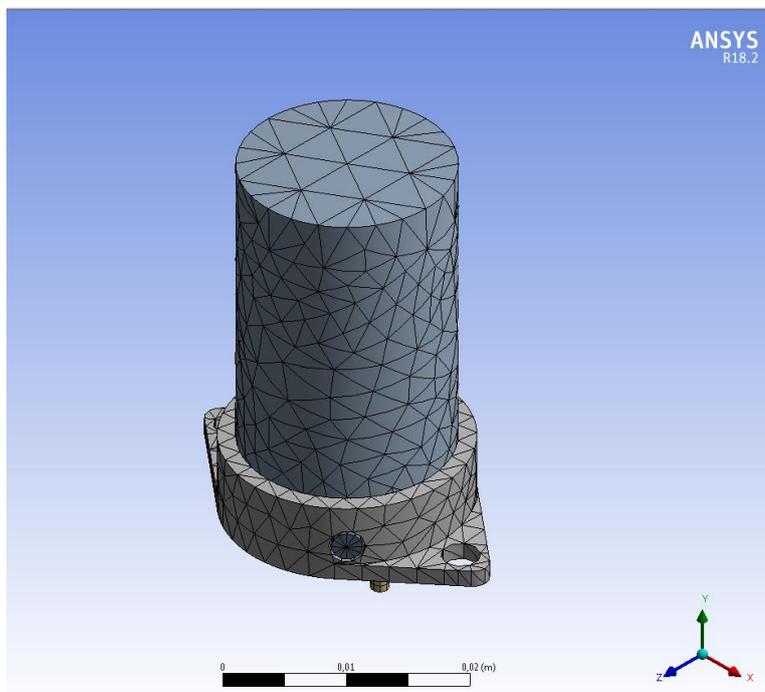


Рисунок 23 – Конечно-элементная модель АИП

Граничные условия: 2 отверстия на нижней плоскости АИП – жесткая заделка.

Статистика КЭМ:

- количество узлов 29033;
- количество элементов 13625.

Модальный анализ АИП проводился на КЭМ, показанной на рисунке 23. Для расчета использовался пакет ANSYS. В таблице 7 представлены результаты расчета на поиск резонансных частот.

Таблица 7 – Результаты расчета на поиск резонансных частот и эффективных масс по трем осям

Мод. №	Частота, Гц	Эффективная масса, %					
		<i>OX</i>	<i>ROT OX</i>	<i>OY</i>	<i>ROT OY</i>	<i>OZ</i>	<i>ROT OZ</i>
1	560,7	0,000049	0,010328	0,000000	0,000000	0,010328	0,000057
2	926,0	0,000000	0,003996	0,000049	0,000087	0,003996	0,000001
3	1283,6	0,000000	0,000004	0,000000	0,009870	0,000004	0,003048
Сумма:		0,000049	0,014328	0,000049	0,009957	0,014328	0,003106

На рисунке 24 показаны формы с наибольшими эффективными массами.

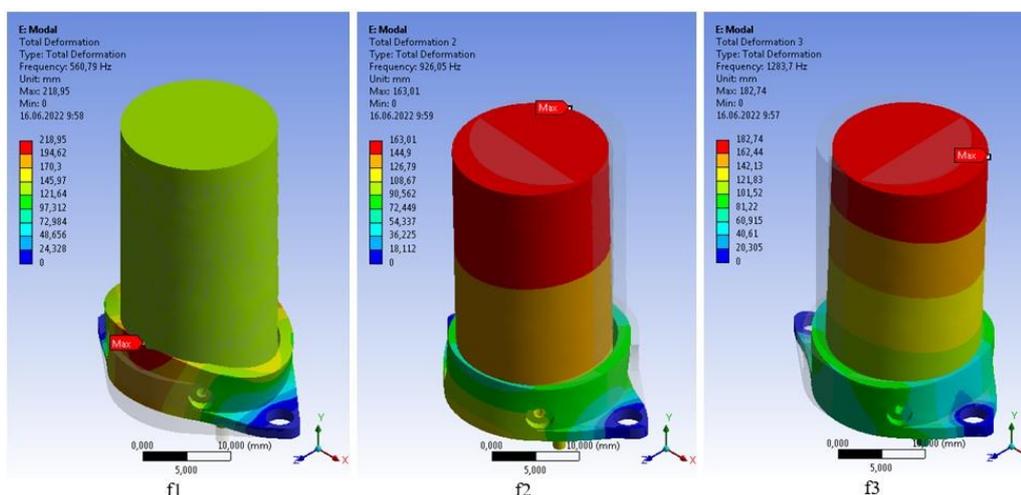


Рисунок 24 – Формы: $f_1=560$ Гц; $f_2=926$ Гц; $f_3=1283$ Гц.

2.4.1 Расчет на воздействие квазистатических нагрузок

Реакция конструкции АИП на воздействие квазистатических нагрузок определялись в САЕ пакете. Требования по данному воздействию заданы в таблице 2. К узлам модели по соответствующим осям прикладывалось линейное ускорение $12 g$.

Максимальное перемещение ($0,02$ мм) при воздействии по оси OZ представлены на рисунке 25.

Минимальный запас прочности по пределу текучести ($\eta_T > 20,9$) имеют винты при воздействии нагрузки по оси OZ . У остальных элементов $\eta_T > 10$ представленных на рисунке 26.

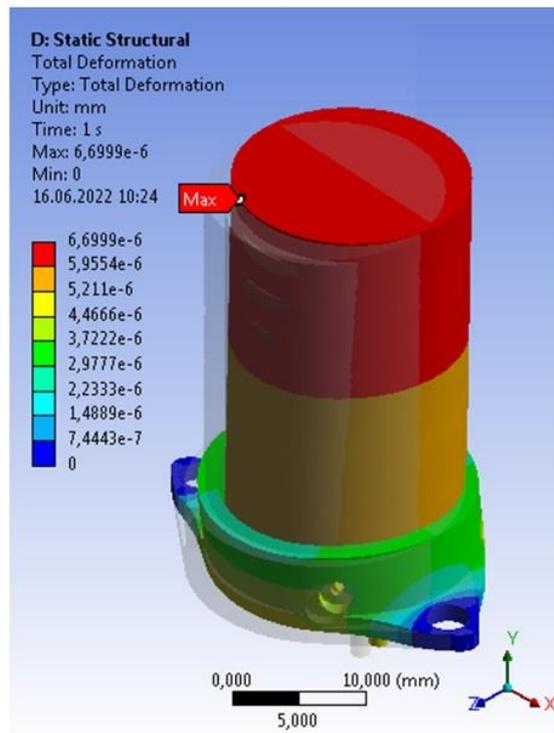


Рисунок 25 – Максимальное перемещение при воздействии статической нагрузки по оси OZ

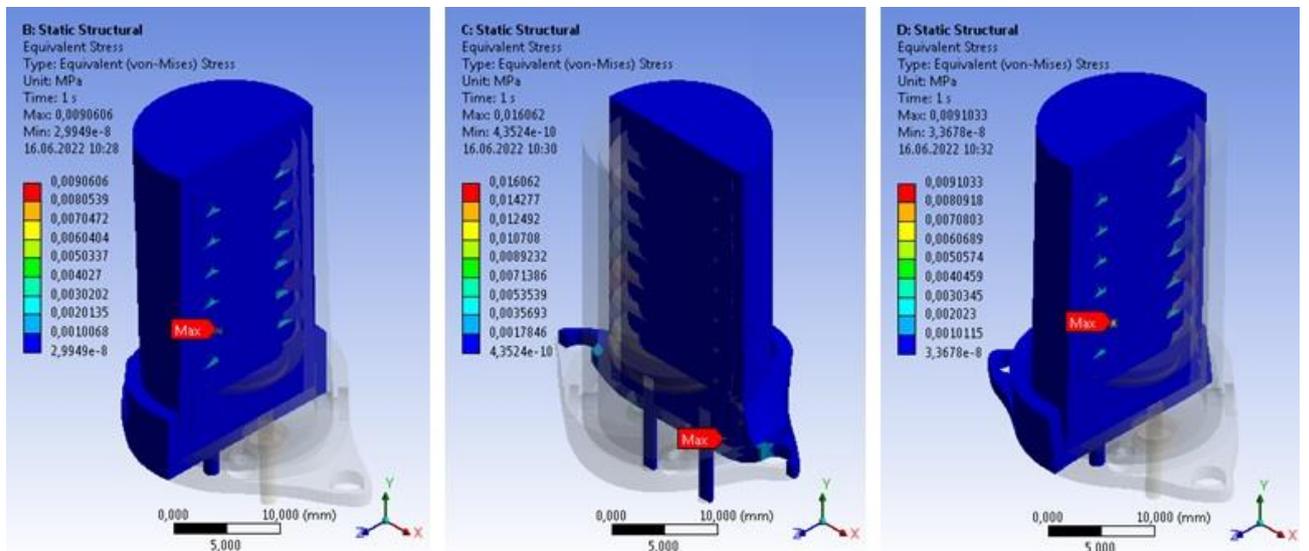


Рисунок 26 – Максимальные напряжения, возникающие при воздействии статической, нагрузки по осям OX , OY , OZ

Максимальное напряжения и соответствующие им запасы прочности представлены в таблице 8.

Таблица 8 – Максимальные напряжения и соответствующие им запасы прочности конструкции АИП при воздействии квазистатических нагрузок

Материал	Предел текучести (σ_T) Предел прочности (σ_B), МПа	Направление воздействия					
		OX		OY		OZ	
		Max. напряжение (σ_{MAX}), МПа	Запас прочности (η)	Max. напряжение (σ_{MAX}), МПа	Запас прочности (η)	Max. напряжение (σ_{MAX}), МПа	Запас прочности (η)
Сталь 12X18H10T	200 (σ_T)	0,00927	>10	0,00309	>10	0,00103	>10
Сталь 29НК	490 (σ_B)	0,001854		0,002575		0,001442	
Стекло	500 (σ_B)	0,00309		0,01648		0,00515	
Виксинт ПК-68	18 (σ_B)	0,00309		0,00206		0,00927	
Алюминий АМг6Б	155 (σ_T)	0,002575		0,000103		0,00309	

2.4.2 Расчет на воздействие синусоидальных вибраций

Реакция конструкции АИП на воздействие синусоидальных вибраций определялись в САЕ пакете. Требования по данному воздействию заданы в таблице 3. К узлам модели по соответствующим осям прикладывалось линейное ускорение 12 g.

Максимальное перемещение (1173,08 мм) при воздействии по оси OZ представлены на рисунке 27.

Минимальный запас прочности по пределу текучести ($\eta_T > 21,56$) имеют винты при воздействии нагрузки по оси OZ. У остальных элементов $\eta_T > 10$ представленных на рисунке 28.

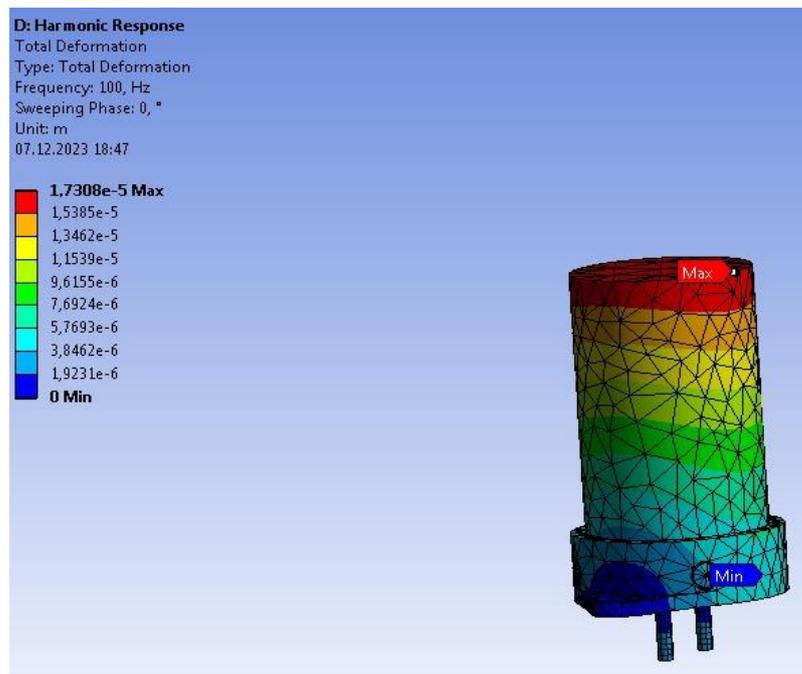


Рисунок 27 – Максимальные перемещения при воздействии синусоидальной вибрации по оси OZ

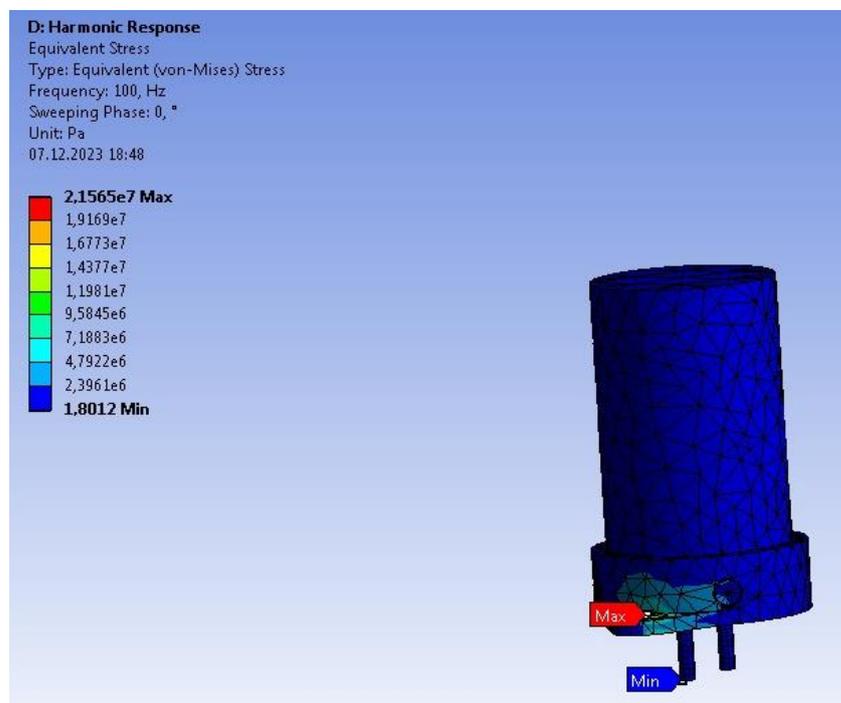


Рисунок 28 – Максимальные напряжения, возникающие при воздействии синусоидальной вибрации по осям OZ

В таблице 9 приведены максимальные значения запаса прочности и максимальные перемещения для рассмотренных расчетных случаев.

Таблица 9 – Максимальные напряжения и соответствующие им запасы прочности конструкции АИП при воздействии синусоидальных вибраций

Материал	Предел текучести (σ_T) Предел прочности (σ_B), МПа	Направление воздействия	
		<i>OZ</i>	
		Мак. напряжение (σ_{MAX}), МПа	Запас прочности, (η)
Сталь 12X18H10T	200 (σ_T)	0,00103	>10
Сталь 29НК	490 (σ_B)	0,001442	
Стекло	500 (σ_B)	0,00515	
Виксинт ПК-68	18 (σ_B)	0,00927	
Алюминий АМг6Б	155 (σ_T)	0,00309	

2.4.3 Расчет на воздействие широкополосной случайной вибрации

Реакция на воздействие широкополосной случайной вибрации (далее по тексту – ШСВ) проводилась в САЕ пакете. Требования по данному воздействию заданы в таблице 3.

Максимальное перемещение (1,3 мм) при воздействии по оси *OZ* представлен на рисунке 29.

Максимальное напряжения и соответствующие им запасы прочности представлены в таблице 10. Распределение напряжений при воздействии нагрузок по оси *OZ* представлены на рисунке 30.

Таблица 10 – Максимальные напряжения и соответствующие им запасы прочности конструкции АИП при воздействии ШСВ

Материал	Предел текучести (σ_T)	Предел прочности (σ_B), МПа	Направление воздействия					
			OX		OY		OZ	
			Max. напряжение (σ_{MAX}), МПа	Запас прочности (η)	Max. напряжение (σ_{MAX}), МПа	Запас прочности (η)	Max. напряжение (σ_{MAX}), МПа	Запас прочности (η)
Сталь 12X18H10T	200 (σ_T)		16,5	12,12	74,5	2,68	48,5	4,12
Сталь 29НК	490 (σ_B)		67,7	7,24	71,2	6,88	54,7	8,96
Стекло	500 (σ_B)		96,7	5,17	385,5	1,30	156,7	3,19
Виксинт ПК-68	18 (σ_B)		255,1	0,07	76,4	0,24	193,9	0,09
Алюминий АМГ6Б	155 (σ_T)		86,1	1,80	2,9	53,45	107,5	1,44

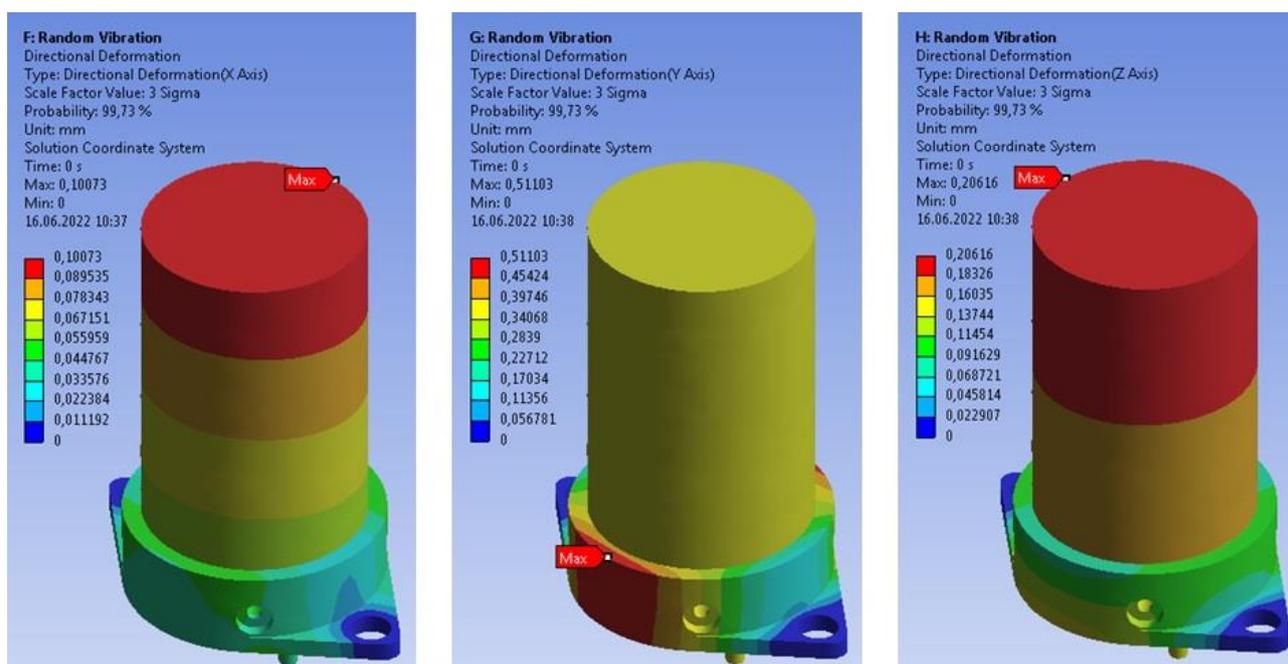


Рисунок 29 – Максимальное перемещение при воздействии ШСВ по осям OX, OY, OZ

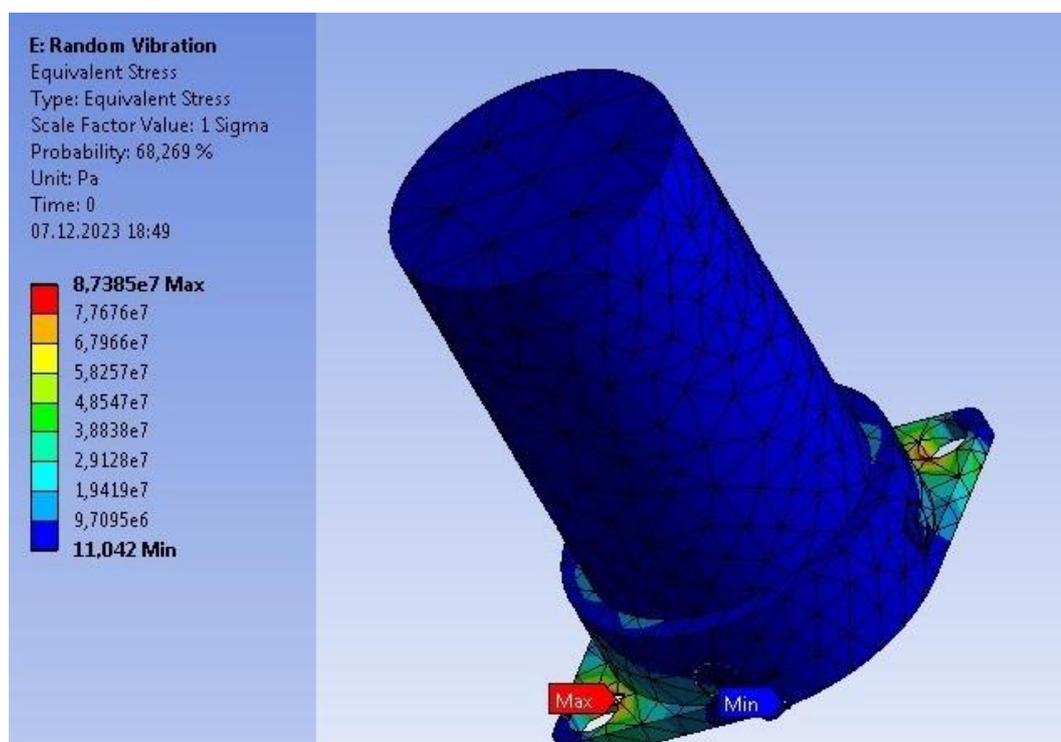


Рисунок 30 – Максимальные напряжения, возникающие при воздействии широкополосной-случайной вибрации по осям *OZ*

2.4.4 Расчет на воздействие ударных нагрузок

Реакция на воздействие ударных нагрузок проводилась в *CAE* пакете. Требования по данному воздействию заданы в таблице 3.

Максимальное перемещение (2,4 мм) при воздействии по оси *OZ* представлен на рисунке 31.

Максимальные напряжения и соответствующие им запасы прочности представлены в таблице 11. Распределение напряжений при воздействии нагрузок по оси *OZ* представлены на рисунках 32.

Таблица 11 – Максимальные напряжения и соответствующие им запасы прочности конструкции образца при ударных нагрузках

Материал	Предел текучести (σ_T) Предел прочности (σ_B), МПа	Направление воздействия					
		OX		OY		OZ	
		Мах. напряжение (σ_{MAX}), МПа	Запас прочности (η)	Мах. напряжение (σ_{MAX}), МПа	Запас прочности (η)	Мах. напряжение (σ_{MAX}), МПа	Запас прочности (η)
Сталь 12X18H10T	200 (σ_T)	0,1	>10	0,16	>10	0,16	>10
Сталь 29НК	490 (σ_B)	0,07		0,11		0,16	
Стекло	500 (σ_B)	0,2		0,8		0,5	
Виксинт ПК-68	18 (σ_B)	0,25		0,13		1,06	
Алюминий АМг6Б	155 (σ_T)	0,35		0,0055		0,3	

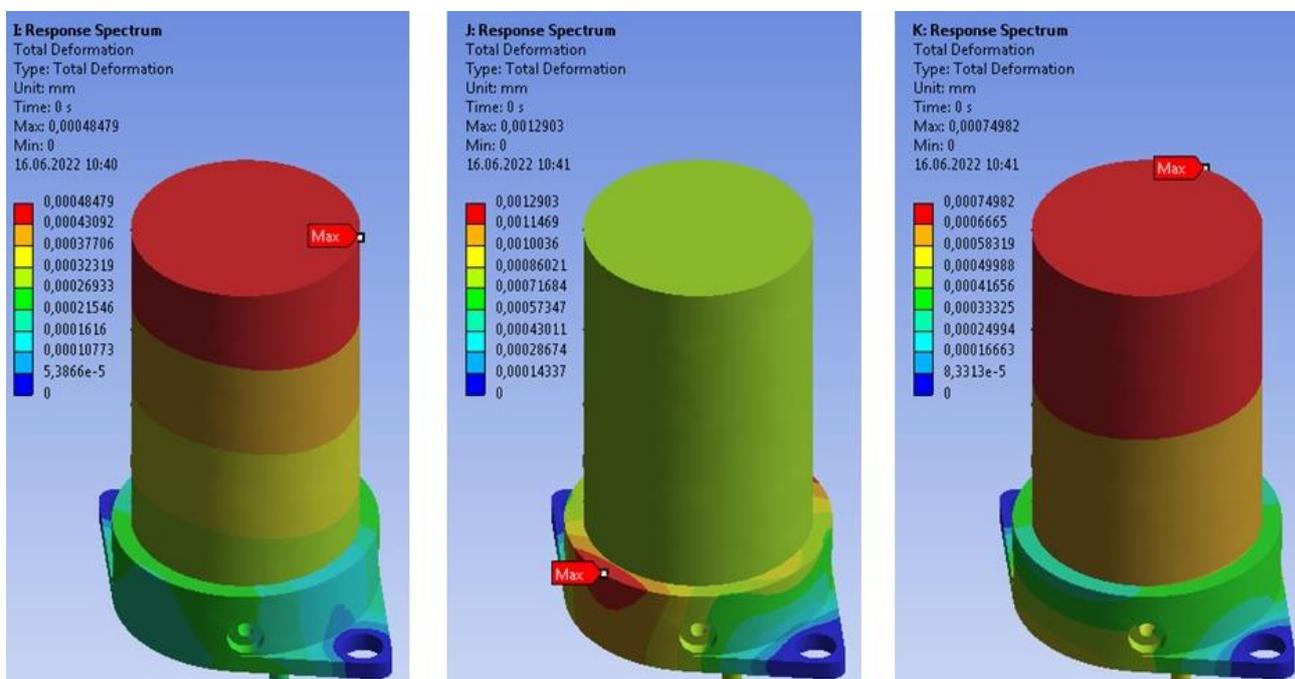


Рисунок 31 – Максимальное перемещение при воздействии ударных нагрузок по осям OX, OY, OZ

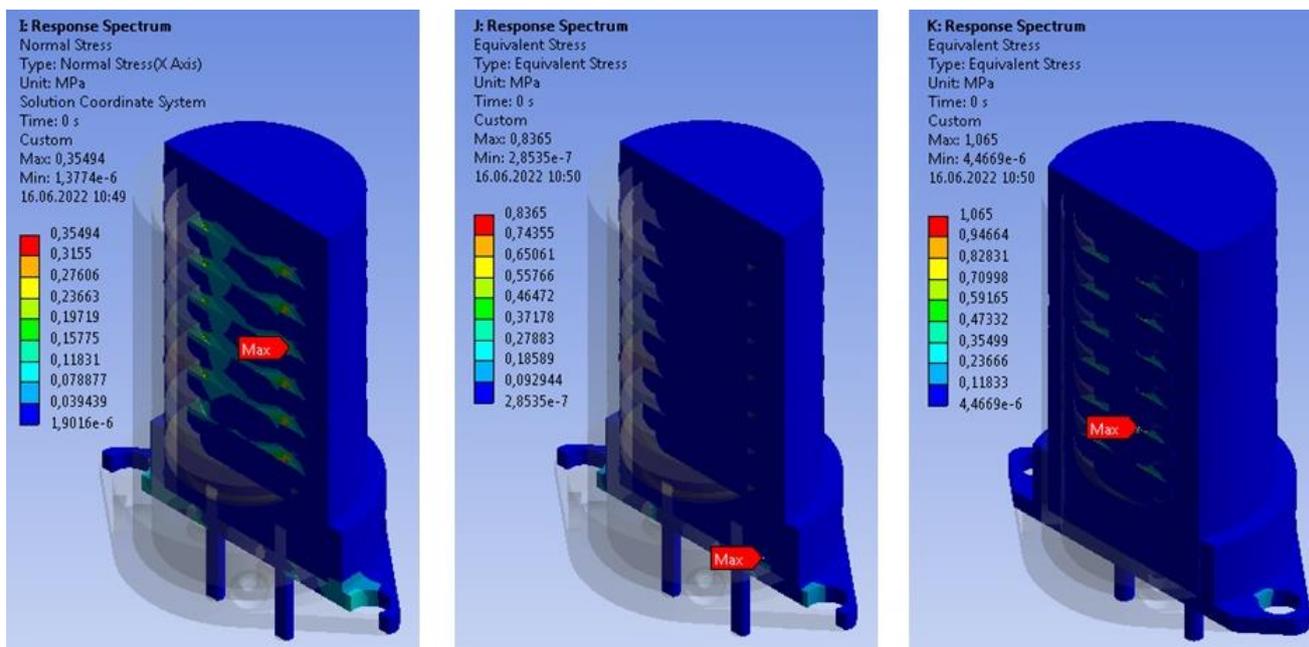


Рисунок 32 – Максимальное напряжение возникающие при воздействии ударных нагрузок по осям OX , OY , OZ

2.4.5 Анализ результатов расчета

В таблице 12 приведены минимальные значения запаса безопасности и максимальные перемещения для рассмотренных расчетных случаев.

Таблица 12 – Значения запасов безопасности и перемещений для расчетных случаев

Вид воздействий	Материал	Запас прочности (min), η	Перемещение (max), мм
Статическая нагрузка (синусоидальная нагрузка)	Сталь 12X18H10T	>10	0,0002
	Сталь 29HK		
	Стекло		
	Виксинт ПК-68		
	Алюминий АМг6Б		
Широкополосная случайная вибрация (ШСВ)	Сталь 12X18H10T	2,68	0,5
	Сталь 29HK	6,88	
	Стекло	1,30	
	Виксинт ПК-68	0,07	
	Алюминий АМг6Б	1,44	
Ударные нагрузки	Сталь 12X18H10T	>10	0,001

Продолжение таблицы 12

	Сталь 29НК		
	Стекло		
	Виксинт ПК-68		
	Алюминий АМг6Б		

Из приведенных расчетов видно, что наиболее критичными случаями нагружения является ШСВ. Запас прочности виксинта $\eta < 1$ объясняется не совершенством геометрической модели и образованием концентратора напряжения (острый угол), как показано на рисунке 33.

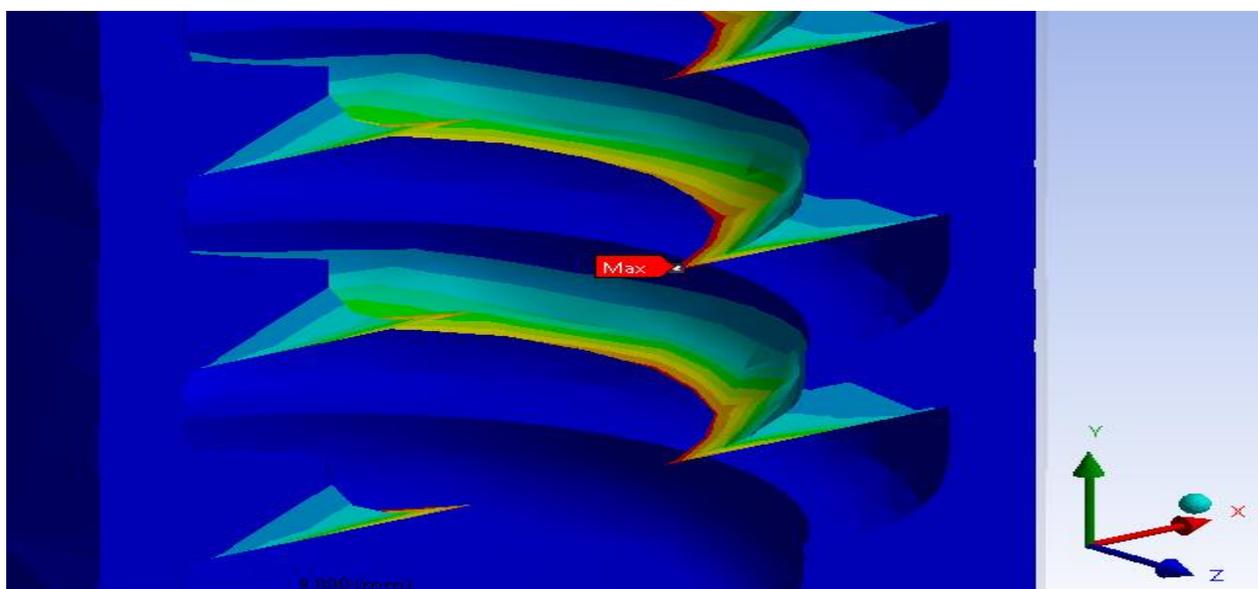


Рисунок 33 – Внешний вид концентратора напряжения геометрической модели виксинта

3 Механические испытания и сравнения результатов

3.1 Виды испытаний

1 Конструкторско-доводочные испытания. Это те виды испытаний (механические – вибрация, удары, линейные ускорения, тепловые – воздействие отрицательных температур, положительных температур, термоциклирование – от максимальной отрицательной температуры до максимальной положительной), при проведении которых подтверждается правильность выбранного конструктивного решения.

2 Отработочные испытания (лабораторные отработочные испытания – ЛОИ, совместные отработочные испытания – СОИ). При проведении данных видов испытаний подтверждается правильность выбранного схемотехнического решения на уровне отдельных устройств, входящих в блок (ЛОИ), и правильность выбранного схемотехнического решения на уровне блока (СОИ).

3 Приемосдаточные испытания (ПСИ).

При проведении данного вида испытаний происходит подтверждение соответствия изготовленных блоков и устройств ТУ на эти блоки и устройства. Как правило, в состав этого вида испытаний входят:

- вибрационные испытания с перегрузками и временем воздействия 0,5 от требований ТЗ;
- термовакуумные испытания, при которых проверяется работоспособность блоков при воздействии вакуума до 10 – 6 мм рт. ст. и воздействии температур (положительных и отрицательных).

4 Предварительные испытания (ПИ). При проведении данного вида испытаний происходит подтверждение соответствия приборов требованиям ТЗ по внешним воздействующим факторам (ВВФ) и ГОСТам. В состав данного вида испытаний входят [10]:

- испытания на вибрацию (прочность, устойчивость) при выведении РН в космос;
- испытания на воздействие ударов или виброударов (прочность, устойчивость) при срабатывании пиропатронов, при разделении ступеней РН, обтекателя и самого КА;
- испытания на воздействия линейных ускорений (прочность, устойчивость) при выведении РН в космос и коррекция выведения КА;
- термовакуумные испытания на воздействие космического пространства (разряжение до 10^{-6} мм рт. ст. и воздействие различных по знаку температур от $+125^{\circ}\text{C}$ до -125°C);
- испытания на надежность;
- испытания на ресурс (ускоренный ресурс);
- испытания на радиационную стойкость;
- испытания на электромагнитную совместимость;
- испытания на воздействие электростатического разряда (ЭСР);
- испытания на транспортирование;
- испытания на потерю массы изделия.

3.2 Испытательное оборудование

Приведенный выше перечень испытаний проводится с использованием аппаратуры различного вида и назначения. Далее показаны общий вид и укрупненные характеристики части специализированного испытательного оборудования, которое используется в данной диссертационной работе, рисунки 34, 35.

Вибрационный стенд серии ВЭДС-1500 представлен на рисунке 34. Предназначен для проведения испытаний однокомпонентной гармонической вибрации, широкополосной-случайной вибрации, на ударную вибропрочность и т.п. и могут эксплуатироваться в лабораторных и производственных условиях в

различных отраслях промышленности. Тяговое усилие $P = 1500$ кг., диапазон частот от 5 до 2500 Гц.



Рисунок 34 – Вибрационный стенд ВЭДС-1500

Ударный стенд P55L представлен на рисунке 35. На данном ударном стенде можно задавать ударные перегрузки в 1000 g (дополнительная конфигурация может увеличивать перегрузку до 5000 g).



Рисунок 35 – Ударный стенд P55L

3.3 Методика проведения испытания технологической оснастки

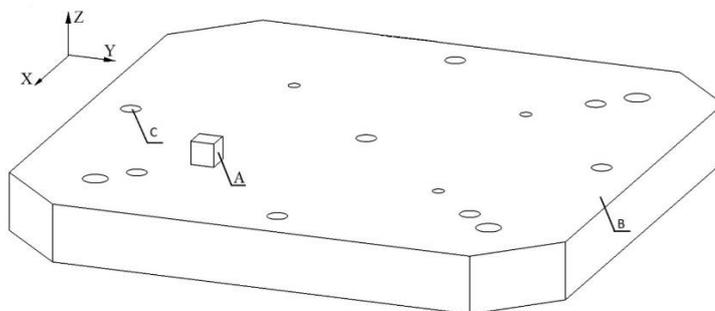
Перед вводом в эксплуатацию оснастка должна пройти аттестацию для проведения испытаний, в ходе которой будет подтверждено, что оснастка не имеет отклонений по резонансным частотам, разбросу ускорения по точкам крепления изделия по отношению к точкам управления.

Испытания проводятся согласно протоколу проведения испытаний. Оценка изменений состояния технологической оснастки, при визуальном осмотре после каждого вида испытаний, проводятся на основании акта входного контроля.

Цель: подтвердить способность изделия сохранять свои параметры в пределах норм, установленных в технических условиях на изделия до (вовремя) и после механических воздействий.

3.3.1 Испытания на воздействие вибрационных нагрузок

Испытания проводятся последовательно по каждой из трёх взаимно перпендикулярных осей, показанных на рисунке 36.



A – задающий акселерометр (устанавливается на механическую оснастку);
B – технологическая оснастка; *C* – места крепления технологической оснастки к стенду.

Рисунок 36 – Схема установки

Места установки акселерометров на рисунке 36 показаны условно.

Ход проведения испытаний:

1 За одну установку проводить последовательно испытания по обнаружению резонансов конструкции до вибрации, на воздействие синусоидальной и случайной вибраций, по обнаружению резонансов конструкции после вибрации.

2 Акселерометры устанавливать согласно рисунку 36. Допускается изменять количество и местоположение акселерометров.

3 Испытание на воздействие вибрационных нагрузок по оси *OZ*.

4 Провести испытание по обнаружению резонансов конструкции на режимах:

- частота от 5 до 2000 Гц;
- ускорение не более $4,9 \text{ м/с}^2$ (0,5 g);

– скорость сканирования частоты не более 2 окт/мин.

5 Результаты поиска резонансов вывести на бумагу.

6 Провести испытание на воздействие синусоидальной вибрации на режимах, указанных в таблице 13.

Таблица 13 – Синусоидальная вибрация

Диапазон частот, Гц	Уровень	Время воздействия по оси, мин
5 – 10	± 10 мм	20, не менее
10 – 20	от ± 39,3 до ± 196,2 м/с ² (от ± 4 до ± 20 g)	
20 – 100	± 196,2 м/с ² (± 20 g)	
Примечание – Скорость сканирования не более 1 окт/мин в направлении от нижней границы частоты к верхней. Изменение ускорения от частоты в каждом поддиапазоне частот по линейному закону.		

8 Провести испытание на воздействие случайной вибрации на режимах, указанных в таблице 14.

Таблица 14 – Случайная вибрация

Диапазон частот, Гц	Уровень	Время воздействия по оси, мин
20 – 50	+ 6 дБ/окт	6
50 – 1000	0,6 g ² /Гц	
1000 - 2000	- 6 дБ/окт	
Среднеквадратическое значение ускорения, м/с ² (g)		304,1 (31)
Примечание – Изменение спектральной плотности ускорения в каждом диапазоне частот линейное при логарифмическом масштабе по частоте и спектральной плотности.		

7 Повторить пункт 5.

8 Провести сравнение резонансных частот до и после воздействий. Они не должны отличаться более чем на 10 %.

9 Снять технологическую оснастку с вибростенда.

10 Испытание на воздействие вибрационных нагрузок по оси ОХ.

- 11 Выполнить п.п. 5–10.
- 12 Испытание на воздействие вибрационных нагрузок по оси *OY*.
- 13 Выполнить п.п. 5–10.
- 14 Провести внешний осмотр технологической оснастки.

3.3.2 Испытание на прочность при транспортировании в составе изделия и в упаковке

Испытания проводить последовательно по каждой из трёх взаимно перпендикулярных осей, показанных на рисунке 36.

Таблица 15 – Режимы испытаний при транспортировании в составе изделия

Ускорение, м/с ² (g)	Длительность ударного импульса, м/с	Количество ударов суммарно по трем направлениям	Число ударов в минуту
49 (5)	2–10	110000	80–120

Таблица 16 – Режимы испытаний при транспортировании в упаковке

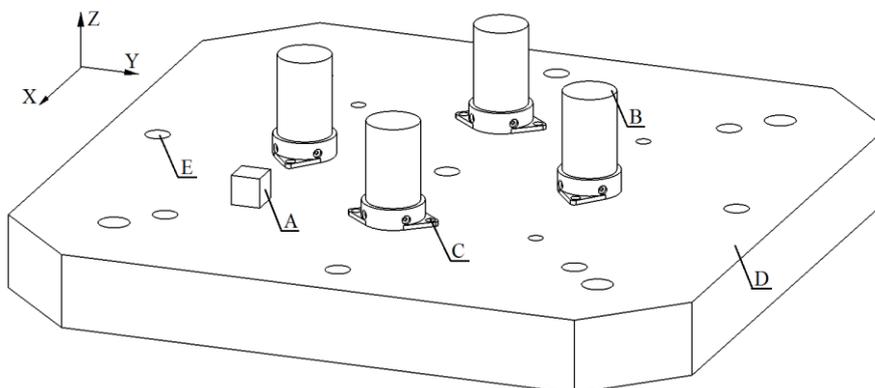
Направление возбуждения	Ускорение, м/с ² (g)	Длительность ударного импульса, мс	Количество ударов	Число ударов в минуту
Z-Z	147 (15)	5 - 10	2000	80 - 120
	98 (10)		8800	
Y-Y	118 (12)	2 - 15	200	80 - 120
X-X			200	

Режимы испытаний представлены в таблицах 15-16.

После проведения испытаний на прочность при транспортировании в составе изделия и в упаковке проведен внешний осмотр, результаты всех видов проверок соответствуют требованиям КД, механических повреждений нет.

3.4 Методика проведения испытаний автономных источников питания совместно с технологической оснасткой

Испытания должны проводиться одновременно на четырех образцах последовательно по каждой из трех взаимно перпендикулярных осей в соответствии с рисунком 35.



A – задающий акселерометр (устанавливается на механическом приспособлении); *B* – плоскость установки контрольного акселерометра; *C* – места крепления (2 точки) образцов к технологической оснастке; *D* – технологическая оснастка; *E* – места крепления механической оснастки к стенду.

Рисунок 37 – Схема установки образцов на технологическую оснастку

Места установки акселерометров на рисунке 37 показаны условно.

3.4.1 Испытания на воздействие вибрационных нагрузок совместно с технологической оснасткой

Испытания проводятся согласно методики испытаний. Обнаружение резонансов конструкции проводятся на следующих режимах:

- частота от 5 до 2000 Гц;
- ускорение не более $4,9 \text{ м/с}^2$ ($0,5 \text{ g}$);

– скорость сканирования частоты не более 2 окт/мин.

Ход проведения испытаний:

За одну установку проводится последовательно испытание по обнаружению резонансов конструкции до вибрации, на воздействие синусоидальной и случайной вибраций, по обнаружению резонансов конструкции после вибрации.

1 Акселерометры установить согласно рисунку 37. Допускается изменять количество и местоположение акселерометров.

2 Испытание на воздействие вибрационных нагрузок по оси OZ

3 Установить технологическую оснастку на вибростенд и закрепить.

4 Установить АИП на технологическую оснастку и жестко закрепить, используя посадочные отверстия прибора.

5 Провести испытание по обнаружению резонансов конструкции на режимах, указанных выше.

6 Результаты поиска резонансов вывести на бумагу.

АИП выдержал испытания, если в диапазоне частот от 5 до 150 Гц не обнаружено резонанса.

Испытание провести на воздействие синусоидальной вибрации на режимах, указанных в таблице 17.

Таблица 17 – Синусоидальная вибрация

Диапазон частот, Гц	Уровень	Время воздействия по оси, мин
5 – 10	± 10 мм	20, не менее
10 – 20	от $\pm 39,3$ до $\pm 196,2$ м/с ²	
	(от ± 4 до ± 20 g)	

Окончание таблицы 17

20 - 100	$\pm 196,2 \text{ м/с}^2 (\pm 20 \text{ g})$	
<p>Примечание – Скорость сканирования не более 1 окт/мин в направлении от нижней границы частоты к верхней. Изменение ускорения от частоты в каждом поддиапазоне частот по линейному закону.</p>		

Испытание провести на воздействие случайной вибрации на режимах, указанных в таблице 18.

Таблица 18 – Случайная вибрация

Диапазон частот, Гц	Уровень	Время воздействия по оси, мин
20 – 50	+ 6 дБ/окт	6
50 – 1000	0,6 $\text{g}^2/\text{Гц}$	
1000 - 2000	- 6 дБ/окт	
Среднеквадратическое значение ускорения, м/с^2 (g)		304,1 (31)
<p>Примечание – Изменение спектральной плотности ускорения в каждом диапазоне частот линейное при логарифмическом масштабе по частоте и спектральной плотности.</p>		

Провести сравнение резонансных частот до и после воздействий. Они не должны отличаться более чем на 10 %. В случае превышения разницы резонансов более 10 % заключение о дальнейших испытаниях дают заказчики.

- 7 Снять АИП с технологического приспособления (при необходимости).
- 8 Снять технологическое приспособление с вибростенда.
- 9 Провести внешний осмотр АИП.

Провести аналогичные испытание на воздействие вибрационных нагрузок по оси ОХ и ОУ.

На рисунках 38-40 представлены результаты сравнения (разница<10%) собственных частот до и после вибрационных воздействий.

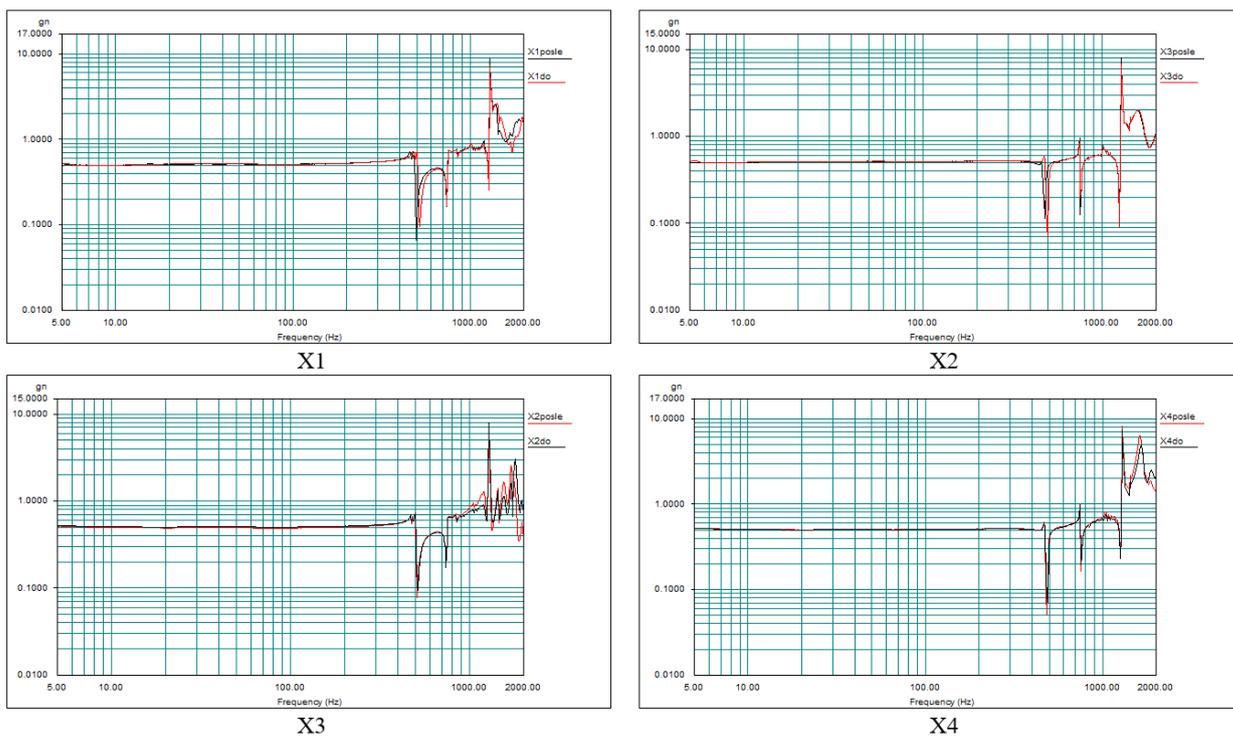


Рисунок 38 - Результаты сравнения резонансных частот образцов до и после вибрационных воздействий по оси OX

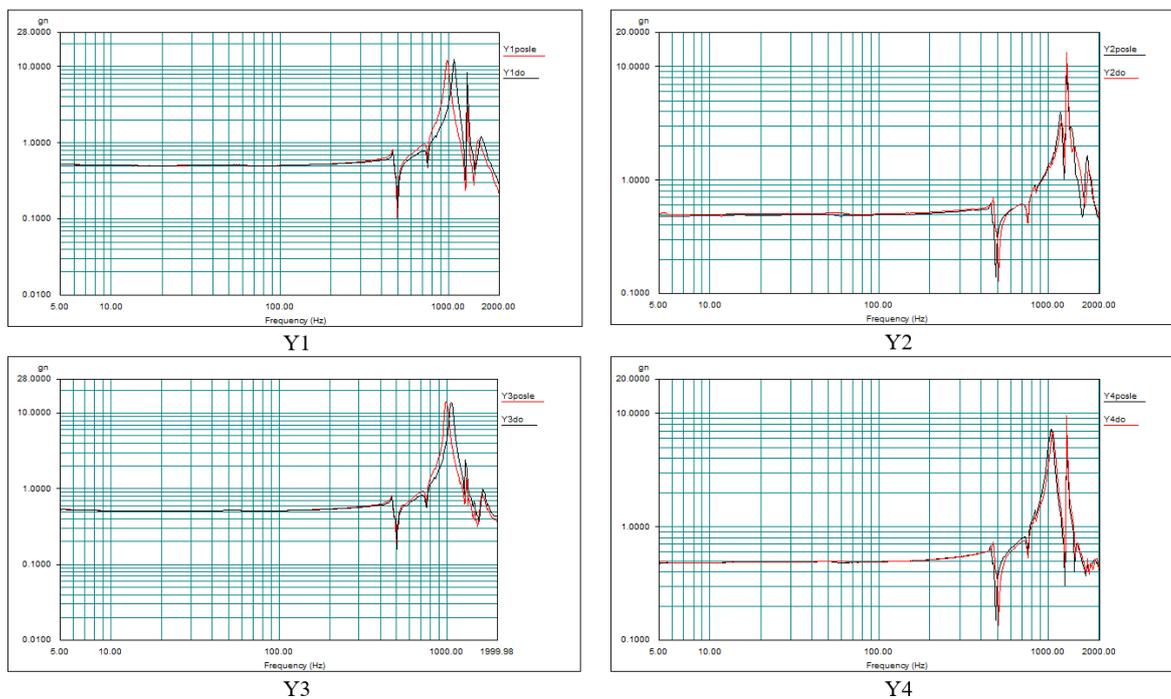


Рисунок 39 – Результаты сравнения резонансных частот образцов до и после вибрационных воздействий по оси OY

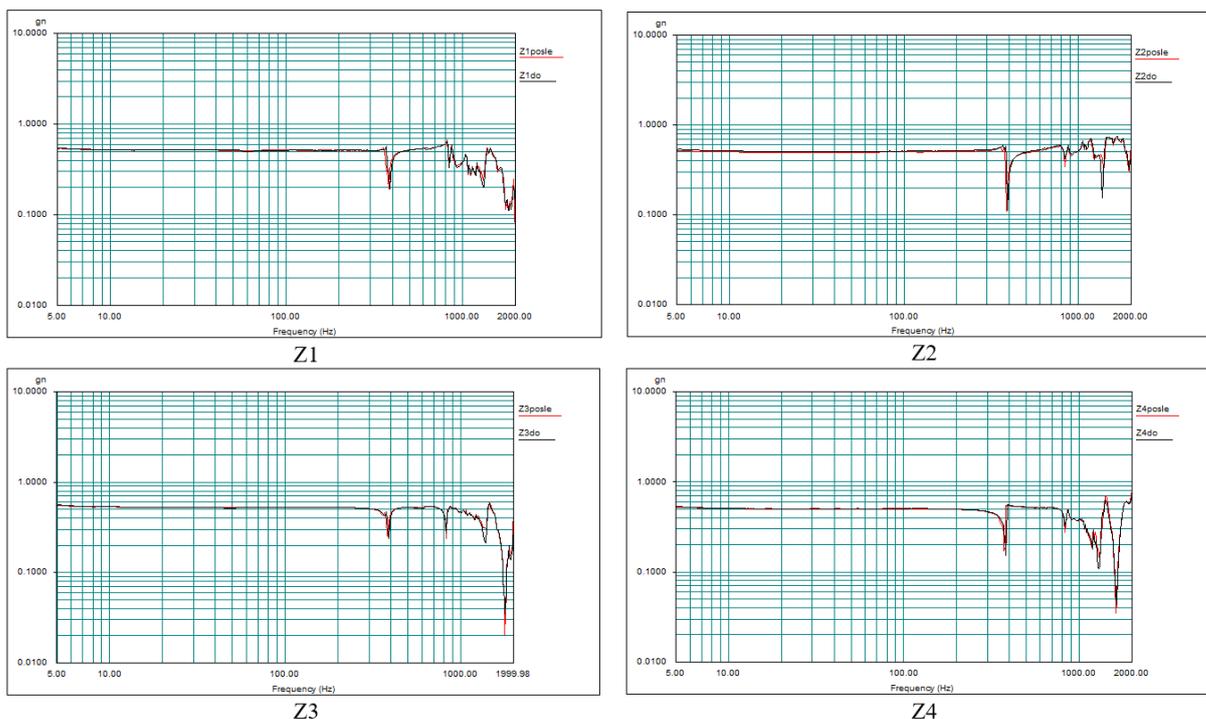


Рисунок 40 – Результаты сравнения резонансных частот образцов до и после вибрационных воздействий по оси *OZ*

Критерием целостности конструкции образцов является разница резонансных частот до и после вибрации не более чем на 10%. Резонансных частот конструкции в диапазоне от 5 до 150 Гц не обнаружено. Полученные параметры удовлетворяют требованиям.

Испытание на воздействие синусоидальной и случайной вибраций проводились на режимах, представленных в таблице 19. После проведения испытаний проведен внешний осмотр, результаты всех видов проверок соответствуют требованиям, механических повреждений нет.

Таблица 19 – Вибрационные нагрузки

Вид вибрационного воздействия	Частота, Гц	Амплитуда
Синусоидальная вибрация	5–10 10–20 20–100	±10 мм от 4 до 20 g 20 g

Окончание таблицы 19

Случайная вибрация	20–50 50–1000 1000–2000	+6 дБ/окт 0,6 g ² /Гц -6 дБ/окт
Среднеквадратичное значение, g	31	

3.4.2 Испытание на прочность при транспортировании в составе изделия и в упаковке

Испытание на прочность при транспортировании проводить последовательно по каждой из трёх взаимно перпендикулярных осей рисунок 1.

- 1 Установить АИП на технологическое приспособление и жестко закрепить, используя посадочные отверстия прибора.
- 2 Установить технологическое приспособление на ударный стенд по оси OZ и закрепить.
- 3 Провести испытание на прочность к воздействию механических факторов, свойственных условиям транспортирования в составе изделия согласно таблице 20.

Таблица 20 – Режимы испытаний при транспортировании в составе изделия

Ускорение, м/с ² (g)	Длительность ударного импульса, мс	Количество ударов суммарно по трем направлениям	Число ударов в минуту
49 (5)	2 - 10	110000	80 - 120

- 4 Снять технологическое приспособление с ударного стенда.
- 5 Установить технологическое приспособление на ударный стенд по оси OX и закрепить.
- 6 Повторить пункты 3-4.
- 7 Установить технологическое приспособление на ударный стенд по оси OY и закрепить.
- 8 Повторить пункты 3-4.

- 9 Провести внешний осмотр АИП.
- 10 Упаковать АИП в штатную упаковку.
- 11 Провести испытание на прочность при транспортировании в упаковке согласно таблице 21.
- 12 Распаковать АИП.
- 13 Провести внешний осмотр.

Таблица 21 – Режимы испытаний при транспортировании в упаковке

Направление возбуждения	Ускорение, м/с ² (g)	Длительность ударного импульса, мс	Количество ударов	Число ударов в минуту
Z-Z	147 (15)	5 - 10	2000	80 - 120
	98 (10)		8800	
Y-Y	118 (12)	2 - 15	200	80 - 120
X-X			200	

3.4.3 Испытания на воздействия ударных нагрузок

Испытания проводились последовательно по двум взаимно противоположным направлениям каждой из трех взаимно перпендикулярных осей (всего 18 ударов, по оси *OZ* – удвоенное количество ударов (6 ударов) в одном направлении).

Таблица 1 – Ударные нагрузки

Ускорение, м/с ² (g)	Длительность импульса, мс	Количество ударов по каждому направлению оси
±17000 (±1750)	0,2 – 0,3	3

После проведения испытаний на воздействие ударных нагрузок проведен внешний осмотр, результаты всех видов проверок соответствуют требованиям КД, механических повреждений нет.

3.5 Результаты проведения механических испытаний

По данной методики была испытана готовая конструкция технологической оснастки совместно с образцами автономного источника питания, представленные на рисунке 41.

В ходе испытания мы получили графики влияния резонансных частот на конструкцию, представленные на рисунках 38-40.

Успешно проведены механические испытания на следующие виды нагрузок:

- синусоидальная вибрация;
- широкополосная случайная вибрацию;
- удары многократные (транспортирование в составе изделия и в упаковке, представленные на рисунках 42, 43).

Определены значения резонансных частот и их формы. Требование об отсутствии собственных форм-частот образцов 150 Гц выполнено, первая собственная частота f_1 - 560 Гц.

Проведен анализ на:

- воздействие статических и синусоидальных нагрузок;
- воздействие широкополосной случайной вибрации;
- воздействие ударных нагрузок, подтверждена возможность транспортирования.

Минимальные запасы безопасности силовой конструкции образцов по всем случаям нагружения $\eta \geq 1$, что удовлетворяет критериям п. 1.4.

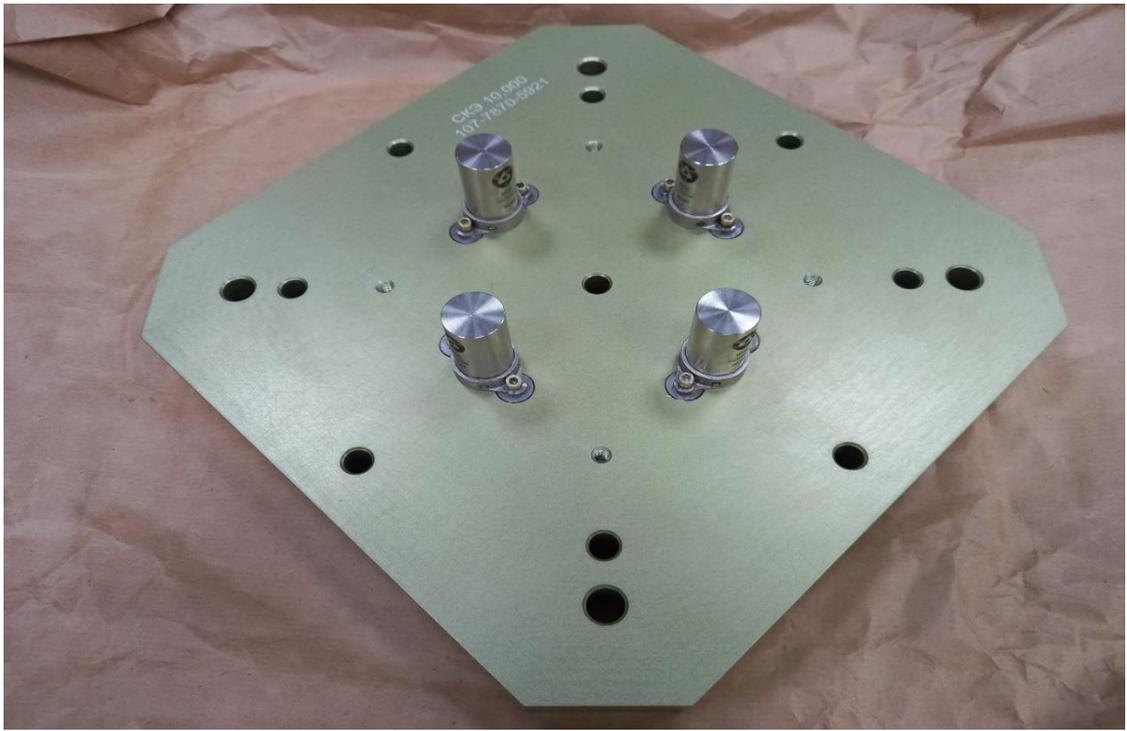


Рисунок 41 – АИП в составе с технологической оснасткой



Рисунок 42 – АИП в составе с технологической оснасткой



Рисунок 43 – АИП в транспортировочной упаковке

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В магистерской диссертации, были рассмотрены основные понятия технологических оснасток, оборудования для проведения испытаний, изучены параметры различных вибрационных процессов и механических испытаний.

Был сделан широкий обзор конструкций автономных источников питания, приведены реальные образцы АИП, а также был представлен реальный АИП изготовленный по нуждам компании РОСАТОМ и испытан в АО «РЕШЕТНЁВ».

Разработанные материалы полностью подтверждают выполнение требований и позволяют использовать полученные результаты в дальнейших работах.

Наличие изготовленной оснастки и методики, отработанный в ходе испытаний, позволяют оперативно проводить циклы механических испытаний АИП с активным веществом.

Были описаны методики и поставлены эксперименты на:

- испытания воздействий синусоидальных нагрузок
- испытания воздействий вибрационных нагрузок;
- испытание на воздействие ударных нагрузок.
- испытания на прочность при транспортировании;
- испытание на прочность при транспортировании в упаковке;

В ходе магистерской диссертации мы получили положительные результаты анализов и исследований образцов АИП, подтвердили эффективность конструкции технологической оснастки с помощью проделанных конструкторских и испытательных работ.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

АИП	– автономный источник питания;
АО	– акционерное общество;
КА	– космический аппарат;
КД	– конструкторская документация;
КПД	– коэффициент полезного действия;
КЭМ	– конечно-элементная модель;
РИТЭГ	– радиоизотопный термоэлектрический генератор;
ТЗ	– техническое задание;
ТО	– технологическая оснастка;
ТУ	– технические условия;
ШСВ	– широкополосная-случайная вибрация;
ЭРИ	– электро-радио изделие.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

Атомные батарейки // Новые горизонты для медицины, геологии и космических технологий : официальный сайт. – 2023. – URL: <https://sdelanounas.ru/blogs> (дата обращения 20.01.2023).

Атомная батарейка : – 2023. – URL: https://translated.turbopages.org/proxy_u/en-ru.ru.8f5030fc-63c3ae29-dce91512-74722d776562/https/en.wikipedia.org/wiki/Tritium_battery#Non-thermal_conversion (дата обращения 20.01.2023)

Бритков, В.Н., Мартемьянов, В.М. Инженерия для освоения космоса: сборник научных трудов IV Всероссийского молодежного Форума с международным участием / В.Н. Бритков, В.М. Мартемьянов // Томский политехнический университет. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2016. – 327с. – URL: <https://portal.tpu.ru/files/conferences/tomskspa> (дата обращения 20.01.2023).

Кириллов, В.Ю., Слипаченко, А.А. Проектирование бортовой кабельной сети перспективного летательного аппарата / В.Ю. Кириллов, А.А. Слипаченко // Труды МАИ. – 2012. – № 59. – С. 20-27. – URL: <https://mai.ru> (дата обращения 20.01.2023).

Кузьмин, А.В., Чернин, И.М., Козинцов, Б.С. Расчеты деталей машин: справ. пособие / А.В. Кузьмин, И.М. Чернин, Б.С. Козинцов; Мин-во Выш.шк. – Изд. 3-е. – Москва: Машиностроение, 1986. – 400 с.

Логинова, Ю.Ю. Актуальные проблемы авиации и космонавтики / Ю.Ю. Логинова // СибГУ им. М. Ф. Решетнева. – Красноярск. – 2024. – URL: <https://apak.sibsau.ru/page/materials> (дата обращения 18.04.2024).

Оснастка для виброиспытаний : – 2024. – URL: <https://sert-service.ru/osnastka-dlya-vibroispytaniy-gost/> (дата обращения 18.04.2024).

Оснастка для испытания : – 2024. – URL: <https://ir1.su/oborudovanie-dlya-ispytaniy/osnastka-dlya-ispytaniy/> (дата обращения 18.04.2024).

Проведение исследований основных параметров и характеристик, существующих образцов автономных источников питания : официальный сайт. – 2024. – URL: studbooks.net (дата обращения 18.04.2024).

Сыров, А.С. Проектирование и испытание бортовых систем управления: Учебное пособие / А.С. Сырова. – Москва : Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2011. – 344 с.

Родионов, А.О. Технологическое обеспечение эксплуатационных характеристик деталей с щелевыми каналами комбинированной обработкой: учебник / А.О. Родионов. – Воронеж : Академия, 2014. – 431 с.

Радиоизотопный термоэлектрический генератор : официальный сайт. – 2024. – URL: https://translated.turbopages.org/proxy_u/en-ru.ru.8f50 (дата обращения 18.04.2024).

Солнцев, Ю.П. Материаловедение: учебник для студ. учреждения сред. проф. образования / Ю.П. Солнцев. – Москва : Академия, 2017. – 496 с.

Технологии : официальный сайт. – 2024. – URL: widetronix.com (дата обращения 18.04.2024).

Тарасов, Г. Ф. Технологическая оснастка. Конструирование станочных приспособлений: учеб. -справ. пособие / Г. Ф. Тарасов; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. – Красноярск : 2016. – 196 с.

Терушкина, Н.П. Технологическая оснастка: учебное пособие / Н.П. Терушкина. – Саров : 2016.

Ушаков, Н.Н. Технология производства ЭВМ : официальный сайт. – 2024. – URL: <https://reallib.org/reader> (дата обращения 18.04.2024).

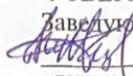
Ядерная батарейка : официальный сайт. – 2024. – URL: https://m.polit.ru/article/2018/04/24/ps_mipt/ (дата обращения 18.04.2024).

Министерство науки и высшего образования РФ
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

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

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой


подпись
« 21 » 06 2024 г.

А.В. Кузовников

инициалы, фамилия

« 21 » 06 2024 г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

«Разработка оснастки для механических испытаний автономного источника
питания на основе энергоемких радиоизотопов»

тема

15.04.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение
машиностроительных производств»

код и наименование направления

15.04.05.02 «Технологии производства космических аппаратов»

код и наименование магистерской программы

Руководитель

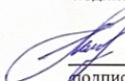

подпись, дата
21.06.24

доцент МБК ПФиКТ

канд. физ-мат. наук
должность, ученая степень

А.А. Хвалько
инициалы, фамилия

Выпускник

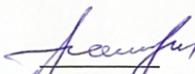

подпись, дата
21.06.24

ведущий инженер-
конструктор отдела 817

АО «РЕШЕТНЁВ»
должность, ученая степень

А.В. Поляковская
инициалы, фамилия

Рецензент


подпись, дата

профессор, МБК ПФиКТ
д-р техн. наук, доцент
должность, ученая степень

С.В. Агашкин
инициалы, фамилия

Нормоконтролер


подпись, дата
21.06.24

профессор, МБК ПФиКТ
д-р техн. наук, доцент
должность, ученая степень

В.Е. Чеботарев
инициалы, фамилия

Красноярск 2024

