


Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
АМУРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
(ФГБОУ ВО «АмГУ»)

Институт компьютерных и инженерных наук
Кафедра физики
Направление подготовки 03.04.01 – Прикладные математика и физика
Направленность (профиль) образовательной программы – Физика твердого тела

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ


Зав. кафедрой

 Е.В. Стукова
«14» 06 2024 г.

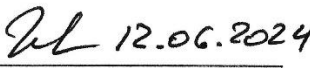
МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

на тему: Моделирование дефектных состояний и вибродиагностика имитаторов
транспортно-пусковых контейнеров спутников стандарта CubeSat

Исполнитель
студент группы 2112-ом

 12.06.2024 А.Е. Голых
(подпись, дата)

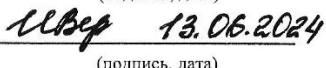
Руководитель
канд. физ.-мат. наук, доцент

 12.06.2024 Д.В. Фомин
(подпись, дата)

Руководитель магистер-
ской программы

 12.06.2024 Е.В. Стукова
(подпись, дата)

Нормоконтроль

 13.06.2024 И.В. Верхотурова
(подпись, дата)


Рецензент

 12.06.2024 С.В. Барышников
(подпись, дата)

Благовещенск 2024

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
АМУРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
(ФГБОУ ВО «АмГУ»)

Институт компьютерных и инженерных наук
Кафедра физики

УТВЕРЖДАЮ
Зав. кафедрой
 Е.В. Стукова
«15» 02 2024 г.

З А Д А Н И Е

К выпускной квалификационной работе студента Голых Артема Евгеньевича

1. Тема выпускной квалификационной работы: Моделирование дефектных состояний и вибродиагностика имитаторов транспортно-пусковых контейнеров спутников стандарта CubeSat
(утверждено приказом от 15.02.2024 № 413-уч)

2. Срок сдачи студентом законченной работы (проекта) 14.06.2024 г.

3. Исходные данные к выпускной квалификационной работе: справочная литература по спутникам стандарта CubeSat, статьи об использовании метода Фурье, Стандарты (ГОСТы) по проведению ВДИ, патенты на оснастку для проведения ВДИ

4. Содержание выпускной квалификационной работы (перечень подлежащих к разработке вопросов): изучение объекта исследования, оборудования, использующегося вместе с ним и методов вибродиагностики; разработка универсального имитатора транспортно-пускового контейнера и сопутствующего для него оборудования, для проведения вибродинамических испытаний малых космических аппаратов; проведение модельных испытаний разработанного имитатора транспортно-пускового контейнера с использованием метода конечных элементов; проведение натурных испытаний экспериментального образца имитатора транспортно-пускового контейнера на вибростенде; разработка универсальной программы для анализа данных, полученных в результате вибродинамических испытаний

5. Перечень материалов приложения (наличие чертежей, таблиц, графиков, схем, программных продуктов, иллюстративного материала и т.п.): фрагмент программного кода, свидетельства о регистрации интеллектуальной собственности

6. Консультанты по выпускной квалификационной работе (с указанием относящихся к ним разделов) нет

7. Дата выдачи задания 15.02.2024 г.

Руководитель выпускной квалификационной работы: Фомин Дмитрий Владимирович, канд. физ.-мат. наук, доцент

Задание принял к исполнению (дата): 15.02.2024 г.



(подпись студента)

РЕФЕРАТ

Магистерская работа содержит 79 с., 53 рисунка, 4 таблицы, 31 источник, 5 приложений

ТРАНСПОРТНО-ПУСКОВОЙ КОНТЕЙНЕР, ИМИТАТОР ТРАНСПОРТНО-ПУСКОВОГО КОНТЕЙНЕРА, ОСНАСТКА, МОДЕЛИРОВАНИЕ, МЕТОД БЫСТРОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ФУРЬЕ, ВИБРОДИНАМИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ, ЧАСТОТНЫЙ АНАЛИЗ

В работе представлены результаты модельных и натурных исследований спроектированного и изготовленного универсального имитатора транспортно-пускового контейнера для спутников стандарта CubeSat.

Целью работы являлось – моделирование дефектных состояний и вибродиагностика имитаторов транспортно-пусковых контейнеров спутников стандарта CubeSat.

В ходе выполнения работы были представлены этапы проектирования универсального имитатора транспортно-пускового контейнера для спутников стандарта CubeSat 1U-6U, а также результаты его модельных и натурных испытаний, проведенных в соответствии с стандартом ECSS-E-ST-10-03C. Анализ данных, полученных натурно, проводился с использованием программы, разработанной автором, на основе метода быстрого преобразования Фурье. Анализ обработанных данных показал, что спроектированный и изготовленный экспериментальный образец оснастки возможно применять при вибродинамических испытаниях спутников стандарта CubeSat 1U-6U.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	7
1 Объект исследования, взаимодействующее с ним оборудование и методы проведения вибродинамических испытаний	9
1.1 Объект исследования	9
1.2 Вибростенды для проведения синусоидальных вибродинамических испытаний	12
1.3 Методы проведения синусоидальных вибродинамических испытаний	19
2 Исследовательская часть	29
2.1 Разработка поворотного основания для имитатора транспортно-пускового контейнера	29
2.2 Разработка имитатора транспортно-пускового контейнера для спутников стандарта CubeSat 1U-3U	30
2.3 Разработка имитатора транспортно-пускового контейнера для спутников стандарта CubeSat 1U-6U	34
2.4 Модельные испытания имитатора транспортно-пускового контейнера для спутников стандарта CubeSat 1U-6U	38
2.5 Разработка программного обеспечения для реализации метода быстрого преобразования Фурье	41
2.6 Исследование спектральных характеристик имитатора транспортно-пускового контейнера при проведении вибродинамических испытаний	53
Заключение	68
Библиографический список	70
Приложение А	74
Приложение Б	75
Приложение В	76
Приложение Г	77
Приложение Д	79

ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ, СОКРАЩЕНИЯ

- БПФ – быстрое преобразование Фурье;
- ВДИ – вибродинамические испытания;
- ВП– вейвлет-преобразование;
- ДМС – дискретный музыкальный сигнал;
- ДПФ – дискретное преобразование Фурье;
- ИТПК – имитатор транспортно-пускового контейнера;
- КА – космический аппарат;
- МКА – малый космический аппарат;
- РН – ракета-носитель;
- САПР – система автоматизированного проектирования;
- ТПК – транспортно-пусковой контейнер;
- ЧПУ – числовое программное управление.

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день существует федеральная космическая программа России (ФКП), утверждённая до 2025 г. постановлением Правительства Российской Федерации (РФ) от 23 марта 2016 г. № 230. Основной задачей этой программы является формирование и поддержание необходимого состава космических аппаратов, с целью предоставления услуг в социально-экономических, научных и других сферах деятельности. На период 2024-2025 г. в ФКП запланировано увеличение финансирования, в сравнении с предыдущими периодами программы. Существенная часть финансирования предназначена для привлечения малого и среднего бизнеса, выполняющего научно-исследовательские работы и разрабатывающего новые космические технологии. Это указывает на особое внимание со стороны правительства РФ на развитие новых космических технологий.

Из анализа деятельности космических агентств, включая Роскосмос, на сегодняшний день количество запусков космических аппаратов (КА) ежегодно увеличивается, при этом наиболее часто запускаемыми являются беспилотные малые космические аппараты (МКА), к ним относятся спутники стандарта CubeSat. Это связано с тем, что среднее время их производства занимает около года, данные спутники запускаются попутной полезной нагрузкой, поэтому общая стоимость таких спутников и их запуска остаются на сравнительно низком уровне. Исходя из этого малые космические аппараты получили широкое распространение. Они позволяют решать следующие задачи: технологическая обработка оборудования; мониторинг окружающей среды; дистанционное зондирование земной поверхности; использование в образовательных целях и др. В сфере образования спутники стандарта CubeSat помогают развивать прикладные навыки и теоретические знания у обучающихся специалистов. Также малые космические аппараты используют для проведения научно-исследовательских работ, например, исследование деградации фотоэлектрических преобразователей нашедшее отражение в первой миссии МКА AMGU-1(AMURSAT) Амурского

государственного университета. Новым этапом в разработке и эксплуатации МКА стало их использование в скоординированных группировках, что позволяет достигать повышенной эффективности в решении задач глобальной связи, дистанционного зондирования Земли и т.д. Данными МКА все больше интересуются представители малого и среднего бизнеса и представители некоммерческих организаций.

Для обеспечения успешного выполнения миссии МКА стандарта CubeSat на протяжении всего срока эксплуатации, необходимо гарантировать некоммерческим организациям и коммерческим предприятиям работоспособность изготовленных CubeSat в условиях космического пространства и в процессе выведения на орбиту. Для этого проводят наземные испытания, основными из которых являются: тепловакуумные, акустические и вибродинамические. Последние из перечисленных испытаний, могут оказывать особенно разрушительное воздействие на спутник стандарта CubeSat из-за их ограниченных масса-габаритных характеристик.

На основе вышенаписанного цель данной работы – моделирование дефектных состояний и вибродиагностика имитаторов транспортно-пусковых контейнеров спутников стандарта CubeSat, поставленная в рамках магистерской диссертации, является актуальной.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- 1) провести анализ конструкций объекта исследования, оборудования, используемого вместе с ним и методов вибродиагностики;
- 2) разработать универсальный имитатор транспортно-пускового контейнера и сопутствующее для него оборудование, для проведения вибродинамических испытаний малых космических аппаратов;
- 3) провести модельные испытания разработанного имитатора транспортно-пускового контейнера с использованием метода конечных элементов;
- 4) провести натурные испытания экспериментального образца имитатора транспортно-пускового контейнера на вибростенде;
- 5) разработать универсальную программу для анализа данных, полученных в результате вибродинамических испытаний.

1 ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ, ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩЕЕ С НИМ ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДЫ ПРОВЕДЕНИЯ ВИБРОДИНАМИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ

При проектировании любых технических изделий, а также при необходимости их сертификации, следует проводить вибродинамические испытания с использованием специальных стендов. Для точного позиционирования на вибродинамических стендах испытываемых технических изделий используют оснастки (устройства закрепления), которые при этом должны соответствовать предъявляемым к ним требованиям по вибропрочности и/или виброустойчивости. К такого рода оснасткам относят транспортно-пусковые контейнеры (ТПК) и имитаторы транспортно-пусковых контейнеров (ИТПК), применяемые в качестве устройств закрепления МКА. Любые космические аппараты включая МКА испытывают вибрационные нагрузки в спектре от единиц до тысяч Гц (например, для ракета-носителя (РН) Союз-2.1б от 20 до 2000 Гц), поэтому к оснастке ТПК/ИТПК используемой для космических аппаратов предъявляются особые требования по конструктивному исполнению и динамическим свойствам.

1.1 Объект исследования

Объектом исследования в данной работе является оснастка, которая используется для проведения вибродинамических испытаний малых космических аппаратов стандарта CubeSat.

К оснастке, как уже было указано выше, могут быть отнесены транспортно-пусковые контейнеры и их имитаторы. ТПК в первую очередь используют для доставки и выведения на орбиту МКА. Пример такого ТПК представлен на рисунке 1 [1; 2].



Рисунок 1 – Фотография транспортно-пускового контейнера для спутников стандарта CubeSat 3U [1]

Транспортно-пусковые контейнеры проектируются с учетом масса-габаритных характеристик спутников [1; 2] и как правило жестко закрепляются на специальных фермах разгонных блоков (рисунок 2), поэтому вибрационные нагрузки, создаваемые РН через ТПК передаются на спутники.

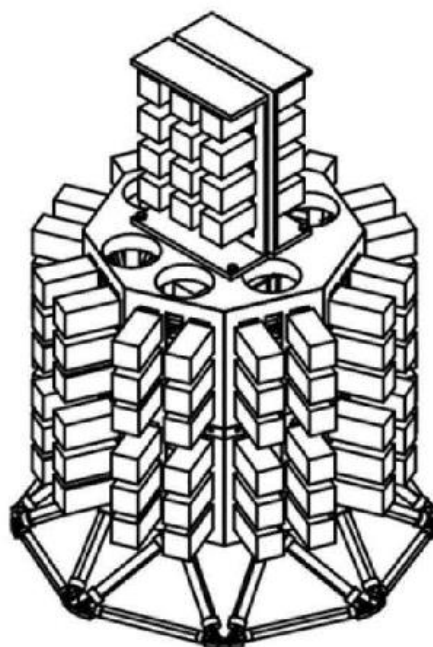
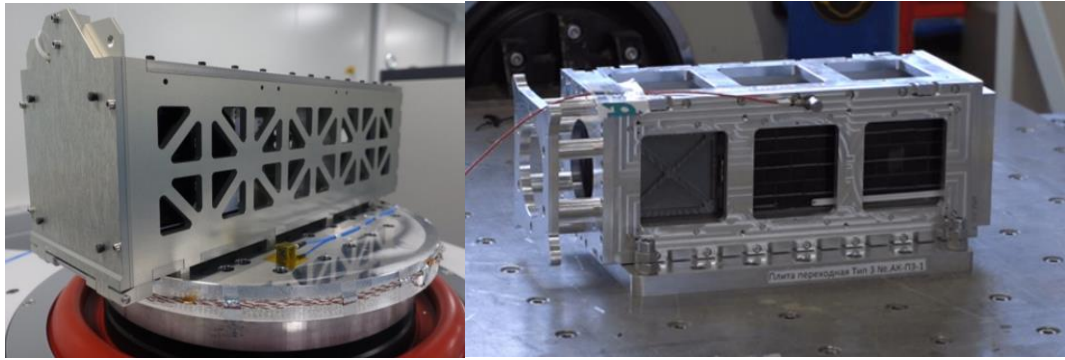


Рисунок 2 – Изображение ферменной конструкции с установленными на нее ТПК для МКА [3]

В большинстве случаев в конструкциях ТПК, помимо рамы, образующей контейнер, присутствуют откидывающаяся крышка и пружина-толкатель. Данные узлы обеспечивают отделение спутника от ТПК в заданный момент времени.

Помимо ТПК в качестве оснастки также используют имитаторы транспортно-пусковых контейнеров. В большинстве случаев ИТПК выполняются в виде рамной конструкции без узлов отделения, поэтому их стоимость ниже, чем у ТПК. В связи с этим в качестве устройств закрепления чаще используют имитаторы транспортно-пусковых контейнеров.

В качестве примера на рисунке 3 представлены фотографии ИТПК, использовавшихся для проведения вибродинамических испытаний спутников стандарта CubeSat 3U [4; 5].



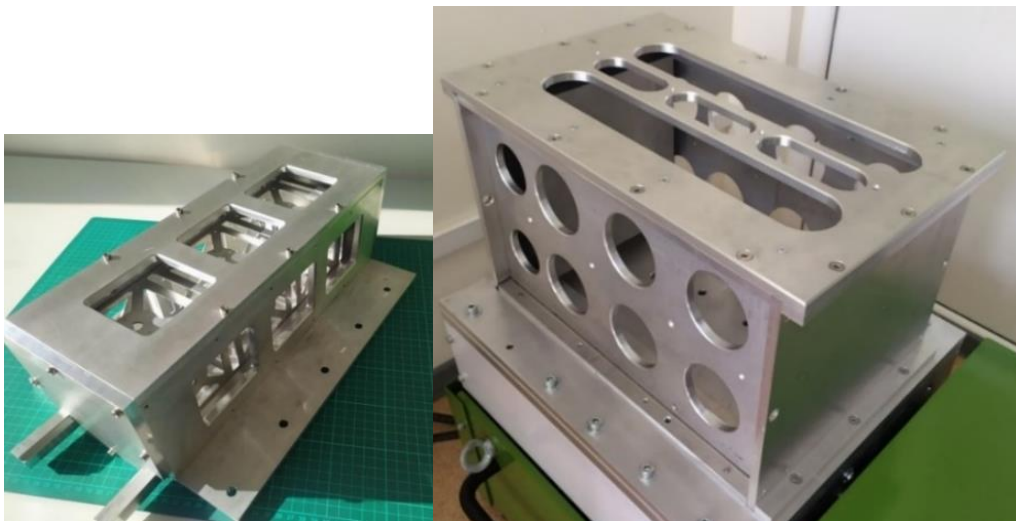
а)

б)

а) «ISTSat-1»; б) «СтратоСат ТК-1»

Рисунок 3 – Фотография имитаторов транспортно-пусковых контейнеров для спутников [4; 5]

В научно-образовательном центре (НОЦ) им. К.Э. Циолковского АмГУ, были разработаны собственные универсальные ИТПК для вибродинамических испытаний (практически для всей линейки спутников стандарта CubeSat) (рисунок 4). Данные разработки были запатентованы [6; 7].



а)

б)

а) для спутников CubeSat 1U - 3U; б) для спутников CubeSat 1U - 12U

Рисунок 4 – Фотографии ИТПК [6; 7]

Обычно для проведения вибрационных испытаний ИТПК применяются следующим образом: основание контейнера жестко прикручивается к столу

вибростенда, после чего спутник устанавливается внутрь устройства. Окончательным этапом является фиксация спутника внутри ИТПК.

Вышеописанные устройства, как правило, используют на вибростендах, создающих вибрацию в нескольких плоскостях. Такие закрепляемые ИТПК можно использовать и на однонаправленных вибростендах, однако для обеспечения воздействия вибрации в других ортогональных плоскостях тестируемый спутник необходимо извлекать из контейнера и поворачивать вручную только на возможные углы: 90° , 180° и 270° , а затем возвращать обратно в контейнер, при этом прерывая процесс проведения синусоидальных вибродинамических испытаний (ВДИ). Данная операция требует дополнительного времени, кроме того, поворот спутника возможен только вокруг его продольной оси [6; 7]. В следствии чего испытания будут проведены только в двух плоскостях.

Таким образом, рассмотренные конструкции ТПК и ИТПК применимы для проведения виброиспытаний с использованием вибростендов, создающих вибрационное воздействие в трех взаимно ортогональных плоскостях и частично могут использоваться на вибростендах с однонаправленным воздействием (однокомпонентных), требующих разработки специальной оснастки.

1.2 Вибростенды для проведения синусоидальных вибродинамических испытаний

Вибродинамические испытания для космической техники обычно проводят при ее гармоническом возбуждении (синусоидальных воздействиях) и/или случайных вибрациях. Первый тип испытаний представляет собой регулярные, повторяющиеся колебания, которые имитируют периодические движения элементов КА/МКА или РН. Второй тип испытаний предполагает воздействие на исследуемый МКА в пределах заданного диапазона частот с некоторой амплитудой, значения которой случайным образом варьируются вибровозбудителем в соответствии с гауссовым распределением. Из вышеописанных наиболее опасными для объекта исследования являются синусоидальные ВДИ, так как они создают устойчивые резонансные явления, приводящие к быстрому разрушению/повреждению элементов и узлов МАК/КА, в наиболее уязвимых местах конструкции,

поэтому далее будут рассматриваются синусоидальные ВДИ [8–10].

Для проведения синусоидальных вибродинамических испытаний КА, с учетом типичного диапазона частот от 5 до 100 Гц [11], возможно использовать следующие вибростенды: электродинамические; гидравлические; механические, входящие в перечень ГОСТ Р ISO 10813- 1 – 2011.

Электродинамические вибростенды. Работа данных устройств основана на принципе электродинамического преобразования электрической энергии в механическую волну, с помощью электромагнита и катушки индуктивности с протекающим по ней переменным током. Для данных устройств характерно, что создаваемая ими вибрация пропорциональна току возбуждения, благодаря чему устройства могут быть использованы в широком диапазоне испытаний. Типичные характеристики таких устройств в соответствии с ГОСТ Р ISO 10813- 1 – 2011 представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Типичные характеристики электродинамических вибростендов [12]

№	Номинальная вынуждающая сила, Н	Выходная мощность усилителя, Вт	Диапазон частот, Гц	Максимальное перемещение, мм	Максимальная скорость, м/с	Максимальная нагрузка, кг
1	31,5	6,3	от 5 до 13000	2,5	0,4	1,0
2	63,0	19,0	от 5 до 10000	2,5	0,4	1,5
3	125,0	62,5	от 5 до 8000	5,0	0,8	2,0
4	250,0	165,0	от 5 до 8000	8,0	1,3	4,0
5	500,0	400,0	от 5 до 7000	8,0	1,3	10,0
6	1000,0	1000,0	от 5 до 5000	12,5	2,0	25,0
7	2000,0	2000,0	от 5 до 5000	12,5	2,0	75,0
8	4000,0	4000,0	от 5 до 4000	12,5	2,0	200,0
9	8000,0	8000,0	от 5 до 3500	12,5	2,0	300,0
10	16000,0	16000,0	от 5 до 3000	12,5	2,0	400,0
11	32000,0	32000,0	от 5 до 2500	12,5	2,0	500,0

К характерным особенностям электродинамических стендов можно отнести: возможность создавать вибрацию любого рода (гармоническую, случайную и т.д.); проводить испытания в широком спектре частот (от 5 до 15000 Гц) с высоким значением ускорений (до 1500 м/с²) и перемещений (до 25 мм). Также данные устройства способны создавать большую вынуждающую силу (до 400 кН) с

небольшими гармоническими искажениями (около 5 %) и приемлемым уровнем поперечных колебаний (около 10 %).

Основными недостатками таких устройств является наличие магнитного поля в зоне стола вибростенда (обусловленного конструкцией устройства) и отсутствие обеспечения номинальной вынуждающей силы во всем диапазоне частот (так как на низких частотах она ограничена перемещением стола, на средних частотах значением скорости, на высоких частотах резонансами, возникающими на перемещающейся части вибростенда). Достижение необходимых значений ускорений для данных машин зависит от массы исследуемого объекта в соответствии с ISO 5344:2004. Данный стандарт устанавливает шесть масс объекта исследования: m_0 ; m_1 ; m_4 ; m_{10} ; m_{20} ; m_{40} ; (первая масса равна нулю), с соответствующими ускорениями стола вибростенда: 10; 40; 100; 200; 400 m/s^2 . На рисунке 5 представлены зависимости ускорения, перемещения и скорости от частоты колебаний стола вибростенда, при вышеописанных значениях массы.

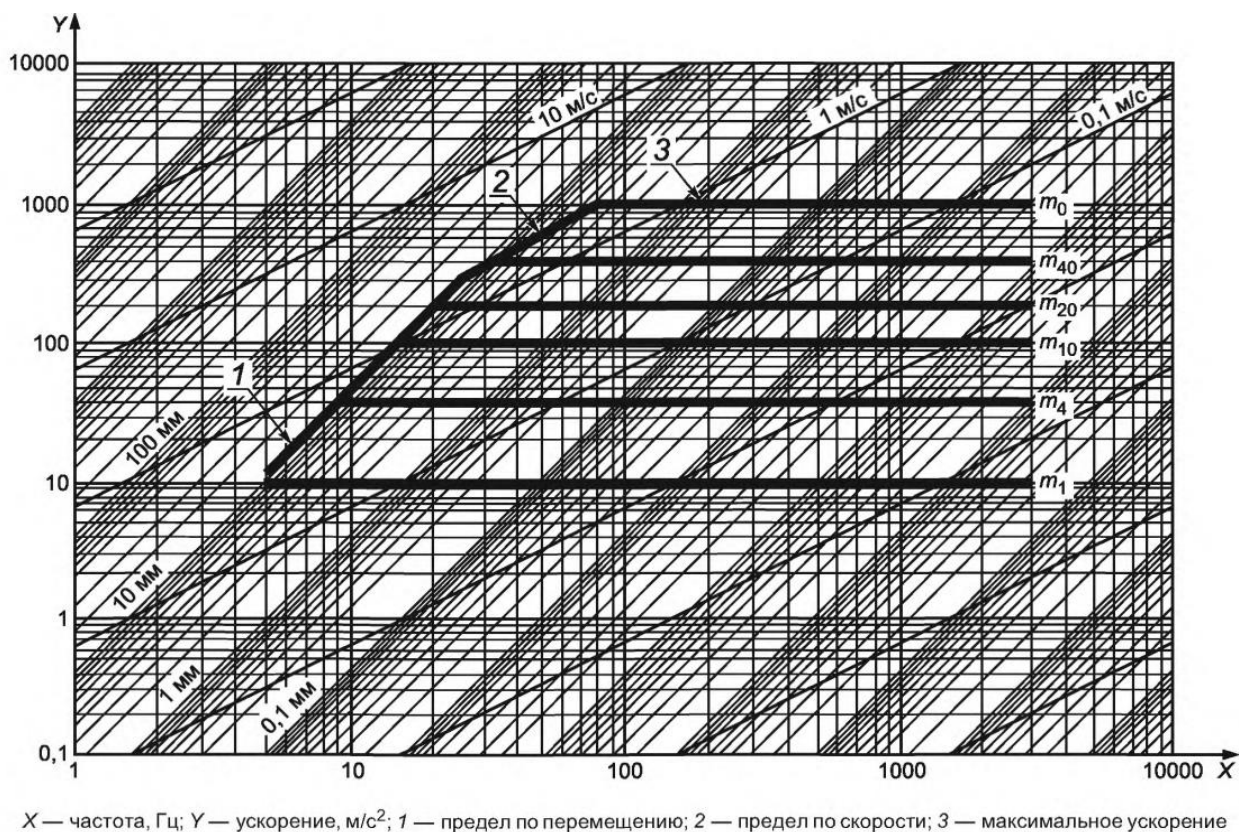


Рисунок 5 – Зависимости ускорения, перемещения и скорости от частоты колебаний стола вибростенда, при различных массах исследуемого объекта [12]

Пример электродинамического вибростенда представлен на рисунке 6 [13].



Рисунок 6 – Изображение электродинамического вибростенда Glotech 612VN [13]

Данное устройство способно создавать вибрационные нагрузки в диапазоне от 0 до 3000 Гц, с максимальным ускорением 85g. Номинальное значение перемещения стола составляет 51 мм, максимальное значение скорости перемещения стола 1,8 м/с. Данный стенд способен выдерживать статические нагрузки до 680 кг [13].

Гидравлические вибростенды. Принцип работы таких устройств основан на пульсирующем движении жидкости в гидравлическом механизме, передающем вибрацию на стол вибростенда. Пульс жидкости может быть осуществлен с помощью клапана управляемого, например, сервоприводом.

Типовыми достоинствами гидравлических вибростендов являются: высокие значения перемещений стола (до 200 мм) и вынуждающей силы (до 10 МН); низкое значение поперечных колебаний вибростола; высокая грузоподъемность (статическая грузоподъемность составляет несколько тонн); простота и надежность машины; возможность создавать вибрацию любого рода (гармоническую, случайную и т.д.). Также к достоинствам можно отнести низкую чувствительность к эксцентриситету исследуемого объекта. К недостаткам такого вибростенда можно отнести узкий диапазон создаваемых вибраций (до 200 Гц) с повышенными нелинейными искажениями в низкочастотной области, достигающими 15 %.

В таблице 2 представлены типовые характеристики гидравлических вибростендов в соответствии с ГОСТ Р ISO 10813- 1 – 2011.

Таблица 2 – Типовые характеристики гидравлических вибростендов [12]

№	Номинальная вынуждающая сила, Н	Диапазон частот, Гц	Максимальное перемещение, мм	Максимальная скорость, м/с
1	5000	от 0,1 до 140,0	100	2,0
2	8000	от 0,1 до 100,0	100	2,0
3	10000	от 0,1 до 100,0	100	2,0
4	15000	от 0,1 до 100,0	100	2,0
5	20000	от 0,1 до 100,0	100	2,0
6	30000	от 0,1 до 60,0	100	2,0
7	50000	от 0,1 до 60,0	100	2,0
8	100000	от 0,1 до 60,0	100	1,7
9	200000	от 0,1 до 60,0	100	0,8
10	500000	от 0,1 до 30,0	100	0,3
11	1000000	от 0,1 до 30,0	100	0,1

Зависимости ускорения, перемещения и скорости от частоты колебаний стола вибростенда схожи с данными характеристиками электродинамических стендов, отличие заключается в понижении значения вынуждающей силы после преодоления предела в 60 Гц (в типовых устройствах) (рисунок 7).

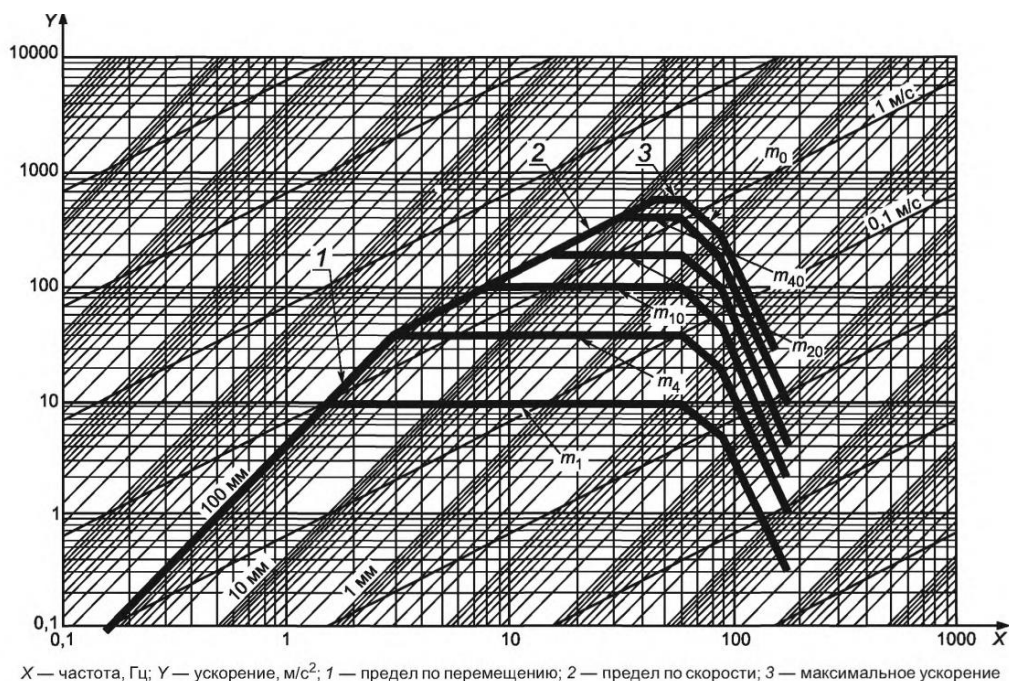


Рисунок 7 – Зависимости ускорения, перемещения и скорости от частоты колебаний стола вибростенда [12]

Пример гидравлического вибростенда представлен на рисунке 8.



Рисунок 8 – Изображение гидравлического вибростенда HVS-100 компании econ technologies co [14]

Данное устройство способно создавать вибрационные нагрузки в диапазоне от 0,1 до 120 Гц, с максимальным ускорением 5g. Максимальное значение перемещения стола составляет 200 мм, а максимальное значение скорости 1 м/с. Данный стенд способен выдерживать статические нагрузки массой до 1500 кг [14].

Механические вибростенды. Это устройства, преобразующие механическую энергию от привода в колебательное движение стола вибровозбудителя. Данные устройства подразделяют на: вибровозбудители с принудительным кинематическим возбуждением, они основываются на механизмах со структурно-заданной кинематикой, таких как кривошипно-шатунные механизмы, кулачковые механизмы и эллиптические механизмы. Эти устройства генерируют колебания с заранее заданной амплитудой и частотой, которые определяются параметрами механизма; вибровозбудители с центробежным возбуждением вибрации. Данные устройства используют вращающиеся несбалансированные элементы. Величина небаланса и скорость вращения определяют параметры возбуждаемых колебаний.

В таблице 3 представлены типовые характеристики механических вибростендов с центробежным возбуждением вибрации в соответствии с ГОСТ Р ISO 10813- 1 – 2011.

Таблица 3 – Типовые характеристики механических вибростендов с центробежным возбуждением вибрации [12]

№	Номинальная вынуждающая сила, Н	Диапазон частот, Гц	Максимальное перемещение, мм	Максимальное ускорение, м/с ²
1	5	от 5 до 100	± 5,0	150
2	25	от 5 до 100	± 5,0	150
3	50	от 5 до 100	± 3,0	100
4	100	от 5 до 80	± 3,0	100
5	250	от 5 до 80	± 3,0	50
6	500	от 5 до 80	± 3,0	50
7	1000	от 5 до 80	± 2,5	50

Достоинства данных устройств заключаются в их простой и надежной конструкции, а также в эффективной передаче механической волны на исследуемый объект. Недостатками механических вибростендов являются: ограниченный диапазон воспроизводимых частот (от 5 до 100 Гц); повышенный уровень нелинейных искажений; низкий уровень воспроизводимых перемещений (до 5 мм) и ускорений стола (до 150 м/с²); повышенный уровень поперечных колебаний стола вибростенда.

Пример механического вибростенда (с центробежным возбуждением вибрации) представлен на рисунке 9 [15].



Рисунок 9 – Изображение вибростенда ВИКАМ 35/14 компании ТехноПрист [15]

Данное устройство способно создавать вибрационные нагрузки в диапазоне от 20 до 80 Гц, с максимальным ускорением 10g (без нагрузки).

Максимальное значение перемещения вибростола составляет 3 мм (без нагрузки). Данный стенд способен выдерживать статические нагрузки массой до 35 кг [15].

Таким образом, основываясь на стандарте ГОСТ Р ISO 10813- 1 – 2011 (руководство по выбору вибростендов), для проведения синусоидальных виброиспытаний, возможно использовать все выше представленные вибровозбудители. При этом, с учетом типичного диапазона частот синусоидального воздействия (от 5 до 100 Гц) [11], наиболее подходящими являются гидравлические и механические вибровозбудители, так как данные устройства способны создавать синусоидальные вибрации в диапазоне частот от 0,1 до 140 Гц и от 5 до 100 Гц соответственно. Рассматривая вышеописанные устройства, с точки зрения их стоимости, в соответствии с ГОСТ Р ISO 10813- 1 – 2011, наиболее низкой ценой отличаются механические вибровозбудители, благодаря относительно простой конструкции и не дорогому обслуживанию. В данной диссертационной работе именно для механического вибростенда выполнялось проектирование оснастки, позволяющей проводить виброиспытания в трех ортогональных плоскостях.

1.3 Методы проведения синусоидальных вибродинамических испытаний

Каждая проектируемая оснастка требует всестороннего исследования на деформации и резонансные частоты, исходя из того, что устройства закрепления должны обеспечивать максимально приближенные условия тестирования МКА к натурным, в которых они оказываются при транспортировке на орбиту. Одним из документов, регламентирующих критерии и методы испытаний, является ECSS-E-ST-10-03C.

В соответствии с представленным документом в первую очередь необходимо проводить модельные испытания для определения резонансных частот объекта исследования. Данный анализ возможен в системе автоматизированного проектирования (САПР) SolidWorks. Эта параграмма предназначена для проектирования инженерных конструкций и их анализа. В отношении линейного частотного анализа, в программе реализована возможность получения спектра

форм и собственных частот, в различных режимах воздействия волны: гармонические колебания, случайная вибрация. Вне зависимости от режима испытаний для спроектированной конструкции, расчет выполняется методом конечных элементов (МКЭ) [16]. В контексте МКЭ равновесие системы R может быть описано дифференциальными уравнениями второго порядка [17]:

$$M \cdot \ddot{U} + C \cdot \dot{U} + K \cdot U = R, \quad (1)$$

где M, C, K – матрицы жесткости, массы, демпфирования;

\ddot{U}, \dot{U}, U – ускорений узлов системы, скорости узлов системы, векторы перемещений.

Установившиеся гармонические колебания, возникающие под действием вынуждающей силы, описываются вектором нагрузки $R(t)$ изменяющемся во времени по закону [17]:

$$R(t) = R_0 e^{ipt} = R_0 (\cos pt + i \sin pt), \quad (2)$$

где R_0 – вектор комплексных амплитуд, который можно представить в виде суммы действия действительной R_{Re} и мнимой iR_{im} частей;

i – мнимая единица;

p – значение воздействующей частоты;

t – время.

$$R_0 = R_{Re} + iR_{im}. \quad (3)$$

Перемещения системы возможно определить как [17]:

$$U(t) = U_0 e^{ipt} = U_0 (\cos pt + i \sin pt), \quad (4)$$

где U_0 – вектор комплексных амплитуд, определяющийся суммой действительных U_{Re} и мнимых составляющих iU_{im} [17]:

$$U_0 = U_{Re} + iU_{im}. \quad (5)$$

Продифференцировав уравнение (4), можно получить уравнения (6), скорости \dot{U} и ускорения \ddot{U} системы [17]:

$$\dot{U} = ip U_0 e^{ipt}; \quad \ddot{U} = -p^2 U_0 e^{ipt}. \quad (6)$$

Подставив уравнения (2), (4) и (6) в уравнение равновесия (1), получим систему уравнений (7) для определения амплитуд вынужденных колебаний системы [17]:

$$\begin{bmatrix} K - p^2 M & -pC \\ pC & K - p^2 M \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} U_{Re} \\ U_{im} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_{Re} \\ R_{im} \end{pmatrix}. \quad (7)$$

С помощью последних матричных уравнений, при заданной частоте возбуждения p и известных векторов сил R_{Re} , iR_{im} , возможно определить действительные и мнимые составляющие амплитуд U_{Re} , iU_{im} перемещений. Также возможно рассчитать значение амплитуды и фазу колебаний [17].

После получения спектра вибрации исследуемого объекта приступают к натурным испытаниям, состоящим из двух этапов, в ходе которых для каждой ортогональной оси объекта исследования получают два массива данных. На первом этапе в эксплуатационной конфигурации МКА/ТПК/ИТПК в трех взаимно ортогональных плоскостях тестируют на воздействие гармонических колебаний в диапазоне частот, например, от 5 до 100 Гц [11]. Данный этап позволяет определить значения собственных мод колебаний исследуемого МКА/ТПК/ИТПК и сравнить их с полученными модельно. В случае расхождения значений, полученных модельно и натурными испытаниями, как правило, проводят поиск

узлов/элементов, содержащих дефекты. Вторым этапом является повторное проведение виброиспытаний с увеличенным значением виброускорения (в зависимости от технического задания значение виброускорения может достигать 100 м/с^2). После регистрации значений амплитуд и частот на первом и втором этапах их сравнивают. Допускаются отклонения: для амплитуд $\pm 20 \%$, для частот $\pm 5 \%$ (для режимов с эффективной массой более 10%) [10].

Для регистрации значений (виброускорений, виброперемещений и др.) возможно использовать одноосный датчик виброизмерений. В процессе испытаний регистрирующий датчик обычно закрепляют в наиболее деформируемых областях, определяющихся при модельных испытаниях. При этом чтобы получить данные для других ортогональных плоскостей (в случае использования одноосного датчика), испытания на короткое время приостанавливают для смены его ориентации. Управляющая точка крепления датчика выбирается в соответствии с ГОСТ 28203-89 пункт 3.3.

Значения, получаемые датчиком/датчиками, регистрируются с заданной частотой дискретизации, поэтому для анализа таких массивов обычно осуществляют переход в частотную область. Для этого возможно использовать следующие методы: вельвет-преобразование, оконное преобразование Фурье, быстрое преобразование Фурье и другие модификации метода Фурье.

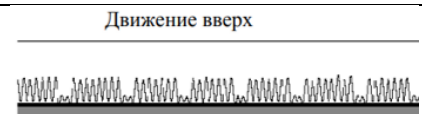
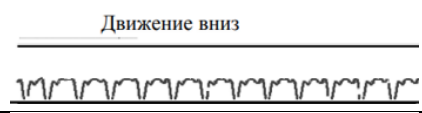
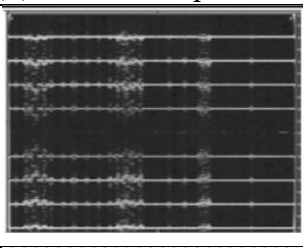
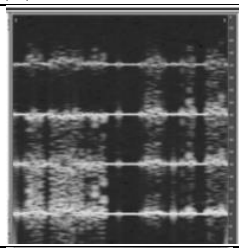
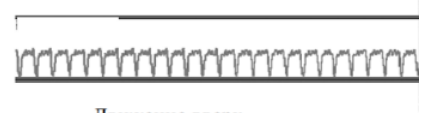

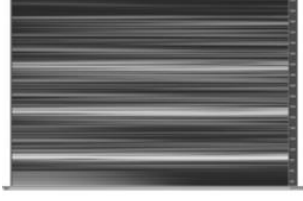
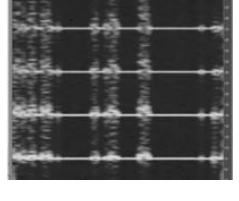
На сегодняшний день существует ряд исследований, посвященных применению метода Фурье (его вариаций) и вельвет-преобразования для анализа колебательных процессов в различных областях науки и техники, таких как вибродиагностика технических систем, механизмов и машин. Также данные методы применяются в анализе акустических колебаний [18 – 20].

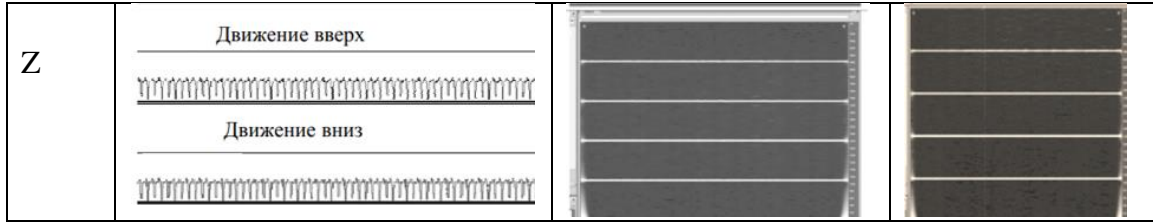
Одной из работ, в которой представлено исследование применения метода Фурье и вельвет-преобразования для вибродиагностики технических систем является работа [18]. В исследовании представлен результат применения метода Фурье и вейвлет-преобразование для анализа вибраций в тоннельных эскалаторах, с целью определения резонансных частот и выявления возможных неисправностей их элементов или узлов. Автор исследования, приведенного в работе [18],

измерил уровни вибрации эскалатора, в процессе его движения вверх и вниз, в трех взаимно ортогональных плоскостях в различных режимах работы. Преобразовав полученный сигнал методом быстрого преобразования Фурье (БПФ) и вейвлет-преобразованием (ВП), автор представил таблицу 4, в которой в первом столбце был показан результат преобразования Фурье, а во втором и третьем столбцах результаты вейвлет-преобразования при движении эскалатора вверх и вниз. С помощью полученных данных БПФ, представленных в таблице, автор определил большую часть колеблющейся массы на осях X и Z, а по результатам вейвлет-преобразования автор заключил о наличии низких (0-20 Гц) и высоких (80-100 Гц) резонансных частот конструкции, определенных при движении эскалатора вниз и вверх соответственно. Кроме того, из анализа таблицы 4, при движении вверх по оси Y и X наблюдается определенная нестационарность сигнала, что может свидетельствовать о наличии неисправностей/износа узлов или дефектов (трещин или утонений) данных элементов системы [18].

В итоге, в представленном исследовании показано, что оба подхода (БПФ и ВП) могут использоваться для определения резонансных частот и уточнения значений масс, резонирующих на этих частотах для исследуемой конструкции. Это подтверждает применимость и эффективность методов преобразования Фурье и ВП для вибродиагностики в системах раннего выявления неисправностей технических устройств [18].

Таблица 4 – Сигнал, преобразованный БПФ и ВП [18]

Ось	Преобразование Фурье	Вейвлет-преобразование	
		Движение вверх	Движение вниз
X	<p>Движение вверх</p>  <p>Движение вниз</p> 		
	<p>Движение вниз</p>  <p>Движение вверх</p> 		



Работа [19], посвящена созданию цифрового метода спектрального анализа вибрационных сигналов механизмов и машин. Взяв за основу прямое преобразование Фурье:

$$E_X = K_{e_\omega} \int_0^\infty |X(j\omega)|^2 d\omega, \quad (8)$$

где E_X – среднее значение энергии на интервале времени;

K_{e_ω} – масштабный коэффициент физической величины;

ω – частота механической волны;

j – мнимая единица;

X – амплитуда.

Авторы исследования [19] преобразуют уравнение (8) для анализа вибраций механизмов и машин с учетом теоремы Найквиста – Котельникова. Также для данного уравнения авторы вводят оконный фильтр для дискретизации сигнала по времени. Итоговое уравнение выглядит следующим образом:

$$FX_\phi(j\omega) = \int h_\phi(t - \tau)X(t)e^{-j\omega t} dt, \quad (9)$$

где $h_\phi(t - \tau)$ – характеристика оконного фильтра сигнала.

Уравнение (9) является оконным преобразованием Фурье и может использоваться для цифровой обработки вибрационных сигналов. Для этого авторы представляют его следующим образом [19]:

$$X_\phi[t_1 = i\Delta t_d] = \sum_{\varepsilon=0}^i h_\phi[\varepsilon\Delta t_d]X[(i - \varepsilon)\Delta t_d], \quad (10)$$

где $i = 0, 1, 2, \dots, M1 + M2 - 1$; $M2$ – ширина окна во временной области;
 $\{h_\phi [q], q = 0, 1, 2, \dots, M2 - 1\}$ – импульсная характеристика фильтра.

В качестве примера применения уравнения (10) в статье [19] приводится его использование при проведении исследования по виброперемещению корпуса гусеничной машины (предназначенной для транспортирования радиоэлектронного оборудования). Вибрационные процессы регистрировались во время стоянки машины и являлись следствием функционирования навесного мотор-генератора для автономного электроснабжения аппаратуры. Используя уравнение (10) для декомпозиции зарегистрированного сигнала, авторы исследования представляют графики амплитудно-частотной и фазо-частотной характеристик колебаний (рисунок 10).

В результате анализа графических зависимостей, проведенного исследователями, показано, что в вибрационном процессе доминируют гармоники в диапазоне частот от 40 до 140 Гц. Максимальные значения амплитуды колебаний наблюдаются на частотах 80 и 90 Гц, значительно ниже амплитуда колебаний на частотах 40, 100, 130 Гц. Минимальная интенсивность колебаний характерна для частот 30, 150, 170, 180, 200, 230, 270 Гц. Полученные результаты подтверждают эффективность использования оконного преобразования Фурье (ОПФ) для анализа вибрационных процессов механизмов и машин [19].

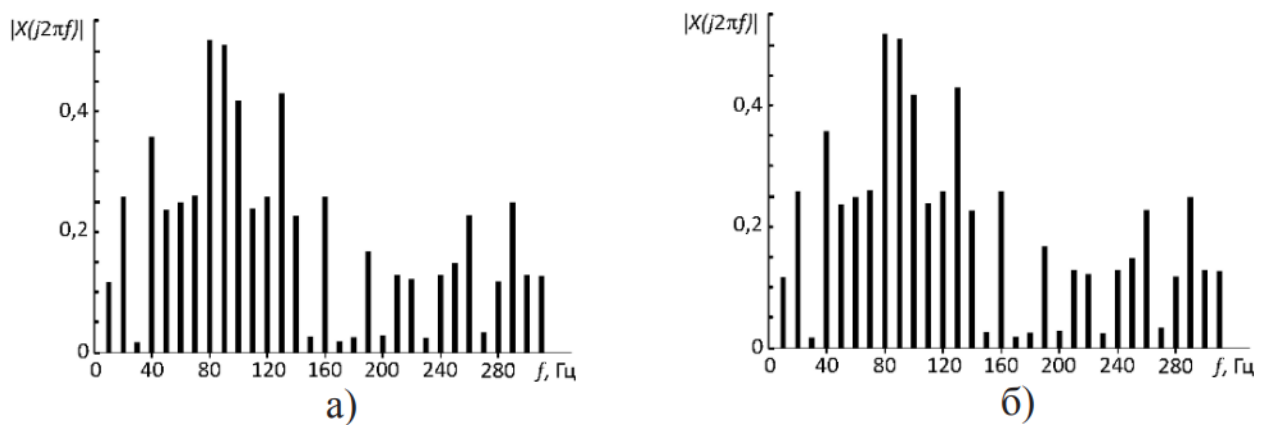


Рисунок 10 – Амплитудно-частотная (а) и фазо-частотная (б) характеристики вибрационного сигнала [19]

В работе [20], авторы используют параметрическое дискретное преобразование Фурье для анализа акустических колебаний. Этот метод является модификацией прямого или обратного преобразования Фурье, которая считается более эффективной при обработке численных данных. Дискретное преобразование Фурье параметрическое (ДПФ-П) применено для разложения дискретного музыкального сигнала (ДМС) по базису параметрических дискретных экспоненциальных функций:

$$def_p(k, n, \theta) = W_N^{(k+\theta)n} = \exp\left[-j \frac{2\pi}{n} (k + \theta)n\right], 0 \leq \theta < 1. \quad (11)$$

И определяется в матричной форме следующим соотношением:

$$S_{n,\theta} = \frac{1}{N} F_{n,\theta} X_N, 0 \leq \theta < 1. \quad (12)$$

В работе [20] используют данные выражения для локализации спектральных пиков в музыкальной акустике. Так, для сигнала $x(n) = \cos\left(\frac{2\pi}{32kn}\right)$, авторы применяют формулы (11) и (12), в итоге определив значения точек интервала бинов $\theta = -0,125$ и $\theta = -0,250$ (рисунок 11).

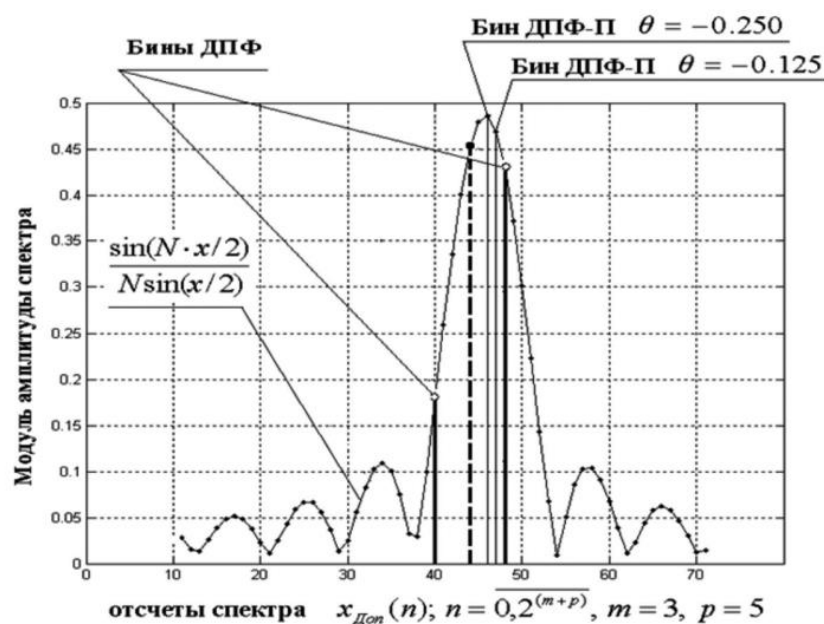


Рисунок 11 – Иллюстрация работы применения уравнений (11) и (12) [20]

Также авторы применяют представленный выше подход для определения тембра ноты “до” в ее стационарной части (рисунок 12).

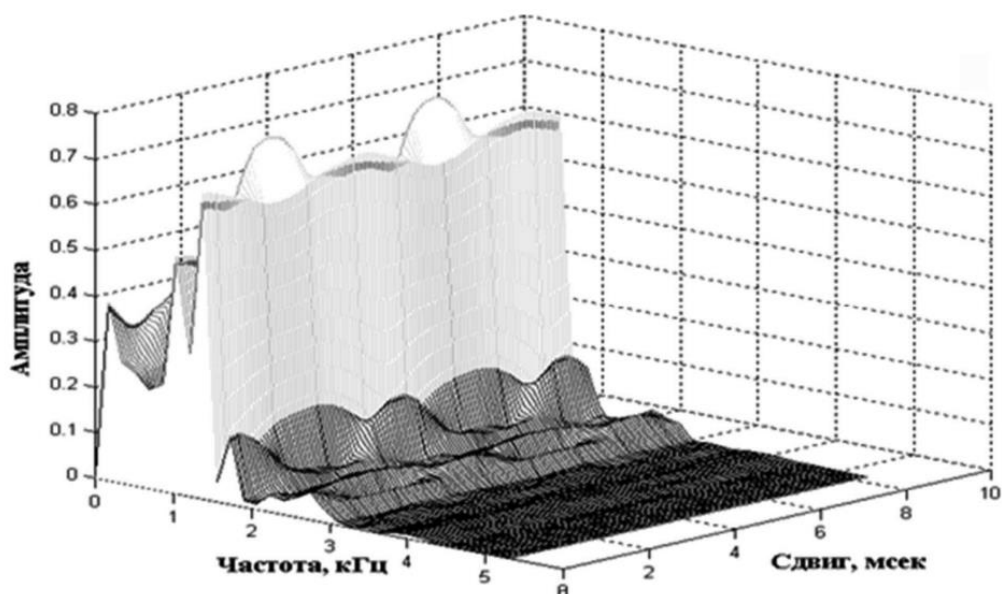


Рисунок 12 – Частотная зависимость амплитуды ноты “до” в ее стационарной части [20]

Результаты исследования [20] демонстрируют, что применение ДПФ-П при анализе звуковых сигналов позволяет повысить эффективность и результативность обработки ДМС во временной, частотной и частотно-временной областях. Так, данный метод позволяет локализовать спектральные пики и определить их значение. Также данный метод позволяет составлять спектральные графики звуковых сигналов на различных этапах воспроизведения, таких как: атака, стационарная часть и спад [20].

Анализ представленных выше статей [18 – 20] показал, что для исследования волновых процессов в технических системах и анализа акустических колебаний можно использовать различные подходы. Основные из них: вейвлет-преобразование, дискретное преобразование Фурье, оконное преобразование Фурье, параметрическое преобразование Фурье, быстрое преобразование Фурье.

Как правило, вейвлет-преобразование применяется для анализа временных и частотных составляющих сигналов. Оно позволяет анализировать сигналы с переменной частотой и амплитудой с высокой точностью. Вейвлет-преобразование часто используется в областях, связанных с обработкой изображений,

обнаружением образов, сжатием данных, анализом переменных волновых процессов, а также в биомедицинской и финансовой обработке данных.

Дискретное преобразование Фурье используется для анализа сигналов в частотной области. Оно позволяет разложить сигнал на его частотные компоненты, определить частотную структуру сигнала и выделить основные составляющие.

Быстрое преобразование Фурье является наиболее часто применяемым методом в сравнении с ДПФ, благодаря алгоритму расчета искомым данным. Данный алгоритм значительно сокращает количество операций при расчетах. При этом точность вычислений БПФ и ДПФ обычно не различается.

Оконное преобразование Фурье является вариантом ДПФ, в котором перед преобразованием применяется “окно”. “Окна” используются с целью выделения дискретных промежутков в сигнале для их дальнейшего анализа ДПФ. ОПФ широко применяется в анализе и обработке сигналов, обработке изображений, аудио обработке и других областях.

Параметрическое преобразование Фурье, в отличие от прямого или обратного дискретного преобразований Фурье, которые разбивают сигнал на набор базовых гармонических функций, использует заранее определенные модели, которые лучше соответствуют структуре сигнала для его последующей аппроксимации и преобразования.

Таким образом, основываясь на проведенном анализе [18 – 20], методы Фурье являются наиболее оптимальными, так как они позволяют локализовать резонансные частоты и значения амплитуд на этих частотах для исследуемого объекта при проведении вибродинамических испытаний.

Методика, представленная в стандарте ECSS-E-ST-10-03C, с учетом ГОСТ 28203-89 пункт 3.3 может применяться для проведения синусоидальных ВДИ, с использованием однокомпонентных вибростендов.

Выполнение модельного исследования на воздействие вибрации, по стандарту ECSS-E-ST-10-03C, возможно в САПР SolidWorks, с учетом реализованного в нем метода, поскольку позволяет определить необходимые динамические характеристики объекта исследования.

2 ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ ЧАСТЬ

2.1 Разработка поворотного основания для имитатора транспортно-пускового контейнера

В представленной автором работе для тестирования, разрабатываемого ИТПК (оснастки) для спутников стандарта CubeSat от 1U до 6U, использовался однокомпонентный вибростенд ВИКАМ 35/14, оказывающий синусоидальное воздействие только в вертикальной плоскости. Синусоидальные виброиспытания МКА [9; 10] должны проводиться при воздействии механической волны в каждой взаимно ортогональной плоскости на исследуемый объект. Для этого потребовалось разработать оснастки для спутников стандарта CubeSat от 1U до 6U, закрепляющиеся на столе вибростенда ВИКАМ 35/14, с возможностью изменения ориентации в них исследуемого МКА в трех взаимно ортогональных плоскостях. Спроектированные и изготовленные устройства должны были пройти вибродинамические испытания перед их использованием.

Общей частью оснасток является поворотное основание (которое было отдельно спроектировано и изготовлено). Основная его задача – изменять ориентацию ИТПК со спутником внутри относительно плоскости стола вибростенда. Спроектированное поворотное основание представляет собой рамную конструкцию, с массивом отверстий для ее облегчения. Также в конструкции устройства присутствуют подшипники, расположенные на одной оси, обеспечивающие вращение устанавливаемой в них оснастки (рисунок 13).



Рисунок 13 – Вид универсального поворотного основания

Для данного устройства (рисунок 13) проводилось исследование статических деформаций в программе САПР SolidWorks. Масса нагружения соответствовала сумме масс: стандартного ИТПК для спутников CubeSat 1U-3U (7,44 кг) и спутника CubeSat 3U (4 кг). В результате было установлено, что наиболее деформируемыми элементами являются боковые вертикальные стенки. Максимальное значение деформации для данных элементов составило 0,057 мм (рисунок 14).

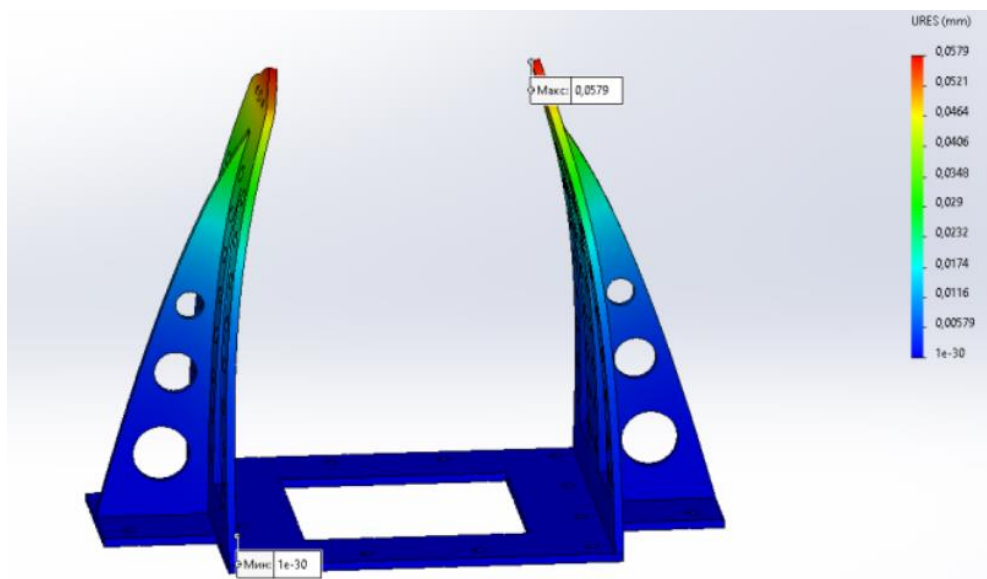


Рисунок 14 – Вид модели поворотного основания после моделирования на воздействие статической нагрузки, полученной в САПР SolidWorks

Полученное значение деформации соответствует высокому запасу прочности разработанной конструкции поворотного основания [21 –23].

2.2 Разработка имитатора транспортно-пускового контейнера для спутников стандарта CubeSat 1U-3U

Для поворотного основания (представленного в пункте 2.1), потребовалось разработать соответствующий его конструкции ИТПК. Для этого за основу был взят ранее разработанный автором ИТПК для спутников стандарта CubeSat 1U-3U, фиксируемый на рабочем столе вибростенда (рисунок 15).

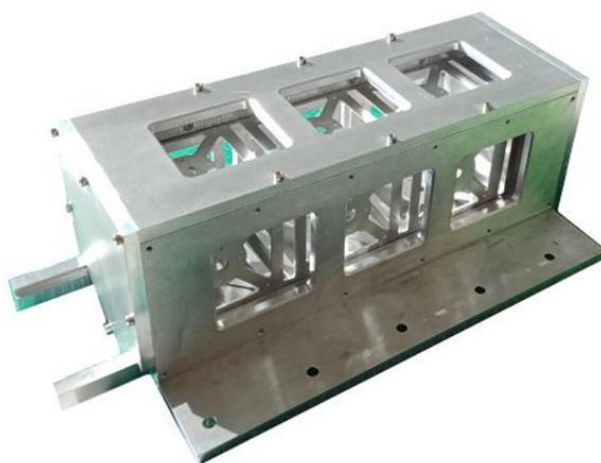


Рисунок 15 – Изображение фиксируемого на рабочем столе вибростенда ИТПК для МКА CubeSat 1U-3U

В конструкцию ИТПК (рисунок 15) (патент RU 211274 U1, приложение А) были внесены следующие изменения: спроектировано новое основание, на одну из его плоскостей были добавлены поворотные полуоси с их фиксаторами; добавлена система балансировки центра масс, состоящая из двух горизонтальных и одного вертикального балансиров (рисунок 16).

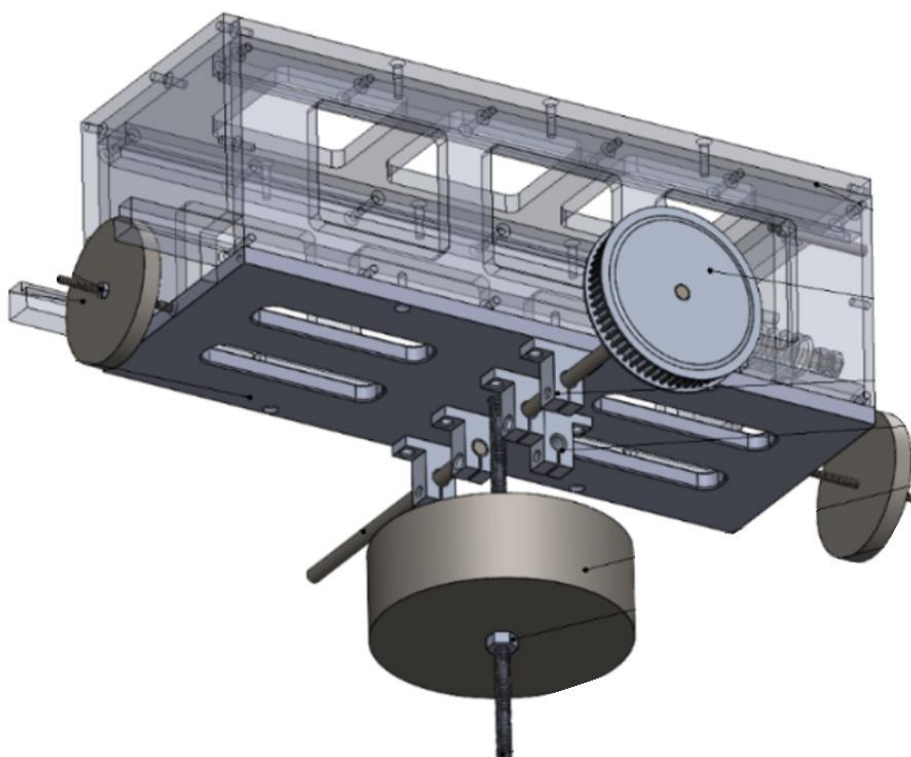


Рисунок 16 – Вид модернизированного ИТПК для поворотного основания

Вышеописанные конструктивные изменения позволяют использовать модернизированный ИТПК для CubeSat 1U-3U в составе поворотного основания для проведения виброиспытаний в трех взаимно ортогональных плоскостях на однокомпонентных вибростендах. Реализация испытаний в трех взаимно ортогональных плоскостях возможна благодаря вращению модернизированного ИТПК со спутником внутри (центром вращения которых являются поворотные полуоси), а также за счет изменения ориентации спутника вокруг его продольной оси, путем ручной перестановки на углы 90° и 180° .

На основе спроектированных конструкций (модернизированный ИТПК с поворотным основанием) был разработан комплекс для проведения ВДИ. В его состав помимо разработанных устройств вошли: зубчато-ременная передача с ведущим и ведомым шкивами; шаговый двигатель, модуль с числовым программным управлением (ЧПУ); стол с утяжелителем. Зубчато-ременная передача (от шагового двигателя, управляемого модулем с ЧПУ к полуоси модернизированного ИТПК) применяется для изменения ориентации исследуемого МКА непосредственно в процессе вибродинамических испытаний (рисунок 17).

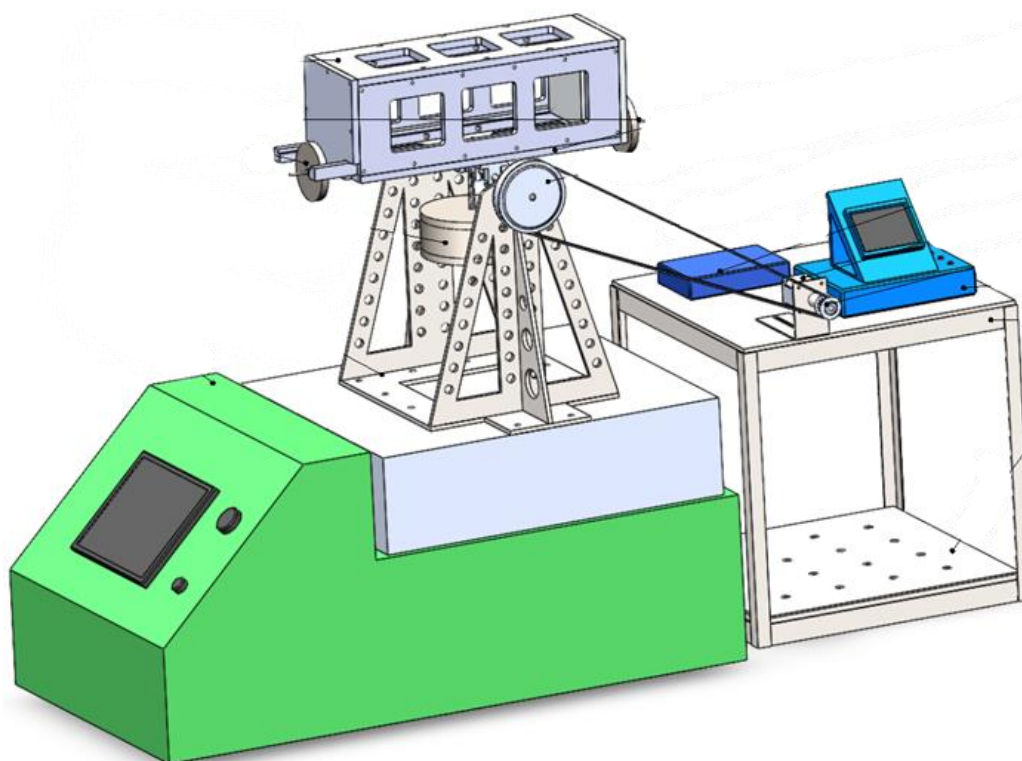


Рисунок 17 – Вид комплекса с модернизированным ИТПК для МКА CubeSat 1U-3U

Элементы разработанного комплекса были изготовлены в виде экспериментальных образцов (рисунок 18) патент RU 2796176 С1 (приложение Б).



Рисунок 18 – Изображение экспериментальных образцов модернизированного ИТПК для МКА CubeSat 1U-3U, установленного на поворотное основание

Экспериментальный образец поворотного основания (с установленным на него экспериментальным образцом модернизированного ИТПК) (рисунок 18) прошел исследование по определению статических деформаций. Для регистрации значений деформации использовался цифровой индикатор ИЦ 0-12.5 0.001 КЛБ и его устройства фиксации. В результате исследования статических деформаций поворотного основания их максимальное значение составило 0,052 мм (рисунок 19). Полученное значение хорошо коррелирует с расчетным, полученным модельными средствами – 0,057 мм (рисунок 14), что говорит о высокой точности изготовления экспериментального образца поворотного основания.

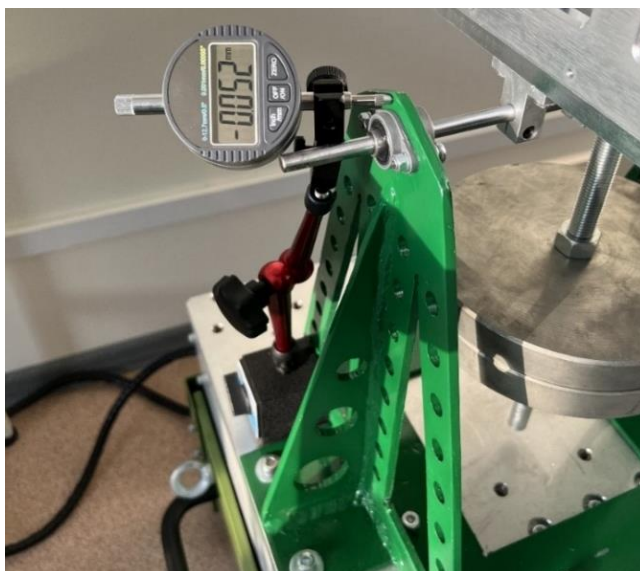


Рисунок 19 – Изображение цифрового индикатора, установленного на левую опору поворотного основания

Следующим этапом тестирования экспериментальных образцов (рисунок 18) стало определение их массовых характеристик, поскольку масса нагружения вибростенда ВИКАМ 35/14 не должна превышать 23,33 кг (в соответствии с паспортными характеристиками устройства), так как при превышении данного предела значение виброускорения (на низких частотах до 40 Гц) для данного вибростенда будет снижено, и не даст провести ВДИ в полном объеме. Значения масс экспериментальных образцов составили: 7,44 кг – модернизированный ИТПК для CubeSat 1U-3U; 4,45 кг – поворотное основание; 5,5 кг – балансиры. Таким образом, исходя из установленных массовых характеристик, представленная оснастка позволяет тестировать спутники, на вибростенде ВИКАМ 35/14 с массой, не превышающей 4 кг (CubeSat 3U), поскольку масса самой оснастки составила 17,39 кг.

2.3 Разработка имитатора транспортно-пускового контейнера для спутников стандарта CubeSat 1U-6U

Для проектирования оснастки под наноспутники массой от 4 до 12 кг в отношении однокомпонентного вибростенда ВИКАМ 35/14, были учтены массовые характеристики оснастки из предыдущей разработки.

Проектирование устройства выполнялось в САПР SolidWorks. В результате был спроектирован ИТПК для спутников стандарта CubeSat 1U-6U с массой 3,95 кг, закрепляемый на поворотном основании (рисунок 20).

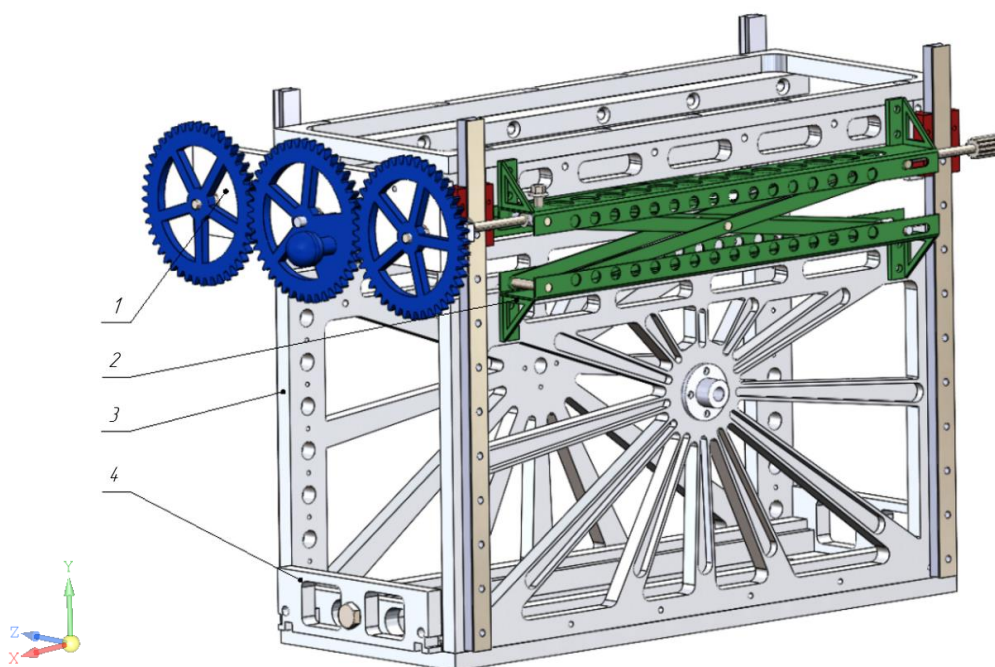


Рисунок 20 – Вид спроектированного в САПР SolidWorks ИТПК для спутников стандарта CubeSat 1U-6U, закрепляемого на поворотном основании

ИТПК для CubeSat 1U-6U (патент RU2812511C1, приложение В) включает в себя: съёмный механизм синхронизации 1 (рисунок 21), благодаря которому происходит равномерный зажим спутника ножничными подъёмниками 2, обеспечивающими фиксацию и расфиксацию спутника внутри ИТПК; боковые стенки, в геометрических центрах которых расположены фланцы для установки осей вращения 3. Такая конфигурация боковых стенок позволяет исключить массивные балансиры, использовавшиеся в предыдущей конструкции (рисунок 18). Для балансировки спутника в спроектированной конструкции используетсядвигающаяся каретка 4, которая помимо этой функции позволяет реализовать функцию безопасной установки и извлечения спутника в/из ИТПК для CubeSat 1U-6U.

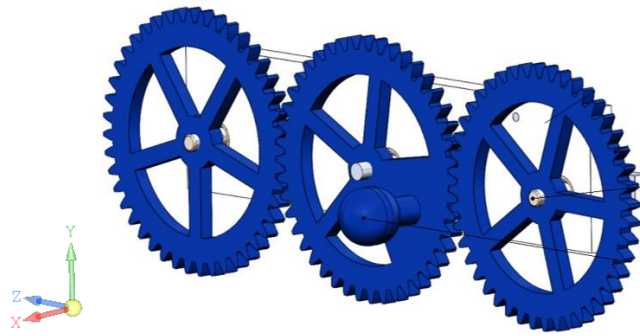


Рисунок 21 – Вид спроектированного механизма синхронизации, в виде съёмного узла

Спроектированное устройство (рисунок 20) поддерживает следующий функционал предыдущей разработки (RU2796176C1): возможность поворота на любой угол в плоскости Y, надёжную фиксацию спутника внутри ИТПК. При этом оснастка для CubeSat 1U-6U позволяет балансировать спутник внутри контейнера (благодаря наличию двигающейся каретки), а затем фиксировать его с помощью ножничных подъёмников и съёмного устройства синхронизации.

Также в конструкцию устройства, основываясь на опыте прошлой разработки, была добавлена система натяжителей успокоителей (рисунок 22), расчет параметров системы проводился в соответствии с методикой, представленной производителем ремней компании Contitech [24].

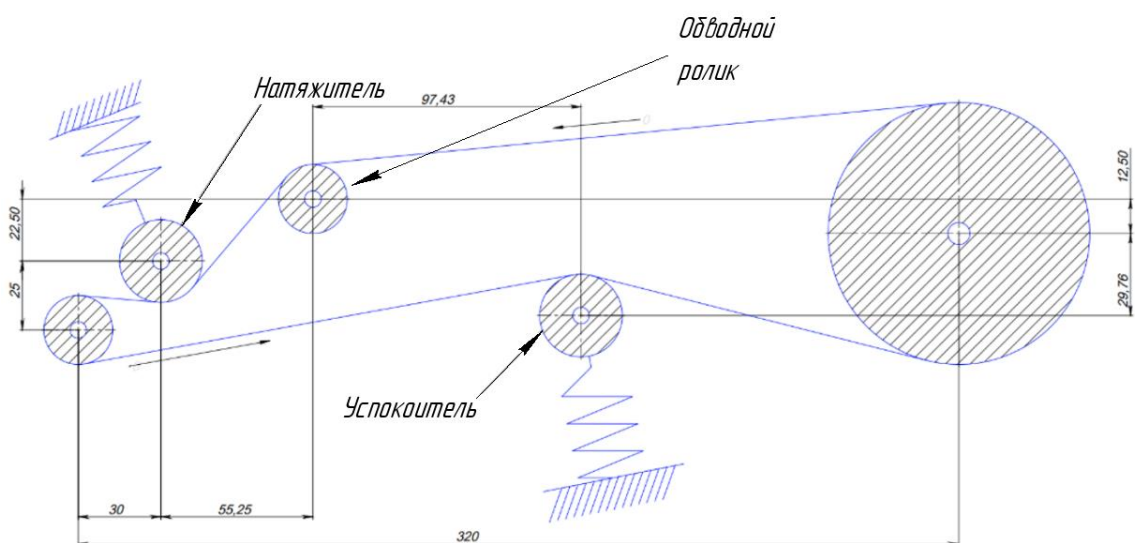


Рисунок 22 – Чертеж зубчато-ременной передачи с натяжителем, успокоителем и обводным роликом

В общем виде комплекс с ИТПК для CubeSat 1U-6U представлен на рисунке 23.

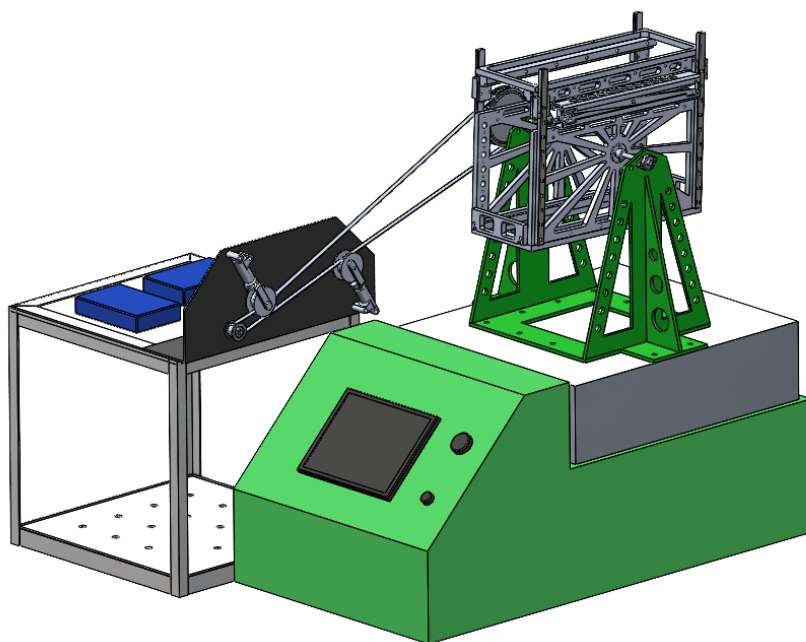


Рисунок 23 – Вид комплекса с ИТПК для МКА CubeSat 1U-6U

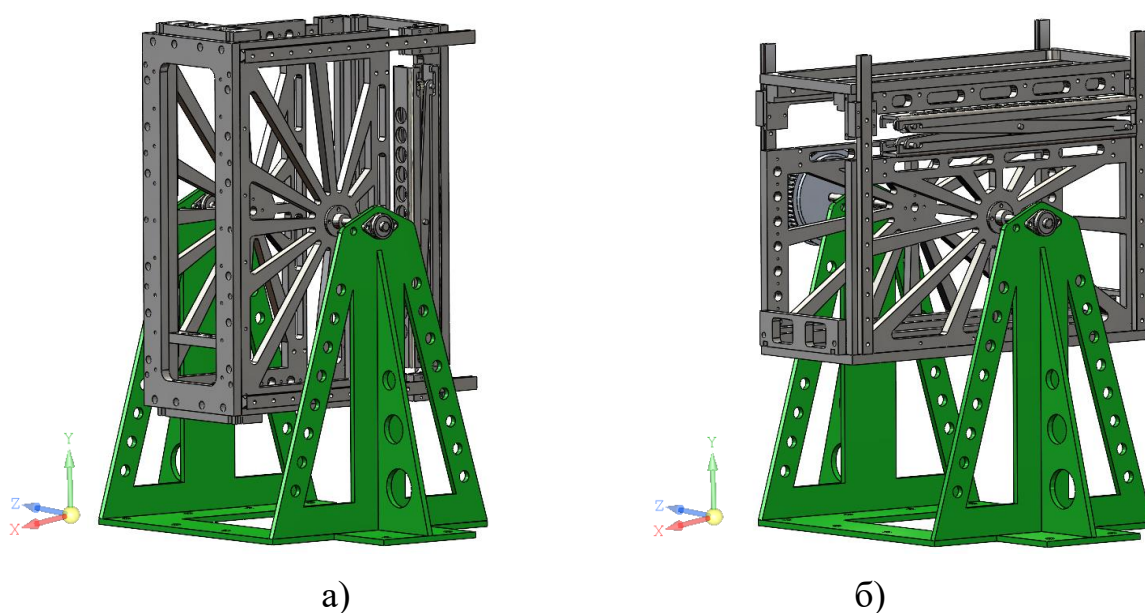
Так же, как и для предыдущего ИТПК (рисунок 18), учитывая важность массовых характеристик при проведении ВДИ, последние были проанализированы и для ИТПК, предназначенного для спутников стандарта CubeSat 1U-6U. Определено, что результирующее значение для ИТПК (рисунок 20), с поворотным основанием (рисунок 13) и спутником внутри, составило 20,4 кг. Данная величина была получена путем суммирования масс: поворотного основания (4,45 кг); ИТПК для CubeSat 1U-6U (3,95 кг); спутника стандарта CubeSat 6U (12 кг). Общая рассчитанная масса не превышает максимального нагружения вибростенда ВИКАМ 35/14 (23,33 кг в соответствии с паспортными характеристиками устройства), что позволяет провести натурные вибродинамические испытания для спутника стандарта CubeSat 6U массой 12 кг и спутников меньшей массы [2].

Таким образом масса спроектированной оснастки для спутников CubeSat 1U-6U, благодаря изменениям ее конструкции, стала меньше на 4,85 %, в сравнении с оснасткой для спутников CubeSat 1U-3U (рисунок 18).

Для передачи крутящего момента от вала шагового двигателя к полуоси был подобран зубчатый ремень HTD 5M – 1350, основываясь на методике представленной производителем ремней компании Contitech, шириной 14,00 мм с ведущим и ведомым шкивами, диаметром 25,00 мм и 95,00 мм соответственно. Для реализации натяжения и демпфирования зубчато-ременной передачи были спроектированы соответствующие механизмы и ролики диаметром 32 мм.

2.4 Модельные испытания имитатора транспортно-пускового контейнера для спутников стандарта CubeSat 1U-6U

После оценки массовых характеристик для спроектированного устройства (ИТПК для CubeSat 1U-6U, установленного на поворотное основание) было проведено модельное исследование по определению его собственных частот (с малым воздействием гармонической волны 1g [9]) и наиболее деформируемых областей ИТПК в программе САПР SolidWorks. Предел для исследования был выбран исходя из значений частот, возникающих при наземной транспортировке (от 5 до 140 Гц согласно ECSS-E-ST-10-03C). Исследование проводилось при положениях ИТПК в горизонтальной и вертикальной плоскостях относительно стола вибростенда (рисунок 24).



а) ориентированного вертикально; б) ориентированного горизонтально
Рисунок 24 – Вид ИТПК для CubeSat 1U-6U установленного на поворотное основание

В результате модельного исследования по определению собственных частот, при горизонтальном положении ИТПК для CubeSat 1U-6U, были определены две резонансные частоты 42,25 и 75,42 Гц в плоскости Z и одна резонансная частота – 42,25 Гц для плоскостей X и Y (рисунок 25). Значения для других частот не рассматривались, поскольку в соответствии с ECSS-E-ST-10-03C для них коэффициент массового участия не превысил 10 %.

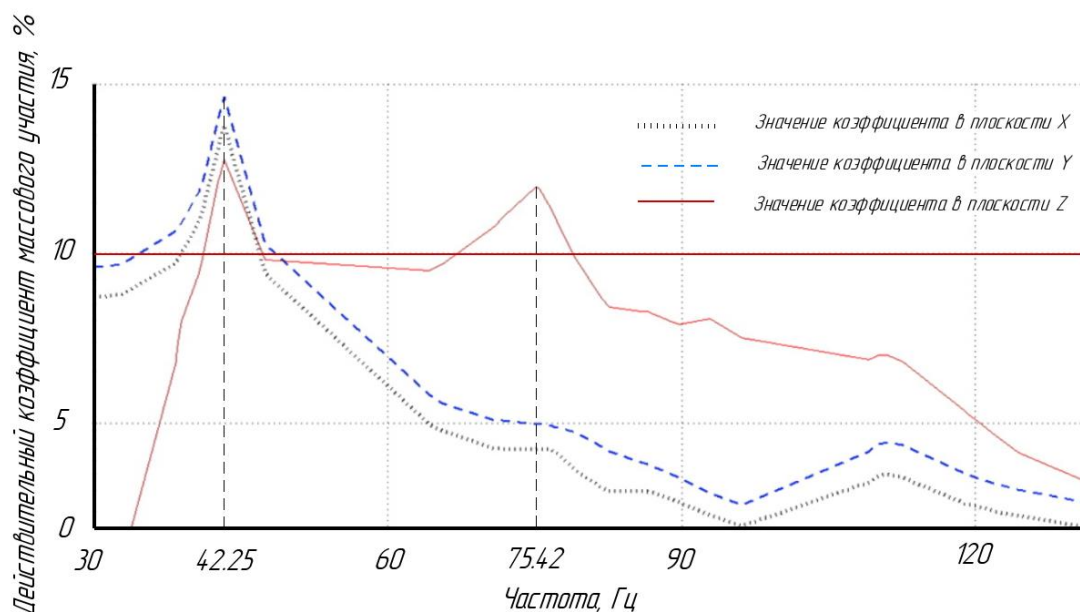


Рисунок 25 – График зависимости частоты от действительного коэффициента массового участия, полученный в ходе исследования ИТПК для спутников CubeSat 1U-6U, установленного на поворотное основание в САПР SolidWorks (в горизонтальной ориентации)

При вертикальном положении ИТПК для CubeSat 1U-6U были определены резонансные частоты 52,12 Гц в плоскостях X и Y и 48,30 Гц для плоскости Z (рисунок 26). Значения для других частот не рассматривались, поскольку в соответствии с ECSS-E-ST-10-03C для них коэффициент массового участия не превысил 10 %.

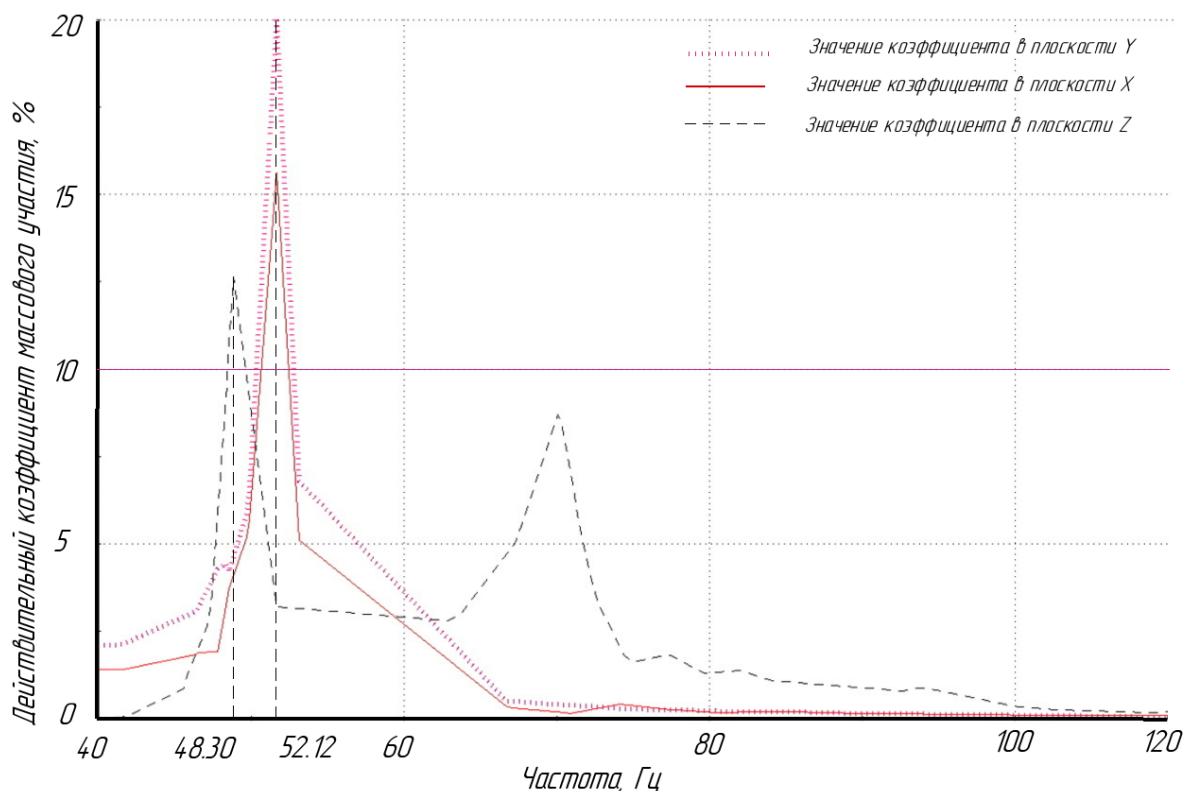


Рисунок 26 – График зависимости частоты от действительного коэффициента массового участия, полученный в ходе исследования ИТПК для спутников CubeSat 1U-6U, установленного на поворотное основание в САПР SolidWorks (в вертикальной ориентации)

Следует отметить, что при проведении моделирования в САПР SolidWorks используется наложение сетки для анализа качества которой использовался коэффициент Якобиана. Для наиболее искаженного элемента сетки он составил 6,95. Данное значение соответствует высокому качеству сетки (согласно руководству SolidWorks [25]).

В результате проведенных модельных вибродинамических испытаний было определено, что наибольшая деформация локализуется в зоне фиксации полюсей на боковых стенках ИТПК для спутников стандарта CubeSat 1U-6U, установленного на поворотное основание (рисунок 27) в горизонтальной и вертикальной ориентациях [26].

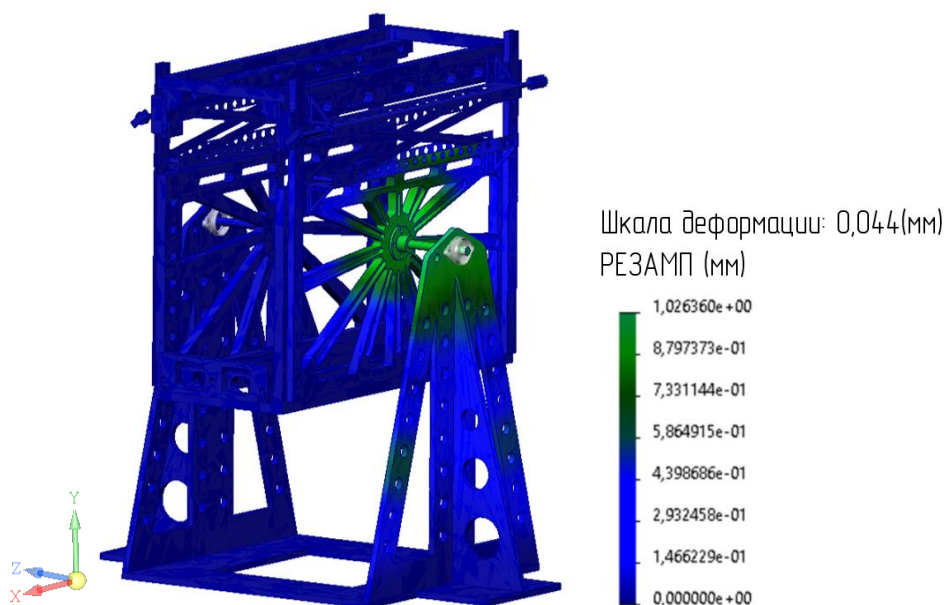


Рисунок 27 – Вид ИТПК для спутников стандарта CubeSat 1U-6U, установленного на поворотное основание после проведенных модельных вибродинамических испытаний

По результатам моделирования на воздействие гармонической волны, было определено, что при горизонтальном положении ИТПК для МКА CubeSat 1U-6U определяются две резонансные частоты 42,25 и 75,42 Гц в плоскости Z и одна резонансная частота 42,25 Гц для плоскостей X и Y. При вертикальном положении ИТПК резонансные частоты определяются на 52,12 Гц в плоскостях X и Y и на 48,30 Гц для плоскости Z. Наибольшие деформации локализуются в областях закрепления полуосей для обоих положений ИТПК.

2.5 Разработка программного обеспечения для реализации метода быстрого преобразования Фурье

В большинстве случаев при проведении вибродинамических испытаний технических изделий, при воздействии на них гармонических колебаний, в качестве выходных параметров регистрируют зависимость амплитуды от времени. При исследовании свойств механических колебаний вибростенда ВИКАМ 35/14 на соответствие, заявленных параметров его производителем, с применением регистрационного прибора “Вибротест МГ4.01”, проводилось тестирование в циклическом режиме (на частотах от 20 до 80 Гц с шагом 10 Гц, без массовой

нагрузки) в процессе которого регистрировался непрерывный во времени сигнал (рисунок 28).

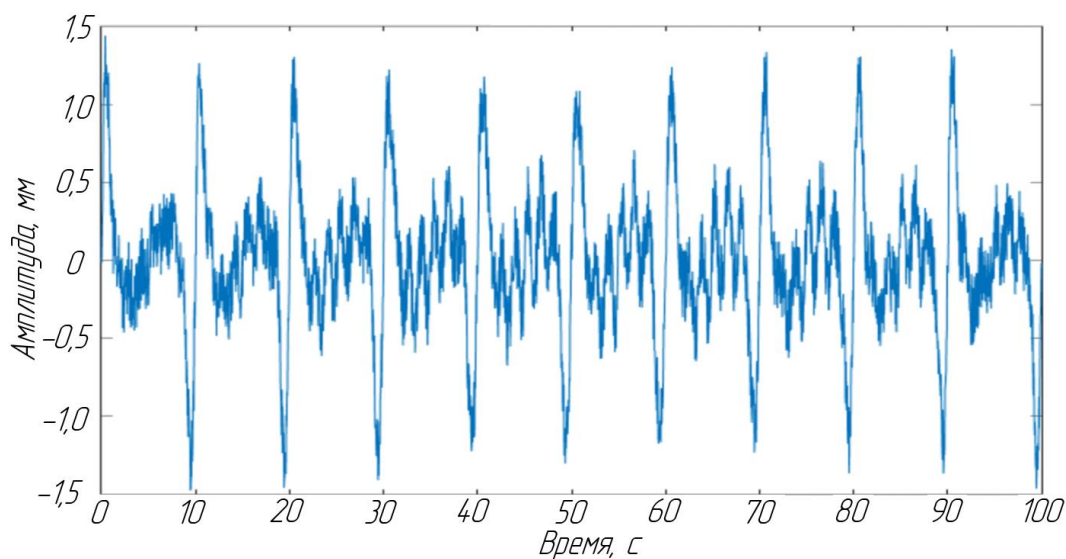


Рисунок 28 – Фрагмент зарегистрированной временной зависимости амплитуды сигнала

Регистрируемая прибором функция является периодической и полностью интегрируется, поэтому ее возможно разложить с помощью дискретного преобразования Фурье на отдельные гармоники и перейти к представлению результатов в частотной области для дальнейшего анализа (рисунок 29) [27 – 29].

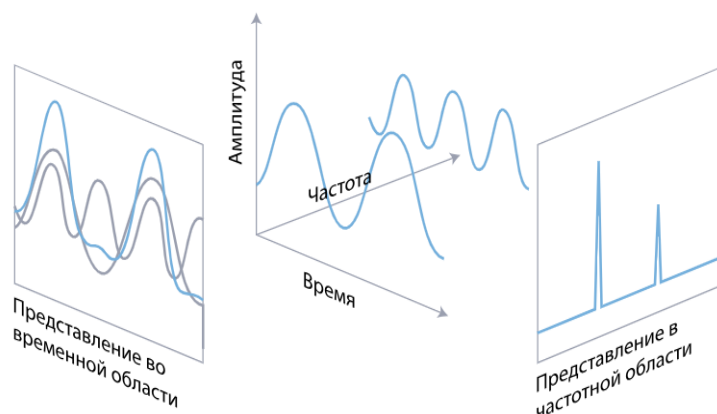


Рисунок 29 – Декомпозиция сложного сигнала методом Фурье [30]

В соответствии с вышеописанным представим полученный сигнал в виде суммы гармонических функций (синусоид и косинусоид) [27 – 29]:

$$u(x) = \frac{1}{2}a_0 + \sum_{k=1}^{\infty}[a_k \cos(2\pi f_k x) + b_k \sin(2\pi f_k x)], \quad (13)$$

где $\frac{1}{2}a_0$ – постоянное слагаемое;

a_k, b_k – коэффициенты k -ых гармонических составляющих;

f_k – частота k -ой гармонической компоненты;

x – время.

Для вычисления коэффициентов k -ых гармонических составляющих необходимо учитывать, что гармоники $\cos(2\pi f_k x)$ и $\sin(2\pi f_k x)$ ортогональны на периоде и образуют базис разложения [27 – 29]:

$$\int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \cos(2\pi f_k x) \times \cos(2\pi f_m x) dx = \begin{cases} 0 & \text{при } k \neq m \\ \frac{l}{2} & \text{при } k = m \end{cases}, \quad (14)$$

$$\int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \sin(2\pi f_k x) \times \sin(2\pi f_m x) dx = \begin{cases} 0 & \text{при } k \neq m \\ \frac{l}{2} & \text{при } k = m \end{cases}, \quad (15)$$

$$\int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \cos(2\pi f_k x) \times \sin(2\pi f_m x) dx = 0 \text{ при всех } k \text{ и } m. \quad (16)$$

Базируясь на свойстве ортогональности, коэффициенты гармоник, присутствующих в сигнале, можно вычислить по формулам [27 – 29]:

$$a_k = \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} u(x) \cos(2\pi f_k x) dx, \quad (17)$$

$$b_k = \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} u(x) \sin(2\pi f_k x) dx. \quad (18)$$

Данные формулы характеризуют каждую гармонику в сигнале косинусными и синусными составляющими, также гармоники, входящие в состав сигнала, характеризуются собственной фазой и амплитудой. Для этого можно представить уравнение (13) в следующем виде [27 – 29]:

$$u(x) = \frac{1}{2}a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} C_k \cos(2\pi f_k - \varphi_k), \quad (19)$$

где $C_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2}$ – амплитуда;

$\varphi_k = \arctg \frac{b_k}{a_k}$ – фаза гармоники на частоте f_k .

Используя представленную методику, был рассмотрен сигнал, полученный прибором “Вибротест МГ4.01” (рисунок 28) при проведении исследований свойств механических колебаний вибростенда ВИКАМ 35/14 на соответствие заявленных параметров его производителем. Во-первых, в нем отсутствует постоянная составляющая, в следствии расположения сигнала по центру оси времени. Во-вторых, в сигнале присутствуют семь гармоник с частотами: 20, 30, 40, 50, 60, 70 и 80 Гц. В-третьих, наиболее низкая частота в спектре сигнала имеет самую высокую амплитуду в сравнении с остальными. Основываясь на вышеописанном, можно представить спектр сигнала в виде графика зависимости частоты от амплитуды (рисунок 30).

Спектр сигнала

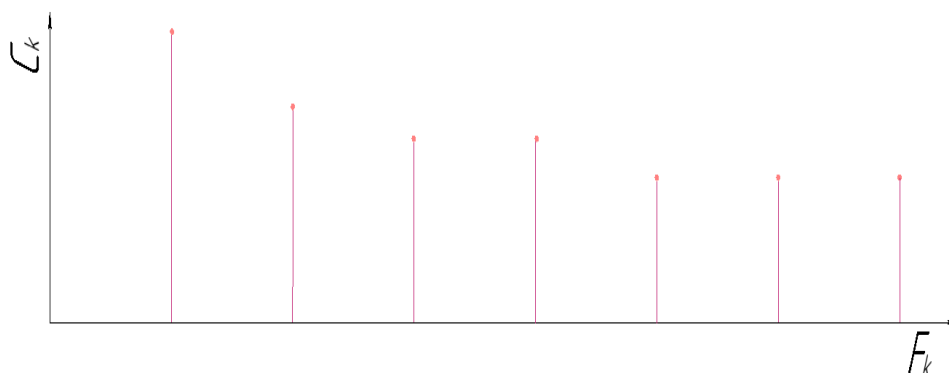


Рисунок 30 – Спектральное представление вибрационного сигнала, полученного прибором “Вибротест МГ4.01”

Анализируя графическую зависимость, представленную на рисунке 30, можно заключить, что полученный спектр вибрации соответствует заявленному производителем с некоторой погрешностью. Важно отметить, что спектр никак не меняется при сдвиге исходного сигнала по оси времени, этот сдвиг влияет только на фазовую составляющую спектра. Исходя из этого восстановление исходного сигнала по амплитудному спектру (обратная задача) сложно реализуемо без значений a_k , b_k или C_k , φ_k . Это можно продемонстрировать сравнением простых сигналов – косинусоиды и синусоиды (рисунок 31).

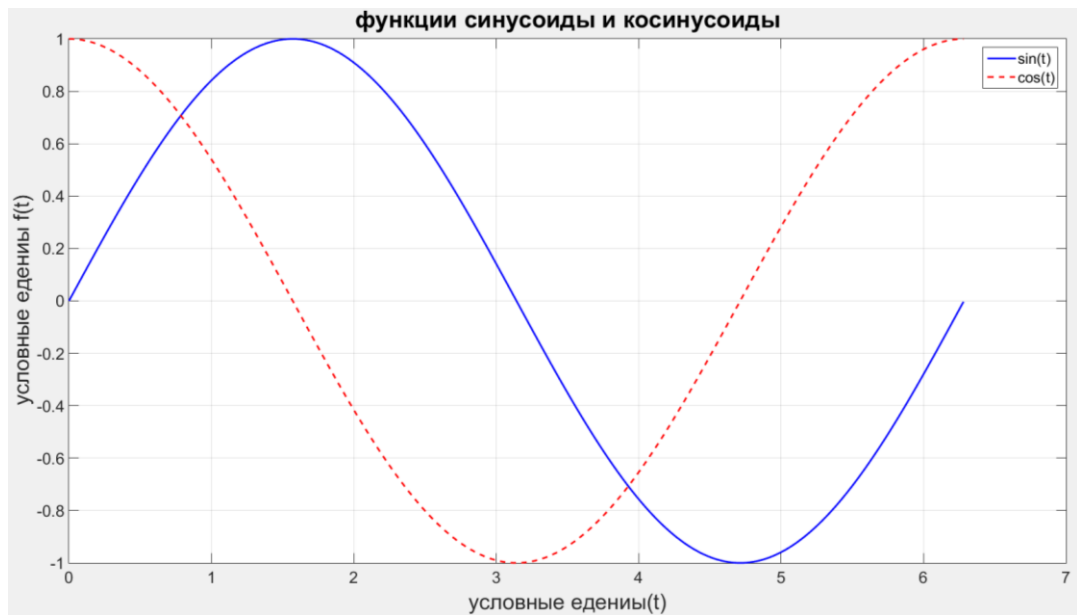


Рисунок 31 – Временная зависимость амплитуды синусоиды и косинусоиды

Данные функции имеют одинаковую амплитуду равную одной условной единице (рисунок 31). Тогда для синусоиды амплитуда $C_1 = 1$, фаза $\varphi_1 = \pi/2$. В случае косинусоиды амплитуда $C_1 = 1$, фаза $\varphi_1 = 0$. Аналогично можно показать значения коэффициентов для синусоиды: $a_1 = 0$, $b_1 = 1$, для косинусоиды: $a_1 = 1$, $b_1 = 0$. Поэтому полная характеристика сигнала задаваемая, как ранее говорилось, парами значений a_k , b_k или C_k , φ_k , оказывается различной (поскольку сами сигналы различны). Если же, использовать, например, только амплитудные составляющие это не дает возможности проанализировать какой сигнал был зарегистрирован (cos, sin или какой-то другой образованный путем сдвига вдоль временной оси гармонического сигнала) [27 – 29].

Возвращаясь к формуле (13) гармонические компоненты $\cos(2\pi f_k x)$ и $\sin(2\pi f_k x)$ можно выразить через экспоненты с мнимым аргументом следующим образом [27 – 29]:

$$\cos(2\pi f_k x) = \frac{(e^{i2\pi f_k x} + e^{-i2\pi f_k x})}{2}, \quad (20)$$

$$\sin(2\pi f_k x) = \frac{(e^{i2\pi f_k x} - e^{-i2\pi f_k x})}{2i}. \quad (21)$$

Используя полученные выражения, запишем уравнение (13) в комплексном представлении [27 – 29]:

$$u(x) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} d_k e^{i2\pi f_k x}, \quad (22)$$

Тогда спектр периодической функции d_k :

$$d_k = \frac{1}{L} \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} u(x) e^{-i2\pi f_k x} dx. \quad (23)$$

Такое представление позволяет осуществить предельный переход в случае бесконечного периода и получить непрерывное преобразование Фурье для квазипериодических сигналов.

Для перехода в дискретную область выберем моменты времени с некоторой частотой дискретизации $t_n = j\Delta t$ и значения дискретной функции в эти моменты времени $u(j) = f(j\Delta t)$, так что на полном периоде функции оказывается N точек. Подставляя выражения t_n и $u(j)$ в (23), получим [27 – 29]:

$$U(k) = \sum_{j=0}^{N-1} u(j) e^{\frac{-i2\pi f_k j}{N}}, \quad (24)$$

Данное уравнение часто применяется при компьютерных расчетах и его можно представить графически. Для этого из сигнала, представленного на рисунке 28, выделена одна из периодических функций значения которой были получены в некотором промежутке времени от 0 до 10 с. На этом промежутке имеются 16 моментов времени соответствующие значениям функций (количество моментов времени и значений функции взято в качестве примера), тогда значение первого коэффициента Фурье можно записать как [27 – 29]:

$$U_1 = u_0 + u_1 e^{\frac{-2\pi i}{16}} + \dots + u_{15} e^{\frac{-2\pi i 15}{16}}. \quad (25)$$

Данное уравнение представляет собой сумму комплексных экспонент, которые являются поворотными множителями векторов первого коэффициента Фурье. Графическое изображение комплексной экспоненты одной из гармоник сигнала, созданное в MATLAB, состоящей из 16 векторов, представлено на рисунке 32.

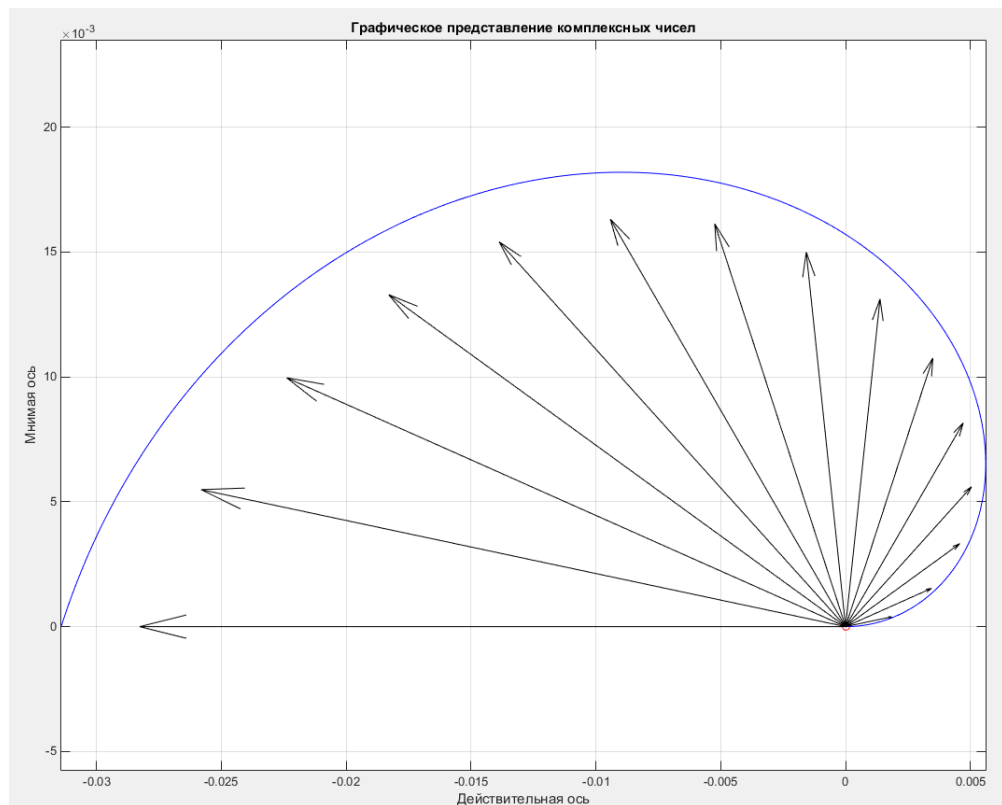


Рисунок 32 – Графическое представление комплексных экспонент, образующих годограф, для первого коэффициента Фурье

Сложив все 16 векторов по правилу векторной суммы, получим значение первого коэффициента Фурье – U_1 . Данный коэффициент представляет информацию об амплитуде и фазе компоненты дискретного сигнала на частоте, соответствующей данному коэффициенту, для N-точечного отсчета. Аналогичным образом, в рассматриваемом случае, рассчитываются оставшиеся 15 коэффициентов Фурье. Таким образом, количество операций, реализующихся дискретным преобразованием Фурье, при определении всех коэффициентов, соответствует N^2 , так как для каждого коэффициента необходимо выполнить N умножений и N-1 сложений [27 – 29].

Для уменьшения количества расчетов коэффициентов Фурье применяют алгоритм быстрого преобразования Фурье. Его суть заключается в разбиении всех имеющихся коэффициентов на четные и не четные с дальнейшим разбиением до достижения пар коэффициентов [27 – 29]:

$$U(k) = \sum_{j=0}^{N-1} u(j)e^{\frac{-i2\pi f_k j}{N}} \rightarrow U(k) = \sum_{j=0}^{(N/2)-1} u(2j)e^{\frac{-i2\pi(2j)f_k}{N}} + \sum_{j=0}^{(N/2)-1} u(2j+1)e^{\frac{-i2\pi(2j+1)f_k}{N}}. \quad (26)$$

Далее с учетом общеизвестных математических операций и замен [27 – 29]:

$$W_N = e^{-i2\pi/N}; \quad (27)$$

$$(W_{N/2})^{j(f_k+N/2)} = -(W_N)^{f_k}. \quad (28)$$

Преобразовав выражение (26) для первой и второй половин коэффициентов Фурье с учетом (27) и (28) [27 – 29], получаем (29) и (30):

$$U(k) = \sum_{j=0}^{(N/2)-1} u(2j) \times (W_{N/2})^{f_k j} + (W_N)^{f_k} \sum_{j=0}^{(N/2)-1} u(2j+1) \times (W_{N/2})^{f_k j}, \quad (29)$$

$$U(k + N/2) = \sum_{j=0}^{(N/2)-1} u(2j) \times (W_{N/2})^{f_{kj}} - (W_N)^{f_k} \sum_{j=0}^{(N/2)-1} u(2j + 1) \times (W_{N/2})^{f_{kj}}. \quad (30)$$

Выражения (29) и (30) позволяют определить коэффициенты Фурье для первой $U(k)$ и второй $U(k + N/2)$ половин сигнала, которые являются идентичными за исключением знака перед поворотным множителем $(W_N)^{f_k}$ в формуле (30).

Полученные выражения (29) и (30) называются операцией “Бабочка” в следствии своего графического представления (рисунок 33) [27 – 29].

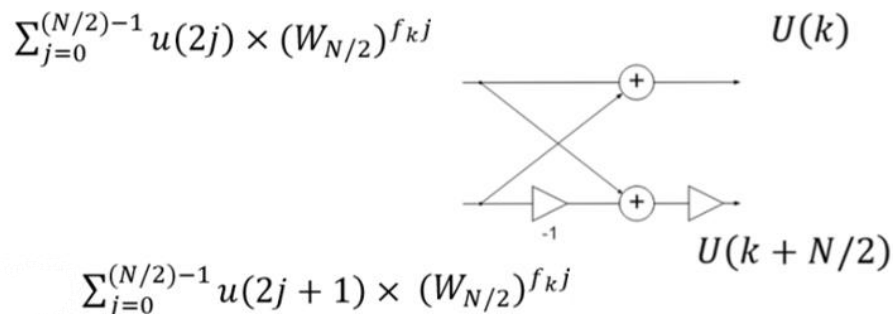


Рисунок 33 – Графическое представление выражений (29) и (30): операция “Бабочка”

Схема, представленная на рисунке 33 является основой быстрого преобразования Фурье. В рассматриваемом случае для сигнала с 16 дискретными значениями функции схема разбиения по времени будет выглядеть следующим образом (рисунок 34).

Анализируя рисунок 34, можно заключить, что общее количество коэффициентов Фурье пропорционально N , при этом количество разбиений коэффициентов на четные и не четные равно $\log_2 N$, откуда общее количество вычислений будет равно $N \log N$ [27 – 29].

Таким образом, быстрое преобразование Фурье значительно сокращает количество математических операций и позволит более эффективно рассчитать значения собственных частот и их амплитуд для ИТПК для спутников стандарта CubeSat 1U-6U, установленного на поворотное основание, в сравнении с ДПФ.

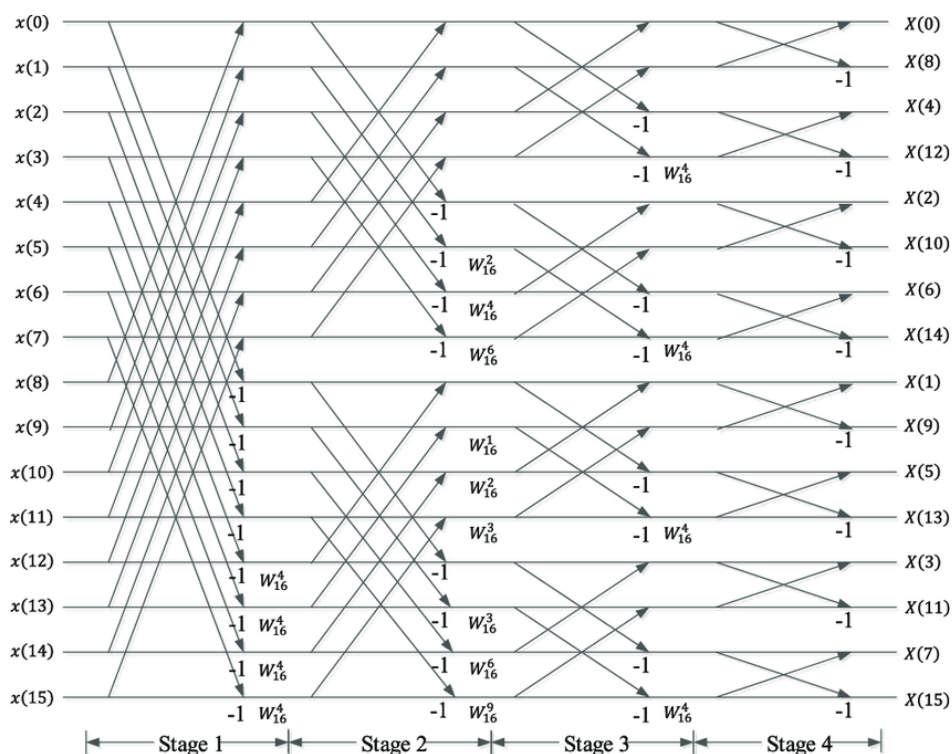


Рисунок 34 – Графическая схема реализации БПФ для сигнала с 16 дискретными значениями функции, с разбиением по времени [31]

К особенностям метода БПФ, которые были учтены в данной диссертации, можно отнести: во-первых, в следствии рекурсивной структуры метода, расчет удастся, если количество точек $N = 2^m$. Во-вторых, количество значений $U(k)$ совпадает с количеством точек в сигнале N . Таким образом, фактически оказывается, если вывести на график модули $U(k)$, то получится, что вторая половина этого графика (высокие частоты) зеркальна первой половине (низкие частоты). Для решения данной проблемы применяют теорему Найквиста–Котельникова. В-третьих, рассмотренные методы БПФ и ДПФ не позволяют определить время изменения частоты и/или амплитуды изменяющегося сигнала. В таком случае используют вейвлет-преобразование или оконное преобразование Фурье [27 – 29].

Для программной реализации алгоритма БПФ использовалась среда MATLAB, которая имеет встроенную функцию *fft* (быстрое преобразование Фурье). Данная встроенная функция использовалась для создания программы, реализующей преобразования значений временной зависимости амплитуды,

регистрируемых прибором “Вибротест МГ4.01”, в частотную зависимость амплитуды [27 – 29].

В первую очередь в разработанную программу (приложение Г) вносятся значения амплитуд и время их регистрации, далее указывается значение погрешности измерений (рисунок 35), в соответствии с паспортом прибора “Вибротест МГ4.01”.

```
% Погрешность изменений ±5  
noise = (rand(size(t)) * 10 - 5);  
vibration = vibration + noise;
```

Рисунок 35 – Фрагмент программного кода для задания погрешности изменений

После проделанных операций производится запуск программы на исполнение, выполняющий быстрое преобразование Фурье (рисунок 36) [27 – 29].

```
% Выполнение Быстрого Преобразования Фурье  
Y = fft(vibration);  
n = length(Y);  
Fs = 1 / (t(2) - t(1));  
f = (0:n-1) * Fs / n;
```

Рисунок 36 – Фрагмент программного кода, выполняющий быстрое преобразование Фурье

После выполнения БПФ программа, в режиме окна выводит два графика: временной зависимости амплитуды и частотной зависимости амплитуды для их дальнейшего анализа (рисунок 37) [27 – 29].

```
% Построение графика временного сигнала  
figure; % Первое окно для временного сигнала  
plot(t, vibration);  
xlabel('Время, с');  
ylabel('Амплитуда, мм');  
title('Вибрация с погрешностью измерений');  
  
frequency_ranges = [40 60];  
figure;  
plot(f(1:floor(n/2)+1), P1); % Отображение амплитудного спектра  
xlabel('Частота, Гц');  
ylabel('Амплитуда');  
title('Амплитудный спектр');
```

Рисунок 37 – Фрагмент программного кода, реализующий построение графиков

Для проверки работоспособности разработанной, был использован массив данных, полученный при тестировании свойств механических колебаний вибростенда ВИКАМ 35/14 на соответствие, заявленных параметров его производителем. В результате была получена частотная зависимость амплитуды сигнала (рисунок 38) [27 – 29].

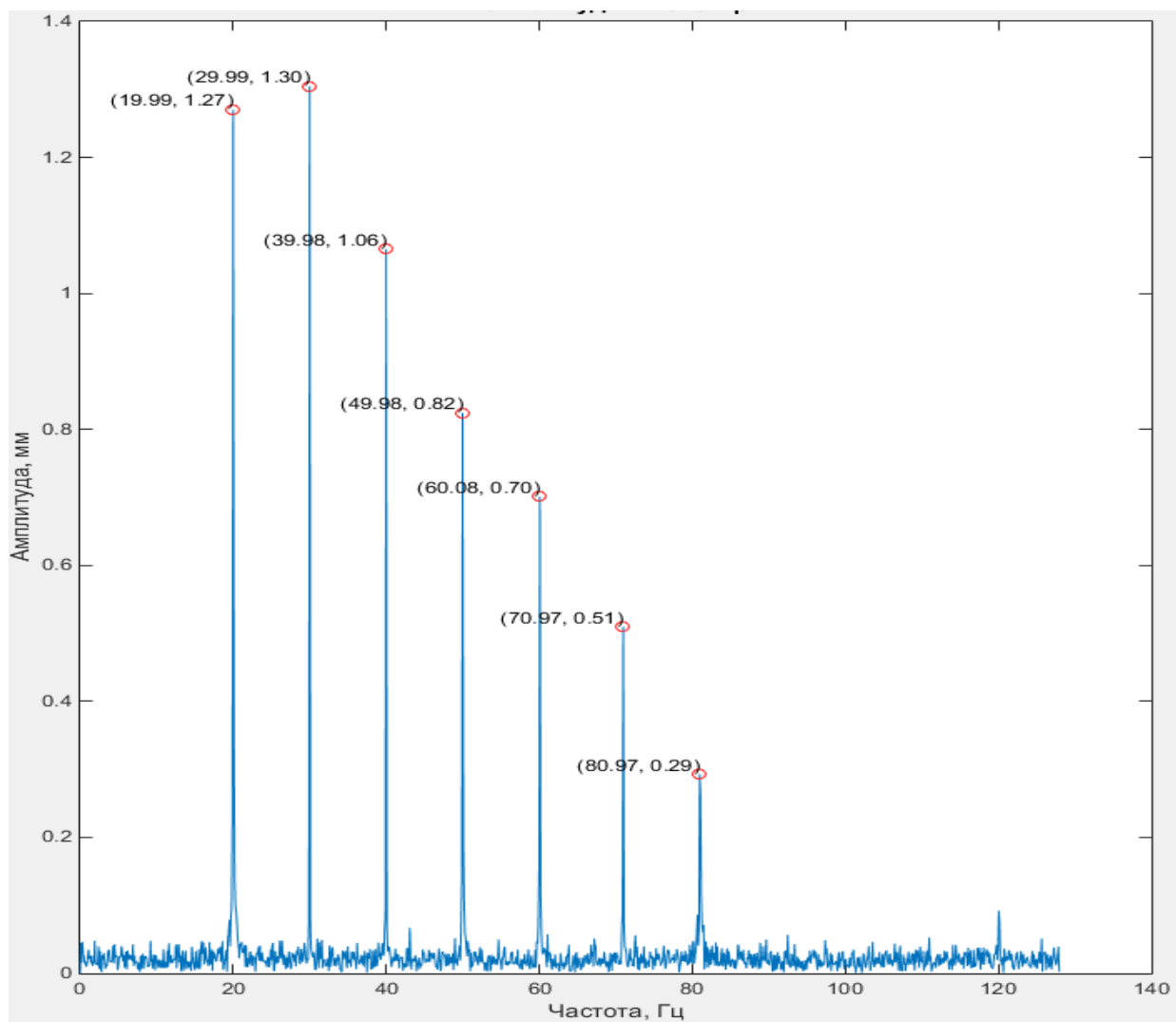


Рисунок 38 – Частотная зависимость амплитуды сигнала

Анализ полученной зависимости показал соответствие заявленных производителем характеристик вибростенда ВИКАМ 35/14 с расчетными значениями, представленными на графике. Расхождения с паспортными данными вибростенда не превысили 5 % (для частот и амплитуд), что удовлетворяет требованиям сходимости результатов измерений согласно ГОСТ Р ИСО 5725-1-2002 пункт 3.16.

Таким образом, было установлено для ДПФ количество реализующихся расчетов, при определении всех коэффициентов Фурье соответствует N^2 , так как для каждого коэффициента необходимо выполнить N умножений и $N-1$ сложений. При использовании быстрого преобразования Фурье, установлено, что общее количество коэффициентов Фурье пропорционально N , при этом количество разбиений коэффициентов на четные и не четные равно $\log_2 N$, откуда общее количество вычисления будет равно $N \log N$.

На основе разработанной программы, после анализа обработанных данных полученных при тестировании свойств механических колебаний вибростенда ВИКАМ 35/14, показано, что заявленные производителем характеристики устройства согласуются с полученными в программе. Расхождения сравниваемых данных не превысили 5 % (для частот и амплитуд), что удовлетворяет требованиям сходимости результатов измерений согласно ГОСТ Р ИСО 5725-1-2002 пункт 3.16. Исходя из этого разработанная программа может применяться для обработки данных ВДИ спутников стандарта CubeSat и не только. Разработанная программа была запатентована № 2023686517 от 07.12.2023, приложение Д.

2.6 Исследование спектральных характеристик имитатора транспортно-пускового контейнера при проведении вибродинамических испытаний

После моделирования в программе САПР SolidWorks, на собственные частоты спроектированного ИТПК для CubeSat 1U-6U (далее ИТПК) и определения наиболее деформируемых его областей, был изготовлен экспериментальный образец устройства, который стал основой комплекса (рисунок 39) и прошел натурные испытания.

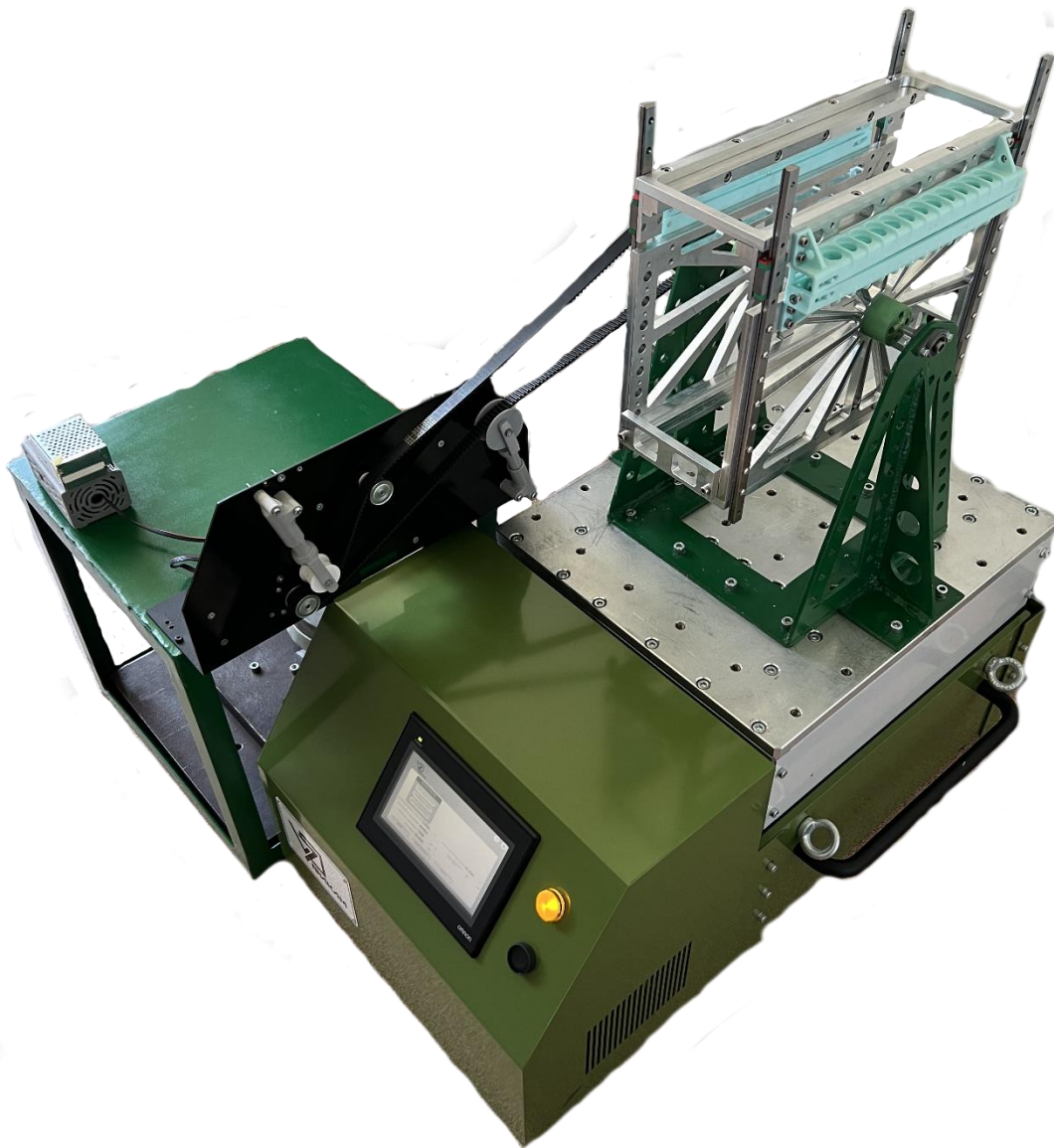


Рисунок 39 – Фотография экспериментального образца ИТПК для наноспутников стандарта CubeSat 1U-6U, установленного на поворотное основание, входящего в состав комплекса

Материалом рамы (стенки, крышка, основание и т.д.) ИТПК стал алюминий марки АМг2М. Направляющие MGN12C длиной 350 мм были выбраны из стандартных элементов станков ЧПУ. Фланцы полуосей были распечатаны на 3D принтере из ABS пластика с заполнением 100 %. Поворотное основание было изготовлено из стали марки 20К (материалы изготовленного образца соответствовали модельным). Итоговая масса изготовленного образца ИТПК, установленного на поворотное основание, составила 20,5 кг (рисунок 40).



Рисунок 40 – Фотография экспериментального образца ИТПК для наноспутников стандарта CubeSat 6U, установленного на поворотное основание

Экспериментальный образец ИТПК, установленный на поворотное основание, был протестирован на наличие собственных частот, на вибростенде ВИКАМ 35/14 (в соответствии с методикой, предоставленной в ECSS-E-ST-10-03С, описанной в пункте 1.3). Значение спектральной плотности ускорения соответствовало максимальному, возникающему при наземной транспортировке ТПК со спутником в составе ракета-носителя Союз-2.1б и составило $0,02 \text{ g}^2/\text{Гц}$. Частотный диапазон был выбран в соответствии с данными, полученными модельно (от 20 до 80 Гц). Изменение частоты на первом и втором этапах испытаний составляло 0,5 окт/мин [9 – 11]. Значение виброускорения на первом этапе равнялось

1,7g на втором этапе 2g. Испытания проводились дважды для горизонтального и вертикального положений ИТПК, в соответствии с моделированием в Solid-Works (пункт 2.4).

Регистрирующий одноосный датчик закреплялся в наиболее деформируемых областях, определенных ранее при модельных испытаниях (рисунок 41). Чтобы получить данные для других ортогональных плоскостей, испытания на короткое время приостанавливались для смены ориентации датчика. Управляющая точка крепления датчика была выбрана в соответствии с ГОСТ 28203-89 пункт 3.3.



Рисунок 41 – Фотография вибродатчика закрепленного на боковой стенке ИТПК, в области крепления его полуоси

В ходе ВДИ для горизонтального, так же как и для вертикального, положений ИТПК, было получено по два массива данных (массив для первого и второго этапа испытаний), используя которые были построены графики зависимости амплитуды от времени сигнала, зарегистрированного вибродатчиком. Данные зависимости представлены на рисунках 42 – 47.

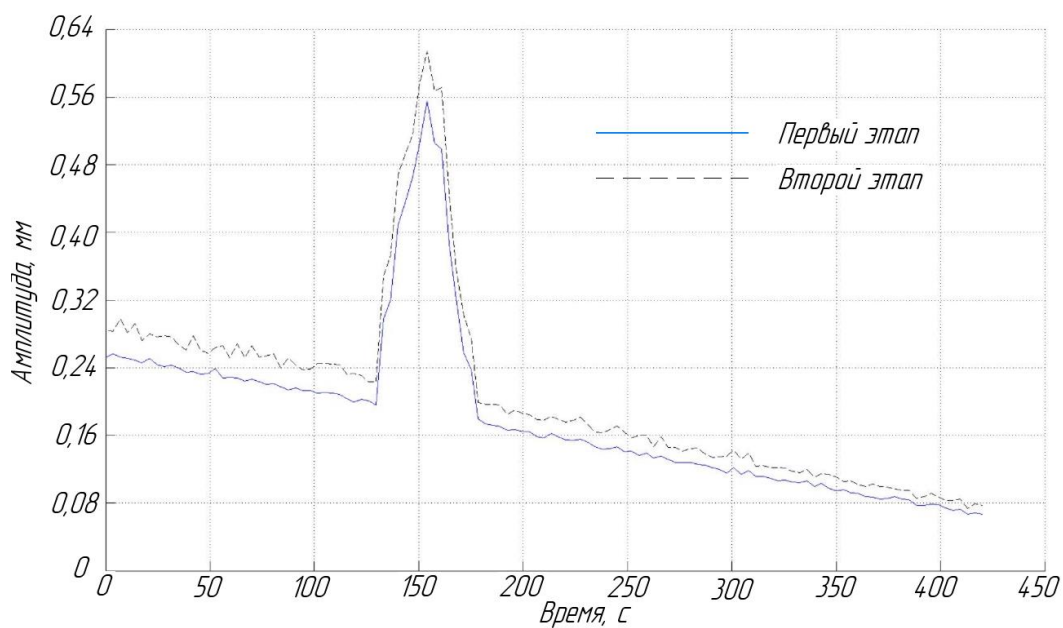


Рисунок 42 – Временная зависимость амплитуды сигнала, полученного вдоль оси X, при ориентации ИТПК в горизонтальной плоскости

Анализируя рисунок 42, можно заключить, что в диапазоне от 100 до 200 с для обоих графиков наблюдается одна резонансная частота, пиковое значение амплитуды которой локализуется ближе к 150 с испытания.

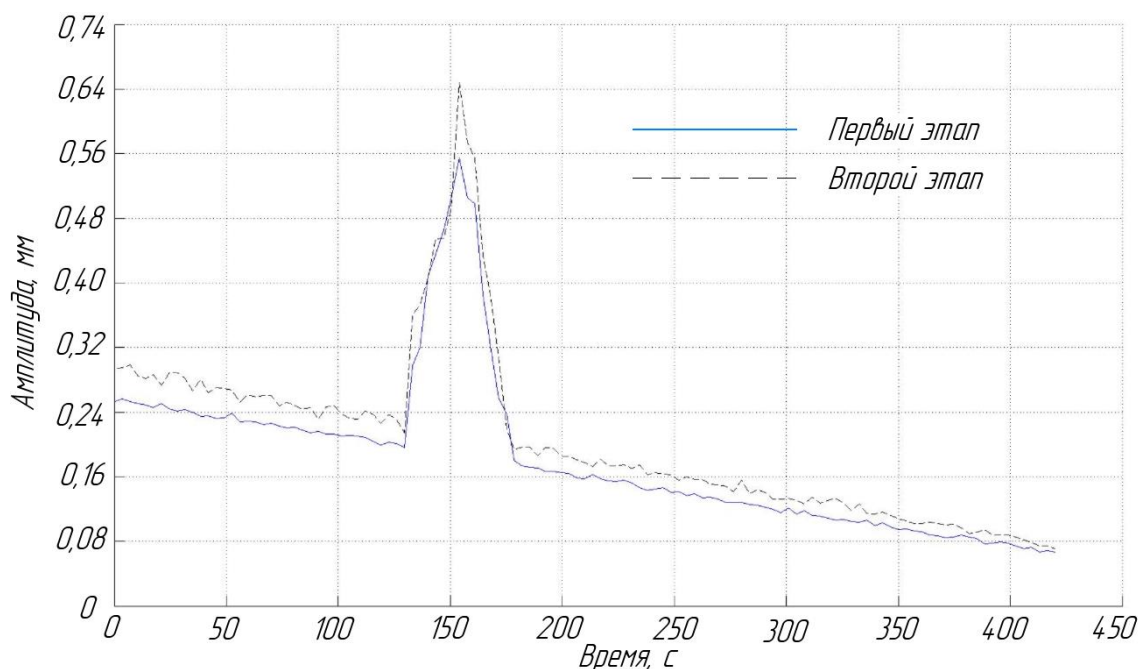


Рисунок 43 – Временная зависимость амплитуды сигнала, полученного вдоль оси Y, при ориентации ИТПК в горизонтальной плоскости

Анализируя рисунок 43, можно заключить, что в диапазоне от 100 до 200 с для обоих графиков наблюдается одна резонансная частота, пиковое значение амплитуды которой локализуется ближе к 150 с испытания.

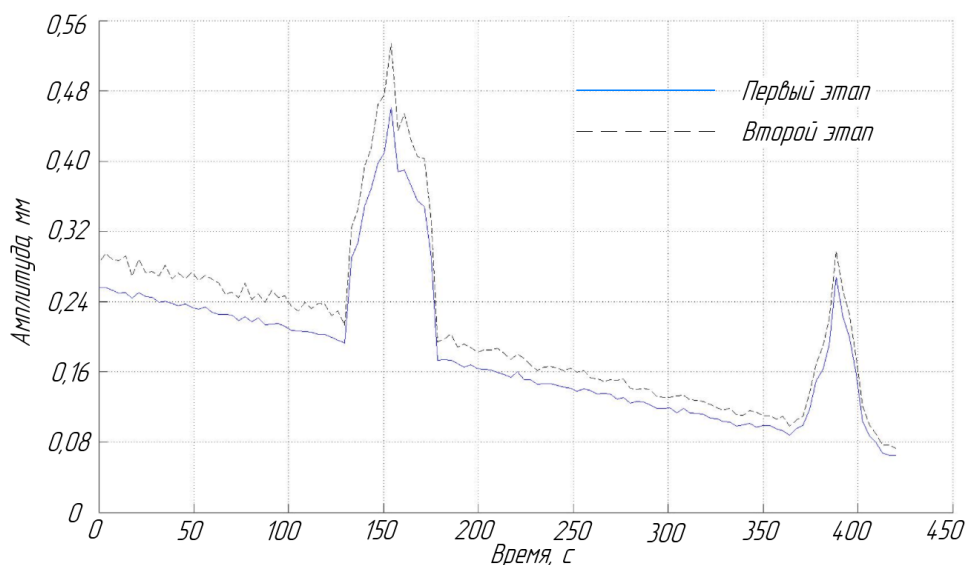


Рисунок 44 – Временная зависимость амплитуды сигнала, полученного вдоль оси Z, при ориентации ИТПК в горизонтальной плоскости

Анализируя рисунок 44, можно заключить, что в диапазонах от 100 до 200 с и от 350 до 450 с для обоих графиков наблюдаются две резонансные частоты, пиковые значения амплитуд которых локализуется ближе к 150 с и 400 с испытания соответственно.

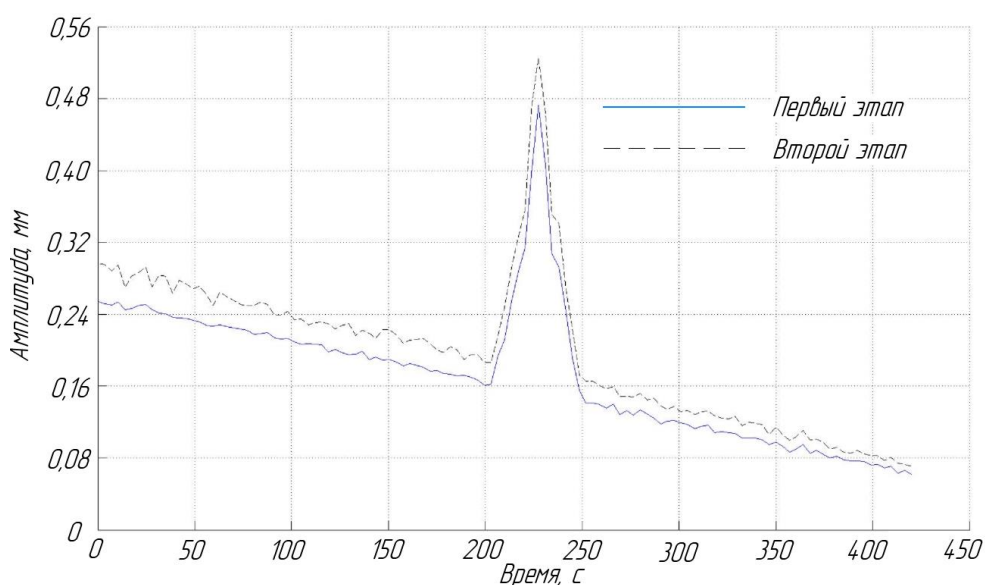


Рисунок 45 – Временная зависимость амплитуды сигнала, полученного вдоль оси X, при ориентации ИТПК в вертикальной плоскости

Анализируя рисунок 45, можно заключить, что в диапазоне от 200 до 250 с для обоих графиков наблюдается одна резонансная частота, пиковое значение амплитуды которой локализуется ближе к 225 с испытания.

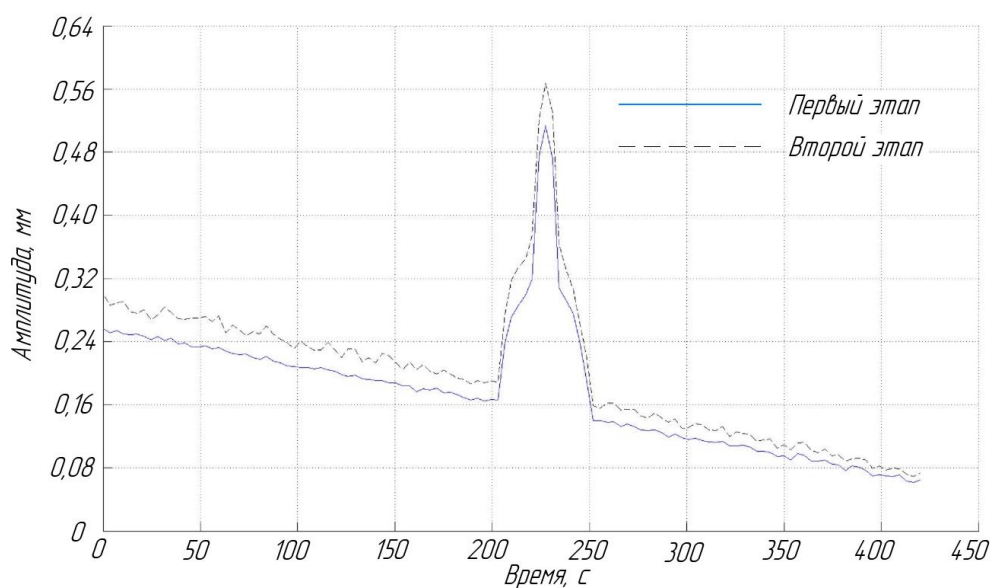


Рисунок 46 – Временная зависимость амплитуды сигнала, полученного вдоль оси Y, при ориентации ИТПК в вертикальной плоскости

Анализируя рисунок 46, можно заключить, что в диапазоне от 200 до 250 с для обоих графиков наблюдается одна резонансная частота, пиковое значение амплитуды которой локализуется ближе к 225 с испытания.

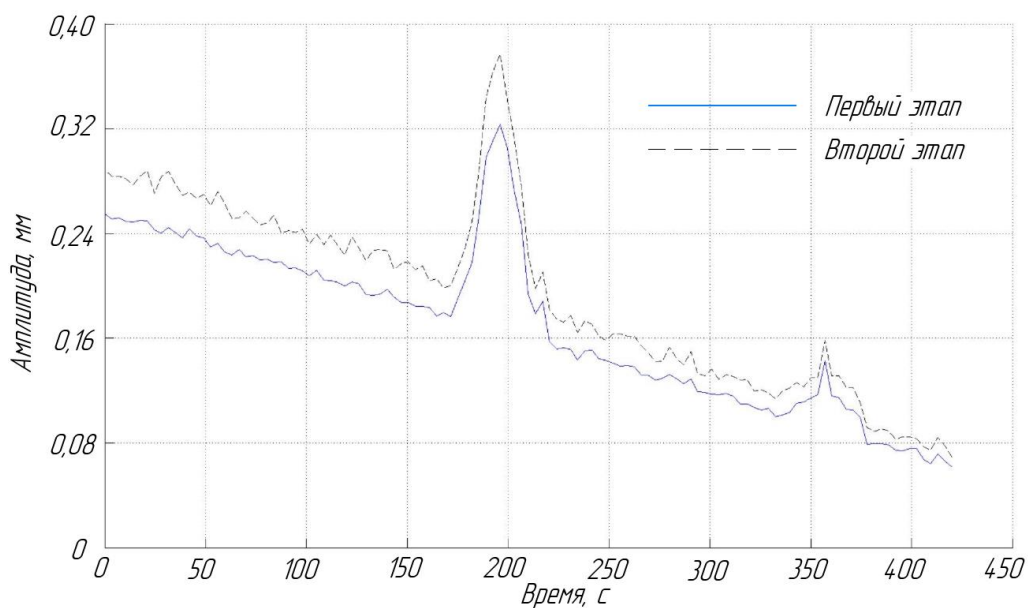
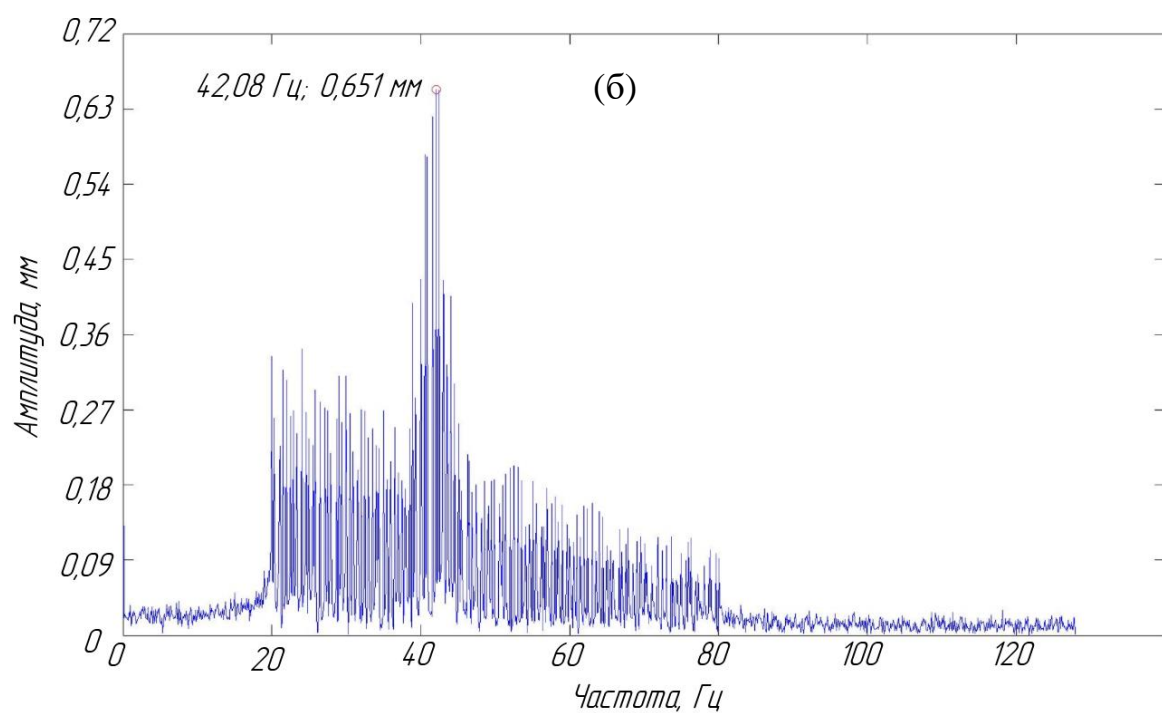
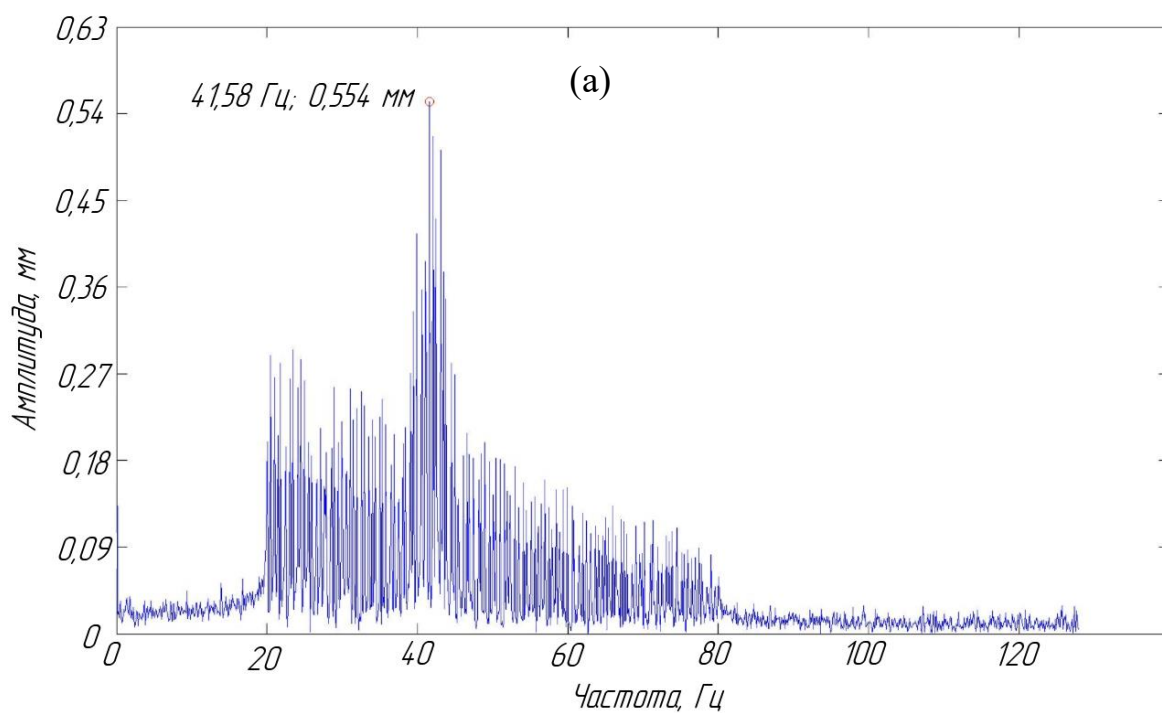


Рисунок 47 – Временная зависимость амплитуды сигнала, полученного вдоль оси Z, при ориентации ИТПК в вертикальной плоскости

Анализируя рисунок 47, можно заключить, что в диапазонах от 150 до 250 с и от 300 до 400 с для обоих графиков наблюдаются две резонансные частоты, пиковые значения амплитуд которых локализуется ближе к 200 с и 350 с испытания соответственно. Второй пик малой амплитуды, в дальнейшем не будет анализироваться, поскольку для него коэффициент массового участия не превысил 10 % в соответствии с модельными испытаниями по определению резонансных частот (пункт 2.4).

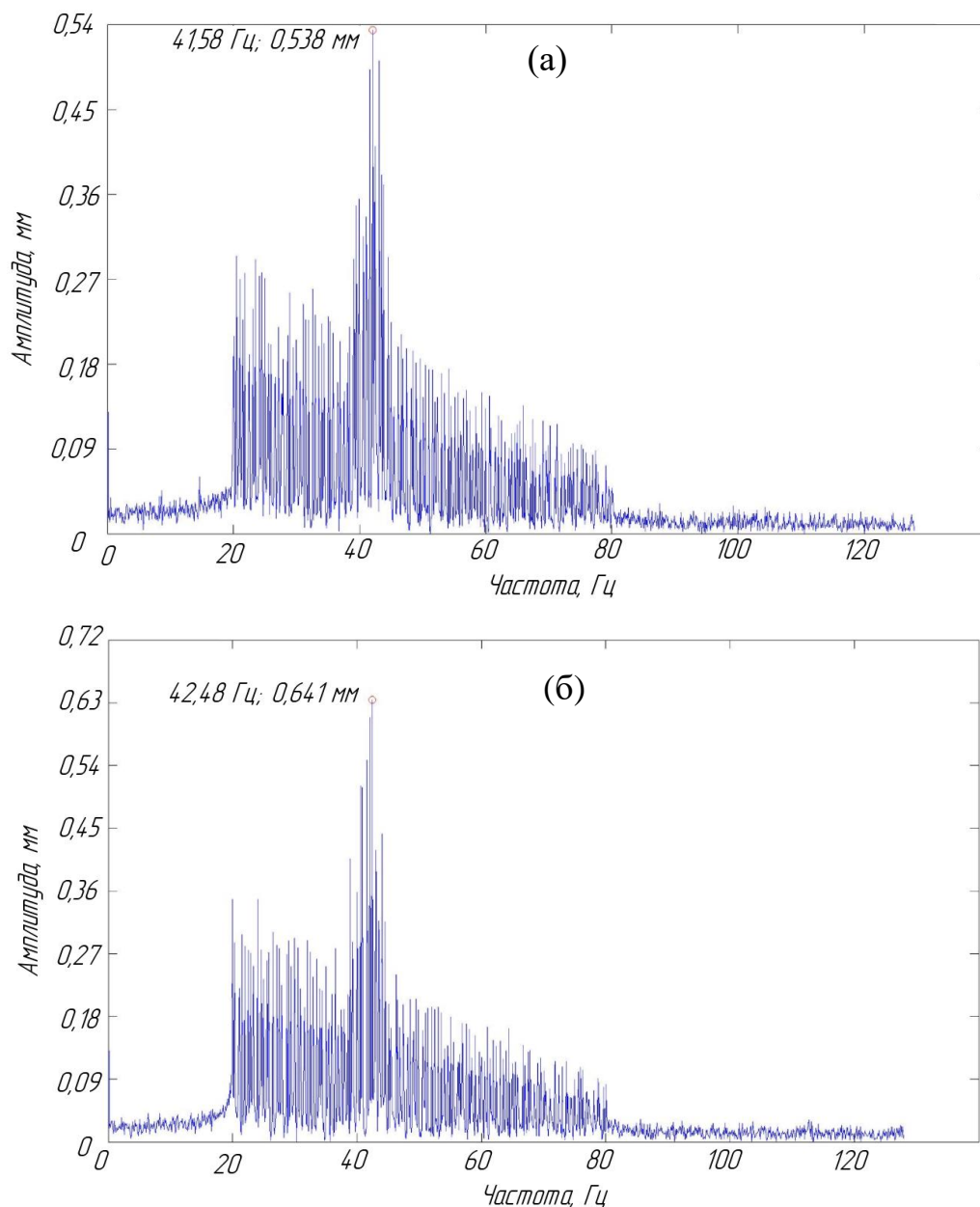
Из выше представленных графиков (рисунки 48 –53) видно, что в некоторый момент времени наблюдается как минимум одна резонансная частота для каждой взаимно ортогональной оси в обеих ориентациях ИТПК. Для локализации значений резонансных частот и уточнения их амплитуд, полученные массивы данных обрабатывались программой, представленной в пункте 2.5. В результате программной обработки данных ВДИ с использованием БПФ, были получены графики зависимости частоты от амплитуды сигнала для вертикальной и горизонтальной ориентаций ИТПК для каждой ортогональной оси.

Анализируя представленные на рисунке 48 графики частотной зависимости амплитуды сигнала полученного при ориентации ИТПК в горизонтальной плоскости, вдоль оси X, можно заключить: для первого этапа испытаний, на частоте 41,58 Гц наблюдался резонанс с амплитудой 0,554 мм; для второго этапа испытаний – на частоте 42,08 Гц наблюдался резонанс с амплитудой 0,651мм. Сравнивая полученные результаты видно, что расхождения частот составляют 1,2 %, а амплитуд – 17,51 %, что удовлетворяет требованиям стандарта ECSS-E-ST-10-03С, при проведении синусоидальных ВДИ.



а) первый этап испытания; б) второй этап испытания

Рисунок 48 – Частотная зависимость амплитуды сигнала полученного при ориентации ИТПК в горизонтальной плоскости, вдоль оси X

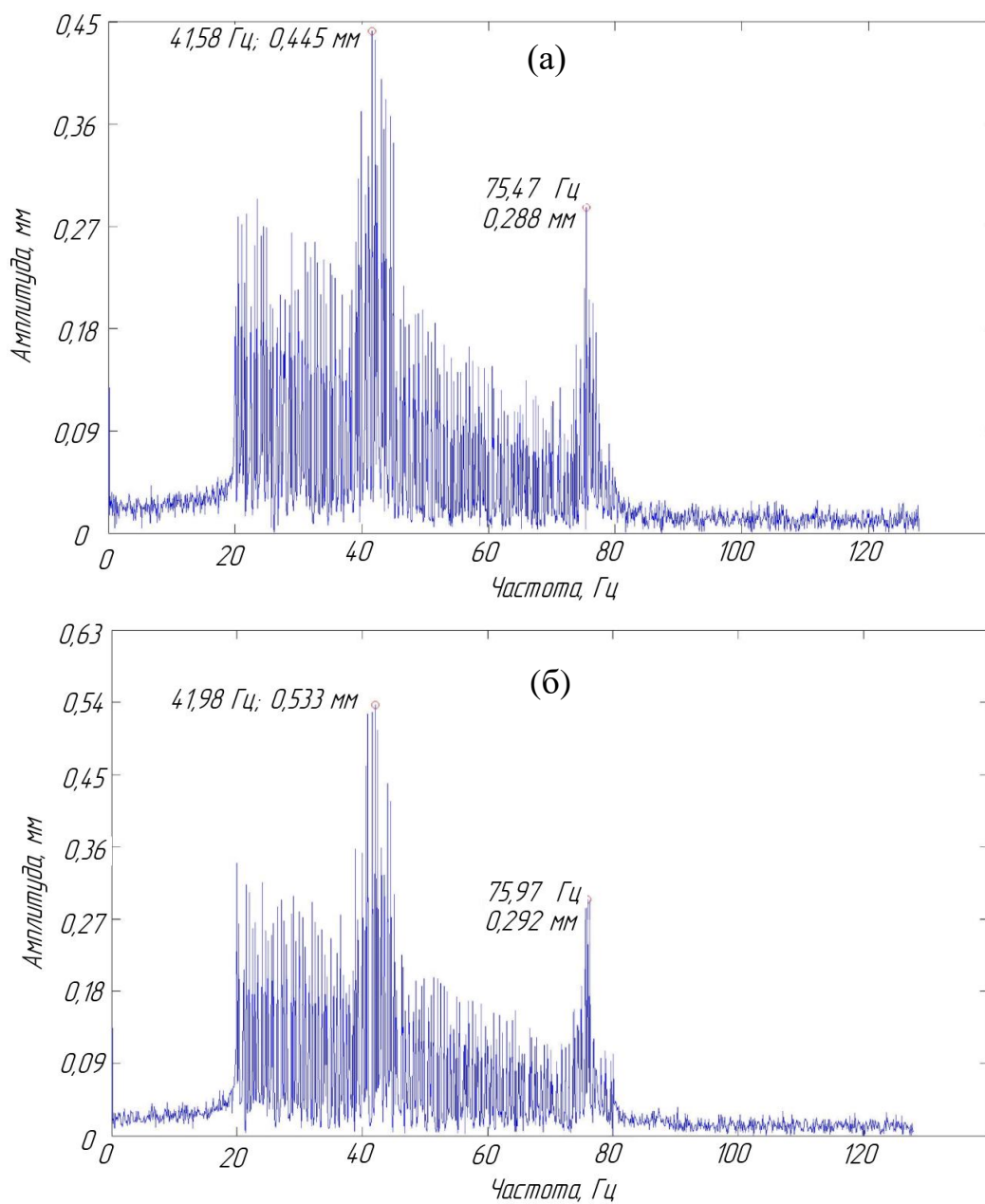


а) первый этап испытания; б) второй этап испытания

Рисунок 49 – Частотная зависимость амплитуды сигнала полученного при ориентации ИТПК в горизонтальной плоскости, вдоль оси Y

Анализируя представленные графики частотной зависимости амплитуды сигнала, полученного при ориентации ИТПК в горизонтальной плоскости, вдоль оси Y, можно заключить: для первого этапа испытаний, на частоте 41,58 Гц наблюдался резонанс с амплитудой 0,538 мм; для второго этапа испытаний – на частоте 42,48 Гц наблюдался резонанс с амплитудой 0,641мм. Сравнивая полученные результаты видно, что расхождения частот составляют 2,16 %, а амплитуд

– 19,14 %, что удовлетворяет требованиям стандарта ECSS-E-ST-10-03С, при проведении синусоидальных ВДИ.

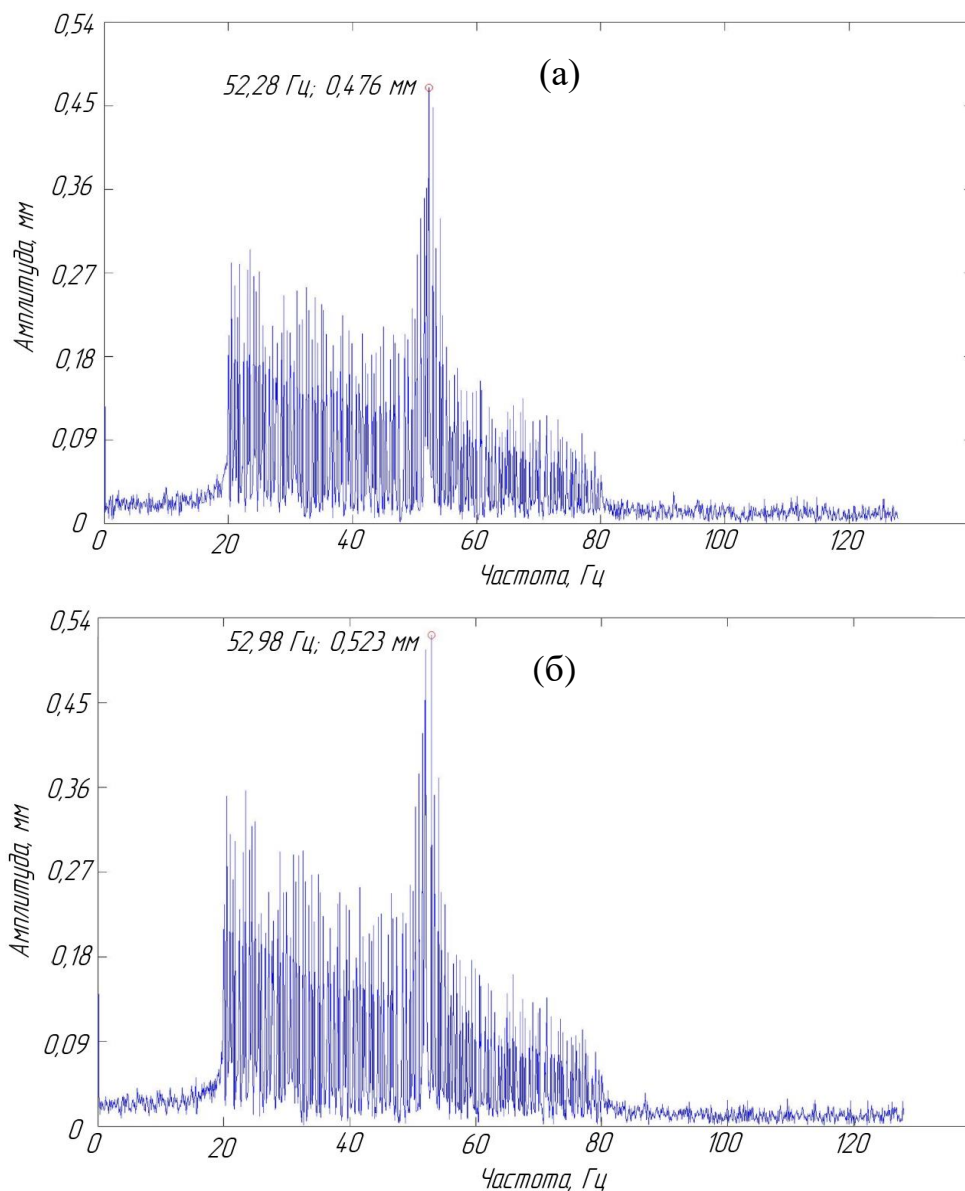


а) первый этап испытания; б) второй этап испытания

Рисунок 50 – Частотная зависимость амплитуды сигнала полученного при ориентации ИТПК в горизонтальной плоскости, вдоль оси Z

Анализируя представленные графики частотной зависимости амплитуды сигнала, полученного при ориентации ИТПК в горизонтальной плоскости, вдоль оси Z, можно заключить: для первого этапа испытаний, на частотах 41,58 Гц и 75,47 Гц наблюдался резонанс с амплитудами 0,445 и 0,288 мм соответственно;

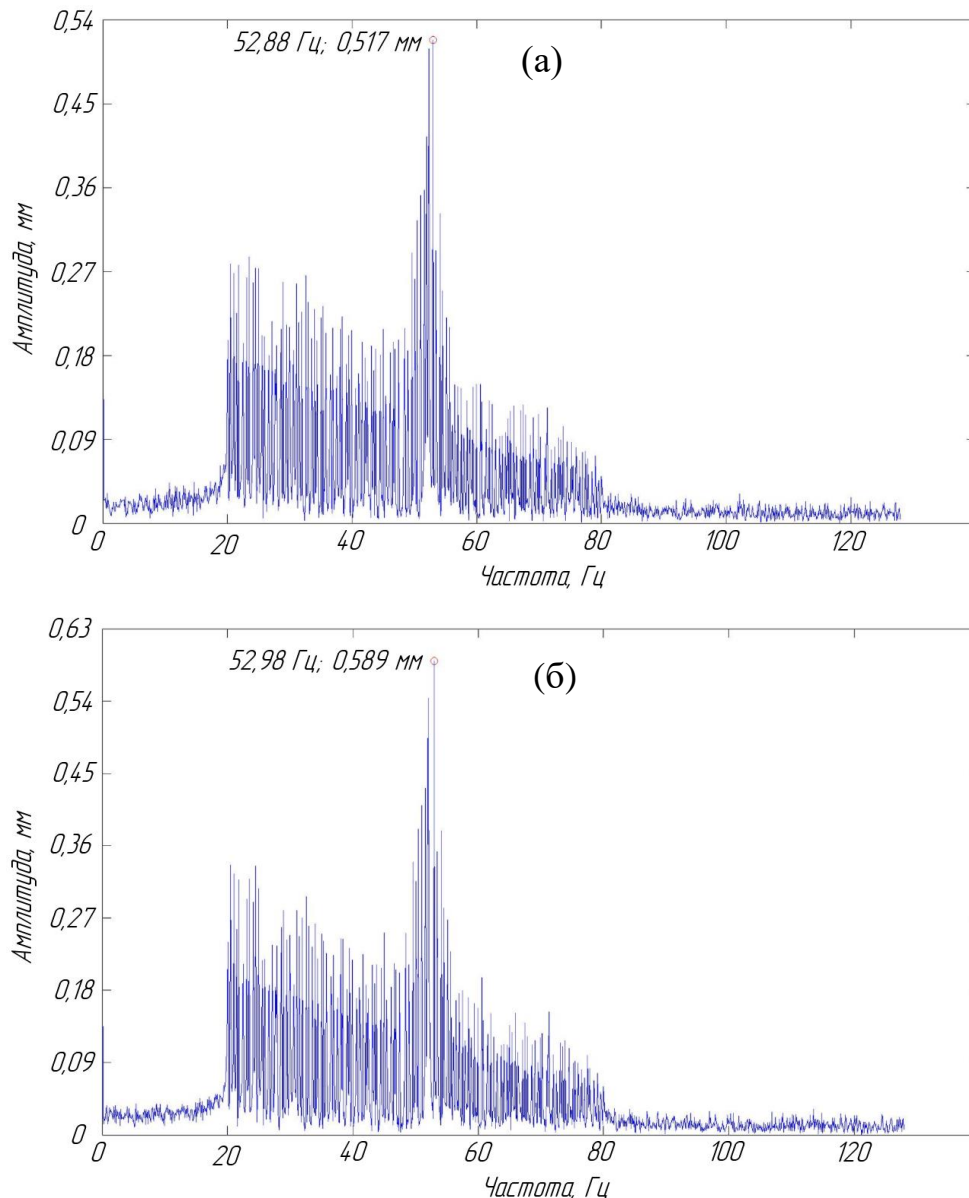
для второго этапа испытаний – на частотах 41,98 Гц и 75,97 Гц наблюдался резонанс с амплитудами 0,533 и 0,292 мм соответственно. Сравнивая полученные результаты видно, что расхождения частот составляют 0,96 % и 0,66 % (малый пик) соответственно, а амплитуд – 19,78 % и 1,39 % (малый пик) соответственно, что удовлетворяет требованиям стандарта ECSS-E-ST-10-03С, при проведении синусоидальных ВДИ.



а) первый этап испытания; б) второй этап испытания

Рисунок 51 – Частотная зависимость амплитуды сигнала полученного при ориентации ИТПК в вертикальной плоскости, вдоль оси X

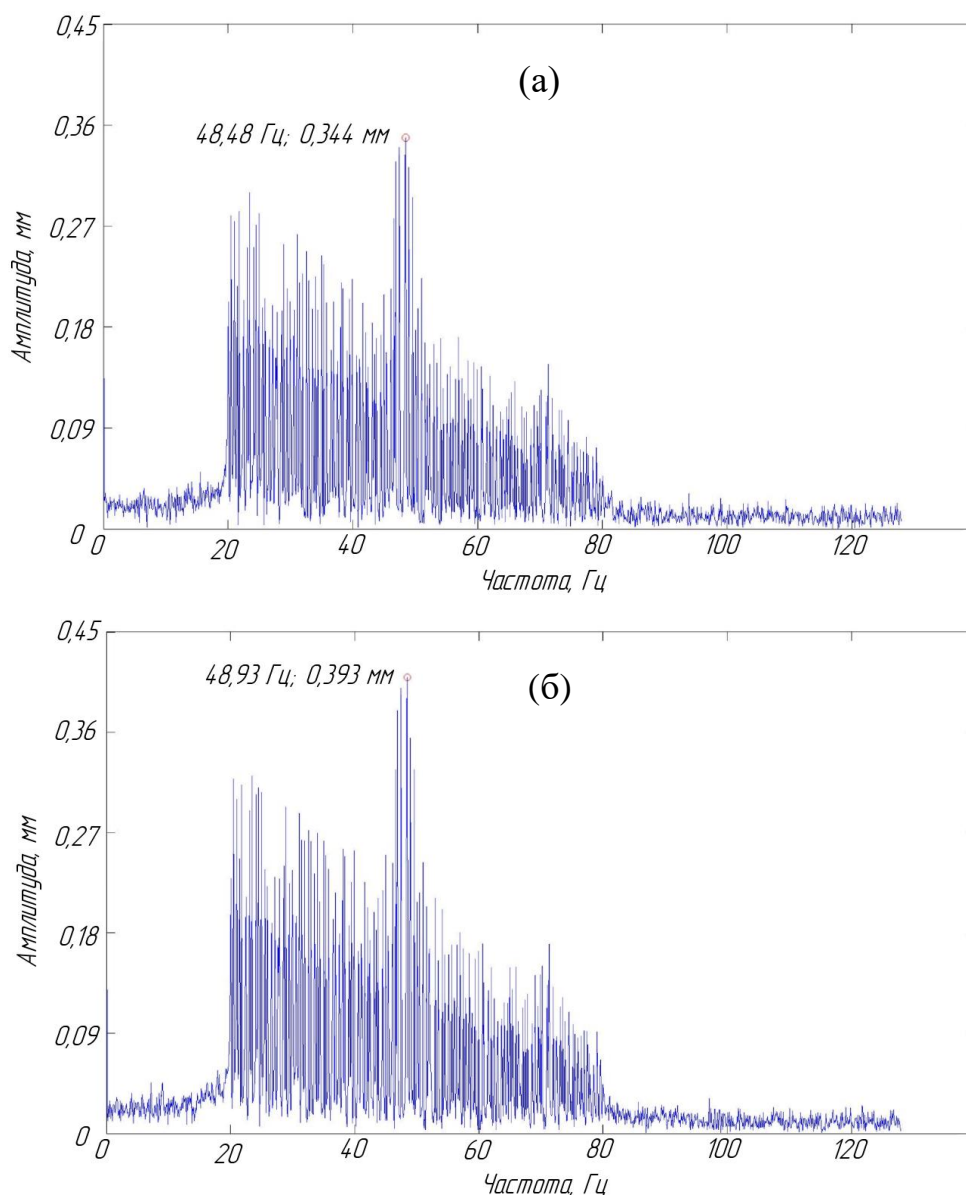
Анализируя представленные графики частотной зависимости амплитуды сигнала полученного при ориентации ИТПК в вертикальной плоскости, вдоль оси X, можно заключить: для первого этапа испытаний, на частоте 52,28 Гц наблюдался резонанс с амплитудой 0,476 мм; для второго этапа испытаний – на частоте 52,98 Гц наблюдался резонанс с амплитудой 0,523 мм. Сравнивая полученные результаты видно, что расхождения частот составляют 1,34 %, а амплитуд – 9,87 %, что удовлетворяет требованиям стандарта ECSS-E-ST-10-03C, при проведении синусоидальных ВДИ.



а) первый этап испытания; б) второй этап испытания

Рисунок 52 – Частотная зависимость амплитуды сигнала полученного при ориентации ИТПК в вертикальной плоскости, вдоль оси Y

Анализируя представленные графики частотной зависимости амплитуды сигнала, полученного при ориентации ИТПК в вертикальной плоскости, вдоль оси Y, можно заключить: для первого этапа испытаний, на частоте 52,88 Гц наблюдался резонанс с амплитудой 0,517 мм; для второго этапа испытаний – на частоте 52,98 Гц наблюдался резонанс с амплитудой 0,589 мм. Сравнивая полученные результаты видно, что расхождения частот составляют 0,19 %, а амплитуд – 13,93 %, что удовлетворяет требованиям стандарта ECSS-E-ST-10-03C, при проведении синусоидальных ВДИ.



а) первый этап испытания; б) второй этап испытания

Рисунок 53 – Частотная зависимость амплитуды сигнала полученного при ориентации ИТПК в вертикальной плоскости, вдоль оси Z

Анализируя представленные графики частотной зависимости амплитуды сигнала, полученного при ориентации ИТПК в вертикальной плоскости, вдоль оси Z, можно заключить: для первого этапа испытаний, на частоте 48,48 Гц наблюдался резонанс с амплитудой 0,344 мм; для второго этапа испытаний – на частоте 48,93 Гц наблюдался резонанс с амплитудой 0,393 мм. Сравнивая полученные результаты видно, что расхождения частот составляют 0,93 %, а амплитуд – 14,24 %, что удовлетворяет требованиям стандарта ECSS-E-ST-10-03C, при проведении синусоидальных ВДИ.

Таким образом, в ходе выполнения диссертационной работы были проведены модельные и натурные испытания спроектированной конструкции ИТПК для спутников стандарта CubeSat 1U-6U. В результате было установлено, что расхождения в полученных данных при использовании этих методов не превысили 5 %, что удовлетворяет требованиям сходимости результатов измерений согласно ГОСТ Р ИСО 5725-1-2002 пункт 3.16. Исходя из этого экспериментальный образец комплекса (с ИТПК для CubeSat 1U-6U) возможно использовать в качестве оснастки при проведении синусоидальных ВДИ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Модельные исследования по определению собственных частот и наиболее деформируемых областей спроектированного экспериментального образца имитатора транспортно-пускового контейнера для спутников стандарта CubeSat 1U-6U показали: при горизонтальном положении ИТПК, были определены две резонансные частоты 42,25 и 75,42 Гц в плоскости Z и одна резонансная частота 42,25 для плоскостей X и Y; при вертикальном положении ИТПК была определена одна резонансная частота 48,30 Гц в плоскости Z и две резонансные частоты со значениями 52,12 Гц для плоскостей X и Y. Значения для других частот не рассматривались, поскольку в соответствии с ECSS-E-ST-10-03C для них коэффициент массового участия не превысил 10 %. Полученные значения резонансов лежат в типичном диапазоне частот для синусоидальных ВДИ от 5 до 100 Гц [11]. Наибольшие деформации локализуются в областях закрепления полуосей для обеих ориентаций ИТПК для CubeSat 1U-6U.

В ходе проведения натурных испытаний изготовленного экспериментального образца имитатора транспортно-пускового контейнера для спутников стандарта CubeSat 1U-6U на вибростенде ВИКАМ 35/14 с применением регистрационного прибора “Вибротест МГ4.01”. Было установлено, что при ориентации ИТПК в горизонтальной плоскости, вдоль осей X и Y определяется по одной резонансной частоте, а вдоль оси Z определяются две резонансные частоты; при положении ИТПК в вертикальной плоскости, вдоль осей X, Y и Z определяется по одной резонансной частоте. Данные резонансные частоты наблюдаются как на первом, так и на втором этапах испытаний.

С помощью разработанной программы (алгоритм работы которой был построен на основе метода быстрого преобразования Фурье) были преобразованы данные, полученные в ходе натурных виброиспытаний имитатора транспортно-пускового контейнера для спутников стандарта CubeSat 1U-6U на вибростенде ВИКАМ 35/14, с применением регистрационного прибора “Вибротест МГ4.01”.

В результате программной обработки данных ВДИ были получены частотные зависимости амплитуды сигнала для ИТПК в вертикальной и горизонтальной плоскостях, для каждой ортогональной оси. Анализ полученных графических зависимостей показал, что расхождения полученных частот не превышают 5 %, а амплитуд 20 % что удовлетворяет требованиям стандарта ECSS-E-ST-10-03C при проведении синусоидальных ВДИ (максимальные расхождения между первым и вторым этапами испытаний для частот были определены при ориентации ИТПК в горизонтальной плоскости, вдоль оси Z и составили 19,78 %, для амплитуд – при ориентации ИТПК в горизонтальной плоскости, вдоль оси Y и составили 2,16 %). Кроме того, было установлено, что расхождения данных натуральных и модельных испытаний (сравнивались резонансные частоты) не превысили 5 %, что удовлетворяет требованиям сходимости результатов измерений согласно ГОСТ Р ИСО 5725-1-2002.

Таким образом, было установлено, что спроектированный и изготовленной экспериментальный образец оснастки возможно применять для проведения вибродинамических испытаний спутников стандарта CubeSat 1U-6U.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1 Транспортно-пусковой контейнер Mk.IIIRev. E [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://static1.squarespace.com/static/5418c831e4b0fa4ecac1bacd/t/5806854d6b8f5b8eb57b83bd/1476822350599/P-POD_MkIIIRevE_Us erGuide_CPPPODUG-1.0-1_Rev1.pdf–12.02.2024.

2 Спецификация спутников стандарта CubeSat 1U-12. CubeSat Design Specification Rev. 14.1 The CubeSat Program, Cal Poly SLO [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://static1.squarespace.com/static/5418c831e4b0fa4ecac1bacd/t/62193b7fc9e72e0053f00910/1645820809779/CDS+REV14_1+2022-02-09.pdf – 09.10.2023

3 Патент на полезную модель № 217239 U1 Российская Федерация, МПК В64G 1/10. Адаптер для группового выведения спутников стандарта CubeSat : № 2022134379 : заявл. 27.12.2022 : опубл. 23.03.2023 / Д. В. Фомин, Д. Е. Колостырь ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Амурский государственный университет".

4 Наземные испытания спутника «ISTSat-1» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.esa.int/Education/CubeSats__Fly_Your_Satellite/CubeSat_ISTSat-1_passes_the_vibration_test_campaign_getting_one_step_closer_to_space–12.02.2024.

5 Предполётные испытания кубсата «СтратоСат ТК-1» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://spacepi.space/news/predpol yotnye-ispytaniya-kubsata-strato-sat-tk-1/>–12.02.2024.

6 Патент на изобретение № 2 758 161 С1 Российская Федерация, МПК В64G 7/00. Универсальный имитатор транспортно-пускового контейнера для поведения вибродинамических испытаний спутников стандарта CubeSat: № 2021107504 : заявл. 22.03.2021 опубл.: 26.10.2021 / Д. В. Фомин, Д. С. Тарасов.

7 Патент на полезную модель № 211274 U1 Российская Федерация, МПК В64G 7/00. Имитатор транспортно-пускового контейнера для поведения

вибродинамических испытаний спутников стандарта CubeSat 1U-3U: № 2021139634 :заявл. 29.12.2021 :опубл. 30.05.2022 / Д. В. Фомин, А. Е. Голых.

8 Вибрационные испытания [Электронный ресурс]: Брошюра. – <http://asm-tm.ru/wp-content/uploads/2014/05/Vibration-Testing.pdf> – 11.09.2023.

9 Космический аппарат “Маяк”. Программа и методика испытаний на статическую и вибродинамическую прочность. [Электронный ресурс] . – Режим доступа: <https://www.your-sector-of-space.org/gallery/.pdf> – 11.09.2023.

10 Европейский стандарт проведения наземных испытаний аэрокосмической техники [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.abbottaerospace.com/downloads/ecss-e-st-10-03c-space-engineering-testing/> – 11.09.2023.

11 Технический бюллетень центра инженерии и безопасности НАСА № 15-03 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://www.nasa.gov/wp-content/uploads/2015/04/nesc-tb-15-03-best-practices-for-use-of-sine-vibration-testing.pdf?emrc=64c792#:~:text=Sine%20Vibration%20\(SV\)%20Testing%20involves,but%20mainly%20on%20flight%20articles](https://www.nasa.gov/wp-content/uploads/2015/04/nesc-tb-15-03-best-practices-for-use-of-sine-vibration-testing.pdf?emrc=64c792#:~:text=Sine%20Vibration%20(SV)%20Testing%20involves,but%20mainly%20on%20flight%20articles) – 11.09.2023.

12 ГОСТ Р ISO 10813 - 1 - 2011. Руководство по выбору вибростендов: дата введения: 01.12.2012. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://files.stroyinf.ru/Data/516/51630.pdf> – 10.02.2024.

13 Электродинамический стенд с воздушным охлаждением Glotech [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.protehnology.ru/elektrodinamicheskij-stend-s-vozdushnymohlazhdeniem-glotech-612616624> – 18.02.2024.

14 Гидравлический вибростенд HVS-100 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://imc-systems.ru/catalog/vibrostandy/gidravlicheskievibrostandy> – 09.10.2023.

15 Электромеханический вибрационный стенд ВИКАМ-35/14 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://technoprism.ru/catalog/proizvodstvo-ispytatel'nogo-oborudovaniya/ispytatelnye-stendyvikam/elektromekhanicheskiy-vibratsionnyy-stend-vikam-35/> . – 09.10.2023.

16 Справка SolidWorks, раздел Simulation, подраздел “основные понятия анализа”. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: help.solidworks.com – 09.11.2023.

17 Русанов, О. А. Анализ установившихся вынужденных колебаний методом конечных элементов / О. А. Русанов, Н. Ф. Авдеев // *Машиностроение и инженерное образование*. – 2012. – № 1(30). – С. 50-56.

18 Подклетнов, С. Г. Применение методов преобразования Фурье и вейвлет-преобразования для вибродиагностики технического состояния тоннельных эскалаторов [Электронный ресурс] / С. Г. Подклетнов // *Изв. СПбГЭТУ*. – 2023. – Т. 16. – № 5. – С. 24–32. doi: 10.32603/2071-8985-2023-16-5-24-32. – Режим доступа: <https://izv.etu.ru/assets/files/izvestiya-5-2023-24-32.pdf> . – 20.11.2023.

19 Гулай, А.В. Цифровая технология спектрального анализа параметров колебаний [Электронный ресурс] / А.В. Гулай, В.М. Зайцев // *Системный анализ и прикладная информатика*. – 2022. – № 1. – С. 4–8. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/tsifrovaya-tehnologiya-spektralnogo-analiza-parametrov-kolebaniy>. – 20.09.2023.

20 Смирнова, Н. В. Векторная и спектральная цифровая обработка сигналов в музыкальной акустике методом параметрического дискретного преобразования Фурье [Электронный ресурс] / Н. В. Смирнова // *Цифровая обработка сигналов*. – 2019. – № 2. – С. 3–11. – Режим доступа: http://www.dsps.ru/articles/year2019/jour19_2/art19_2_1.pdf . – 10.10.2023.

21 Фомин, Д. В. Универсальная платформа полезной нагрузки для малых спутников стандарта CubeSat [Электронный ресурс] / Д. В. Фомин, Д. О. Струков, А. С. Герман // *Известия высших учебных заведений. Приборостроение*. – 2018. – Т. 61. – № 5. – С. 446-449. – doi 10.17586/0021-3454-2018-61-5-446-449. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/universalnaya-platforma-poleznoy-nagruzki-dlya-malyh-sputnikov-standarta-cubesat> . – 09.10.2023.

22 Голых, А. Е. Поворотный комплекс для проведения вибродинамических испытаний наноспутников / А. Е. Голых, Д. В. Фомин // *Известия высших учебных заведений. Приборостроение*. – 2023. – Т. 66, № 6. – С. 472-482. – doi 10.17586/0021-3454-2023-66-6-472-482.

23 Novel Structure and Thermal Design and Analysis for CubeSats in Formation Flying / Park, Yeon-Kyu; Kim, Geuk-Nam; Park, Sang-Young// *Aerospace* 2021. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.mdpi.com/2226-4310/8/6/150> – 20.09.2023.

24 Методика расчета зубчато-ременной передачи. Automation & Cables - RS Components. Retrieved 29. 10. 2020 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://docs.rs-online.com/6f9c/0900766b803c5d9d.pdf>.

25 Справка SolidWorks, раздел Simulation, подраздел “создание сетки”. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://help.solidworks.com> – 09.11.2023.

26 Справка SolidWorks, раздел Simulation, подраздел “динамический анализ”. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://help.solidworks.com>. – 14.11.2023.

27 Быстрое преобразование Фурье — конспект лекции [Электронный ресурс]: Блок автора. – Режим доступа: <https://leonidov.su/ru/fft-lecture-notes/> – 11.09.2023.

28 Алгоритм БПФ с прореживанием по времени [Электронный ресурс]: Блок автора. – Режим доступа: https://ru.dsplib.org/content/fft_dec_in_time/fft_dec_in_time.html – 11.09.2023.

29 Васильев, С. А. Компьютерные методы математической физики [Электронный ресурс]: учебное пособие / С. А. Васильев, М. Д. Малых, Л. А. Севастьянов. – М.: РУДН, 2020. – 213 с.– Режим доступа: <https://malykhmd.neocities.org/course/mmph.pdf> . – 12.11.2023.

30 Sander van Voorst De dreiging van quantumcomputers [Электронный ресурс]: Блок автора. – Режим доступа: <https://tweakers.net/reviews/5885/4/de-dreiging-van-quantumcomputers-en-de-noodzaak-van-resistente-encryptie-wat-is-precies-het-probleem.html> . – 11.09.2023.

31 50 Years of FFT Algorithms and Applications/ G. Ganesh Kumar, Subhendu K. Sahoo, P.K. Meher// *Circuits Systems and Signal Processing* 2019 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/333029661_50_Years_of_FFT_Algorithms_and_Applications. – 12.11.2023.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 211274

**Имитатор транспортно-пускового контейнера для
поведения вибродинамических испытаний спутников
стандарта CubeSat 1U-3U**

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
"Амурский государственный университет" (RU)*

Авторы: *Фомин Дмитрий Владимирович (RU), Голых
Артем Евгеньевич (RU)*

Заявка № **2021139634**

Приоритет полезной модели **29 декабря 2021 г.**

Дата государственной регистрации
в Государственном реестре полезных
моделей Российской Федерации **30 мая 2022 г.**

Срок действия исключительного права
на полезную модель истекает **29 декабря 2031 г.**

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат 68b80077e14e40f0a94edbd24145d5c7
Владелец: **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 20.05.2022 по 26.05.2023

Ю.С. Зубов



ПРИЛОЖЕНИЕ Б

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2796176

Поворотное устройство имитатора транспортно-пускового контейнера спутника CubeSat 1-3U

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Амурский государственный университет" (RU)*

Авторы: *Фомин Дмитрий Владимирович (RU), Голых Артём Евгеньевич (RU)*

Заявка № **2022134380**

Приоритет изобретения **27 декабря 2022 г.**

Дата государственной регистрации в Государственном реестре изобретений Российской Федерации **17 мая 2023 г.**

Срок действия исключительного права на изобретение истекает **27 декабря 2042 г.**

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат: 68b60077e14e49f0a94edbd24145d5c7
Владелец: **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 26.05.2022 по 26.05.2023

Ю.С. Зубов



ПРИЛОЖЕНИЕ В

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2812511

Имитатор транспортно-пускового контейнера для спутников стандарта CubeSat 6U, предназначенный для использования в составе поворотных устройств

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Амурский государственный университет" (RU)*

Авторы: *Фомин Дмитрий Владимирович (RU), Голых Артём Евгеньевич (RU)*

Заявка № 2023118467

Приоритет изобретения **13 июля 2023 г.**

Дата государственной регистрации

в Государственном реестре изобретений

Российской Федерации **30 января 2024 г.**

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает **13 июля 2043 г.**

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат 429b6a0fe3853164ba966f83b73b4aa7
Владелец **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 18.05.2023 по 02.08.2024

Ю.С. Зубов



ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Фрагмент программного кода

```
% Выполнение Быстрого Преобразования Фурье (БПФ)
Y = fft(vibration);
n = length(Y);
Fs = 1 / (t(2) - t(1));
f = (0:n-1) * Fs / n;

P2 = abs(Y/n); % Двусторонний спектр
P1 = P2(1:floor(n/2)+1); % Односторонний спектр
P1(2:end-1) = 2*P1(2:end-1); % Компенсация недостающих амплитуд :

% Построение графика временного сигнала
figure; % Первое окно для временного сигнала
plot(t, vibration);
xlabel('Время, с');
ylabel('Амплитуда, мм');
title('Вибрация с погрешностью измерений');

frequency_ranges = [40 60];
figure;
plot(f(1:floor(n/2)+1), P1); % Отображение амплитудного спектра
xlabel('Частота, Гц');
ylabel('Амплитуда');
title('Амплитудный спектр');

% Цикл по диапазонам частот
for j = 1:size(frequency_ranges, 1)
    f_min = frequency_ranges(j, 1);
    f_max = frequency_ranges(j, 2);
    idx = find(f >= f_min & f <= f_max);
    if isempty(idx)
        % Если нет данных в этом диапазоне, пропускаем его
        continue;
    end
    % Находим пики в заданном диапазоне
    [peaks, locs] = findpeaks(P1(idx), 'SortStr', 'descend', 'NPeaks', 1);
    % Возвращаем правильные локации на основе исходного массива f
    locs = idx(locs);
    % Отмечаем пики на графике красными кругами
    plot(f(locs), peaks, 'ro', 'MarkerSize', 10); % Увеличение размера маркера
```

```
% Аннотация найденных пиков с смещением влево и вниз
for i = 1:length(locs)
    text(f(locs(i)) - 1.4, peaks(i) - 0.010, sprintf('%0.2f Гц, %0.2f мм', f(locs(i))
        'VerticalAlignment', 'bottom', 'HorizontalAlignment', 'right', ...
        'Color', 'k', 'FontSize', 15, 'Margin', 1); % Увеличенный размер шрифта
end
% Вывод информации о пиках в консоль
for i = 1:length(locs)
    fprintf('частота = %.2f Гц, амплитуда = %.2f\n', f(locs(i)), peaks(i));
end
end

% Настройка подписей осей и заголовка
xlabel('Частота (Гц)', 'FontSize', 14);
ylabel('Амплитуда (мм)', 'FontSize', 14);
title('Спектр сигнала', 'FontSize', 16);

% Перерисовка для обновления графика
figure(gcf);
```


ПРИЛОЖЕНИЕ Д

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2023686517

**Программа обработки данных, измерительного прибора
«Вибротест-МГ4», полученных при проведении
вибродинамических испытаний**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Амурский государственный университет» (RU)*

Авторы: *Голых Артём Евгеньевич (RU), Фомин Дмитрий
Владимирович (RU)*



Заявка № **2023682871**

Дата поступления **01 ноября 2023 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ **07 декабря 2023 г.**

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат 429b6a0f63851164ba9f96f83b73b4aa7
Владелец **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 10.05.2023 по 02.08.2024

Ю.С. Зубов