

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

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

УТВЕРЖДАЮ  
Заведующий кафедрой  
В.Е. Косенко  
подпись инициалы, фамилия  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2017 г.

## МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

**РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ ПЬЕЗОАКТУАТОРА ДЛЯ КАЛИБРОВКИ  
ПЛАЗМЕННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ**

тема

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

**15.04.05.02 «Технология космических аппаратов»**  
код и наименование магистерской программы

Научный руководитель

профессор, д-р техн.  
наук

В.В. Двирный  
инициалы, фамилия

подпись, дата

должность, ученая степень

Выпускник

К.В. Кондратьев  
инициалы, фамилия

подпись, дата

Рецензент

начальник группы,  
канд. техн. наук

А.В. Машуков  
инициалы, фамилия

подпись, дата

должность, ученая степень

Нормоконтролер

Е.С. Сидорова  
инициалы, фамилия

подпись, дата

Красноярск 2017

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

Политехнический институт  
институт

Межинститутская базовая кафедра  
«Прикладная физика и космические технологии»  
кафедра

УТВЕРЖДАЮ  
Заведующий кафедрой  
\_\_\_\_\_ В.Е. Косенко  
подпись инициалы, фамилия  
«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2017 г.

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

Студенту: Кондратьеву Кириллу Валерьевичу

Группа: МТ 15-04М

Направление (специальность): 15.04.05.02 «Технология космических аппаратов»

Тема выпускной квалификационной работы: «Разработка конструкции пьезоактуатора для калибровки плазменных двигателей космических аппаратов»

Утверждена приказом по университету от №16482/с от 30.10.2015г.

Руководитель ВКР: Двирный Валерий Васильевич д-р техн. наук, проф., профессор МБК «Прикладная физика и космические технологии».

Исходные данные для ВКР: Необходимость разработки конструкции системы калибровки для проведения огневых приемочных испытания стационарных плазменных двигателей.

Перечень рассматриваемых вопросов (разделов ВКР): исследование предметной области, разработка кинематической схемы, разработка и создание модели конструкции пьезоактуатора для калибровки тяги стационарных плазменных двигателей коррекции космических аппаратов;

Перечень графического материала с указанием основных чертежей, плакатов: 16 слайдов по презентации ВКР.

Руководитель ВКР \_\_\_\_\_

подпись

инициалы, фамилия

Задание принял к исполнению \_\_\_\_\_

подпись

инициалы, фамилия

«30» октября 2015 г.

## **РЕФЕРАТ**

Магистерская диссертация по теме «Разработка конструкции пьезоактуатора для калибровки плазменных двигателей космических аппаратов» содержит 84 страниц текстового документа и 49 использованных источников.

**ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКИЙ БИМОРФ (АКТУАТОР), КОНСТРУКЦИЯ МОДУЛЯ ДИСТАНЦИОННОЙ КАЛИБРОВКИ, АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ РАБОЧЕЕ МЕСТО ОГНЕВЫХ ПРИЕМОЧНЫХ ИСПЫТАНИЙ.**

Целью диссертационной работы является разработка конструкции пьезоактуатора для калибровки тяги плазменных двигателей коррекции космических аппаратов (КА).

Для достижения означенной цели в рамках диссертационного исследования поставлены следующие задачи:

- 1) Исследование предметной области и анализ существующих методов и средств калибровки стационарных плазменных двигателей системы коррекции космического аппарата;
- 2) Разработка кинематического принципа функционирования модуля дистанционной калибровки (МДК) стационарных плазменных двигателей системы коррекции космического аппарата;
- 3) Проектирование составных частей и элементов, и создание сборки модели конструкции МДК с САПР 3D-моделирования;

В результате разработанная модель отвечает условиям предъявляемым техническим заданием для модуля дистанционной калибровке стационарных плазменных двигателей. Основным требованием к устройствам, реализуемых в космической отрасли и функционирующих в условиях вакуума, является минимизация массогабаритных показателей и компактность

## **СОДЕРЖАНИЕ**

Введение.....	7
1 Анализ объекта исследования и постановка задачи.....	11
1.1 Система коррекции космического аппарата.....	12
1.2 Стационарные плазменные двигатели .....	18
1.3 Калибровка тяги плазменных двигателей.....	25
1.3.1 Требования к преобразователю усилия.....	29
1.3.2 Требования к модулю дистанционной калибровки .....	30
1.4 Постановка задачи.....	31
1.5 Выводы по главе 1 .....	32
2 Основной исполнительный элемент системы калибровки .....	34
2.1 Обзор существующих пьезоактуаторов.....	35
2.2 Пьезокерамический биморф.....	40
2.3 Эффект гистерезиса при эксплуатации биморфа.....	43
2.4 Выводы по главе 2 .....	49
3 Разработка конструкции пьезоактуатора.....	51
3.1 Основные элементы и функции среды разработки.....	52
3.2 Разработка кинематической схемы пьезоактуатора .....	56
3.3 Проектирование элементов конструкции .....	59
3.4 Создание сборки конструкции пьезоактуатора.....	67
3.5 Выводы по главе 3 .....	72
Заключение .....	74
Список сокращений .....	75
Список использованных источников .....	76
Приложение А Публикации по теме диссертации .....	82
Приложение Б Конструкция МДК .....	83

## ВВЕДЕНИЕ

Преобразование электрической энергии в механическую в атмосфере осуществляется посредством всем известных и широко распространенных средств. Электродвигатели преобразуют электроэнергию в механическую и приводят в действие исполняющий механизм посредством механических передач. Среди прочих можно выделить: зубчатые, червячные, гипоидные, цепные, зубчатыми ремнями, винтовые, волновые, фрикционные, ременные и другие виды передач, которые встречаются в разных отраслях технического производства [1].

Совсем иначе дела обстоят, когда речь заходит о преобразовании электрической энергии в условиях вакуума. Обеспечение адекватного функционирования передачи и сохранности свойств смазочных материалов в вакууме затрудняется, тем самым ограничивает применение отдельных видов передачи механической энергии в условиях вакуума. Особое внимание стоит уделить передачам, основанных на принципе сухого трения, которые идеально подходят для решения научно-технических задач в жестких условиях вакуума и крайних температур.

Современная система калибровки стационарных плазменных двигателей должна преобразовывать величину измеряемой тяги в информационный сигнал с заданной точностью, по мимо этого конструкция модуля дистанционной калибровки ограничена жесткими требованиями по габаритным размерам и требованиям к жестким условиям эксплуатации (условия вакуума и крайних температур). Таким образом, задача преобразования усилия в означенных условиях для калибровки стационарных плазменных двигателей является важной и актуальной на современном этапе научно-технического развития в космической отрасли.

Целью диссертационного исследования является разработка конструкции пьезоактуатора для калибровки тяги плазменных двигателей коррекции космических аппаратов (КА).

Для достижения означенной цели в рамках диссертационного исследования поставлены следующие задачи:

- 1) Исследование предметной области и анализ существующих методов и средств калибровки стационарных плазменных двигателей системы коррекции космического аппарата;
- 2) Разработка кинематического принципа функционирования модуля дистанционной калибровки (МДК) стационарных плазменных двигателей системы коррекции космического аппарата;
- 3) Проектирование составных частей и элементов, и создание сборки модели конструкции МДК с САПР 3D-моделирования;

Работа состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы.

В первой главе осуществлен анализ предметной области, приведены общие сведения о системе коррекции, объяснена важность системы коррекции как одной из систем, обеспечивающих жизнедеятельность КА, так как, корректное функционирование космического аппарата возможно лишь при четком соблюдение его запланированной орбиты, проиллюстрирован принцип изменения траектории комического аппарата.

Рассмотрены стационарные плазменные двигатели как основной исполнительный орган системы коррекции, раскрыто определение электрореактивных двигательных установок, представлено место стационарных плазменных двигателей в разрезе общей современной классификации электрореактивных двигательных установок. Подробно рассмотрены этапы работы и алгоритм функционирования стационарных плазменных двигателей. Приведена справка о ведущем на мировом и российском рынке производителе ФГУП ОКБ «Факел» г. Калининград, представлены некоторые из производимых стационарных плазменных двигателей, в том числе и тех, которые используются АО «ИСС» г. Железногорск.

Представлено определение тяги электрореактивной двигательной установки, описаны два метода определения тяги. Отмечена важность обеспечений точной тяги двигателей коррекции. Более подробно рассмотрены

существующие методики и средства калибровки плазменных двигателей коррекции. Дано определение понятиям тягоизмерительное устройство и унифицированный посадочный модуль, перечислены основные требования к преобразователю усилия и к модулю дистанционной калибровки.

Во второй главе диссертационной работы изложены результаты поиска по информационному ресурсу Федерального института промышленной собственности запатентованных пьезокерамических элементов и устройств, а также поиск по открытым ресурсам сети Интернет, проанализировано содержание сборников научно-практических конференций, сборники материалов выставок и форумов на заявленную тематику.

Сформирована актуальной базы данных пьезокерамических элементов и конструкций, предложена классификации типов и видов пьезокерамических актуаторов. Проработка стратегии и обоснование выбора пьезокерамического элемента для решения, в рамках диссертационного исследования, задачи практически-прикладного характера.

Лабораторные исследования и практические эксперименты показали, что биморф, как генератор силы, обладает ярко выраженным гистерезисом. В результате проведенных экспериментов можно сказать, что управление бимирфом относительно поданного на него напряжения линейно, ширина петли гистерезиса все же остается весьма существенной. Исходя из выявленного эффекта гистерезиса в функциональной работе пьезокерамического биморфа предлагается алгоритм управления.

В третьей главе представлены этапы разработки конструкторской документации, определена последовательность и содержание этапов разработки и производства на основании технического задания.

Описано средство моделирования и разработки модуля дистанционной калибровки в качестве средства автоматизированного проектирования использовался пакет прикладных программ SolidWork. Приведены основные структурные элементы их обозначения на панели инструментов SolidWorks используемые для создания непосредственно самой модели модуля

дистанционной калибровки стационарных плазменных двигателей космических аппаратов.

Проиллюстрирована кинематическая схема модуля дистанционной калибровки стационарных плазменных двигателей в двух крайних положениях. Подробно изложены в графическом представлении спроектированные элементы и составные части конструкции модуля дистанционной калибровки стационарных плазменных двигателей.

На основе предложенного кинематического взаимодействия, ведущего и ведомого звеньев в виде пьезокерамического биморфа и дискового колеса, была разработана модель, посредством которой, осуществляется преобразование колебательных движений биморфа в плавное поднятие и опускание необходимого груза.

В заключении представлены основные результаты теоретических и практических исследований. В библиографическом списке представлены первоисточники, использованные в ходе проведённых исследований.

Общий объём ВКР составляет 84 страницы, 37 рисунков, 4 таблицы, 49 первоисточников.

## **1 Анализ объекта исследования и постановка задачи**

Необходимость подтверждения своей высокой эффективности и готовности соответствовать самым современным требованиям информационного общества, обусловлена лидирующей позицией нашей страны в экономике высокотехнологичных производств, в частности ракетно-космическая промышленность (РКП). Исходя из тенденций политики государства в области развития науки и технологий на сегодняшний день пропагандируется переход к инновациям в различных направлениях развития страны, космическая отрасль не исключение. К утвержденным на государственном уровне приоритетным направлениям развития науки и технологий в Российской Федерации отнесены «Космические системы», а в число критических технологий РФ вошли «Технологии создания новых поколений ракетно-космической техники» [2].

Ракетно-космическая промышленность – одна из наиболее сложных и наукоемких отраслей машиностроения. В ней широко используются межотраслевые разработки, в которых участвуют почти все отрасли народного хозяйства страны, а также разработки зарубежных коллег. Ракетно-космическая техника (РКТ) характеризуется высокой наукоемкостью, значительной трудоемкостью, длительными сроками разработки и проведения испытаний. Также стоит отметить что требуется поддержка функционирования и развития дорогостоящих уникальных испытательных стендов, специальных комплексов и сложнейшего оборудования [3].

Мировым лидером промышленности в области спутникостроения является акционерное общество «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва» г. Железногорск Красноярского края, выпускающие 70% российских спутников на орбите. За все время существования предприятия было спроектировано и изготовлено более 40 типов космических аппаратов и антенн, около 1200 космических аппаратов военного и гражданского назначения. Специализации производства, хорошо развитой в советской

промышленности, создание любого космического аппарата было результатом кооперации многочисленных партнеров. Модули полезной нагрузки, элементы систем питания, иные узлы могли производиться полностью или частично смежниками. Более того, существовала практика «разгрузки мощностей» (перераспределения производства серийной продукции путём передачи опытных моделей и документации на иные предприятия отрасли).

## **1.1 Система коррекции космического аппарата**

Космический аппарат состоит из нескольких составных частей, прежде всего - это целевая аппаратура, которая обеспечивает выполнение, стоящей перед космическим аппаратом, задачи. Помимо целевой аппаратуры обычно присутствует целый ряд служебных систем, которые обеспечивают длительное функционирование аппарата в условиях космического пространства. Для поддержания жизнедеятельности космического аппарата на протяжении всего планируемого срока эксплуатации, не нем предусмотрены различные системы, предназначенные для корректного функционирования спутника. К таким системам можно отнести:

- система ориентации и стабилизации (СОС) спутника в пространстве. Задача системы обеспечить определённое положение осей аппарата относительно некоторых заданных направлений (ориентирование солнечных батарей на Солнце, обеспечение навигационных измерений, для проведения различных исследований; обеспечение передачи информации с помощью остронаправленной антенны; перед включением тормозного или разгонного двигателя с целью изменения траектории полёта) [4];

- система терморегулирования (СТР) космического аппарата. Служебная система космического аппарата направленная на обеспечение и поддержание баланса между получаемой тепловой энергией и её отдачей, перераспределением тепловой энергии между конструкциями аппарата и таким образом обеспечением заданной температуры [5];

- система электропитания (СЭП) космического аппарата. Служебная система космического аппарата, обеспечивающая электропитание других систем, является одной из важнейших систем, во многом именно она определяет геометрию космических аппаратов, конструкцию, массу, срок активного существования [6];

- система управления (СУ) космического аппарата. Задача системы управления движением космического аппарата состоит в следующем: коррекция ошибок выведения КА, приведение КА на орбиту с заданными параметрами (коррекция приведения), удержание КА на заданной орбите (коррекция удержания), увод с рабочей орбиты после завершения эксплуатации. Методы управления движением КА – изменение скорости движения КА по орбите [7];

- система связи (СС) космического аппарата. Система связи КА представляет собой совокупность программных и аппаратных средств, позволяющих передавать информацию между космическим аппаратом и центром управления полётом этого космического аппарата. Классифицировать передаваемую информацию разделяют на три основных типа: научная информация (КА – Земля), служебная и телеметрическая информация (КА – Земля), командно-программная информация (Земля – КА) [8];

- система жизнеобеспечения космического обеспечения необходима для пилотируемых КА, а также для аппаратов, на борту которых осуществляются биологические эксперименты. Включает запасы необходимых веществ, а также системы регенерации и утилизации [9];

- двигательная установка космического аппарата. система космического аппарата, обеспечивающая его ускорение. Преобразует различные виды энергии в механическую, при этом могут отличаться как источники энергии, так и сами способы преобразования. Каждый способ имеет свои преимущества и недостатки, их исследования и поиск новых вариантов продолжаются по сей день. Наиболее распространенный тип двигательной установки космического аппарата – химический ракетный двигатель, в котором газ с высокой скоростью истекает из сопла [10];

- система аварийного спасения (САС) – бортовая система для спасения экипажа космического корабля в случае возникновения аварийной ситуации на ракете-носителе (РН). При штатном полёте САС отделяется от РН после достижения безопасной высоты. При аварии на больших высотах спасение экипажа может осуществляться отделением спускаемого аппарата (или всего космического корабля) от ракеты-носителя с последующим полётом его по траектории спуска и торможением в атмосфере [11];

В зависимости от выполняемой космическим аппаратом функции отдельные из перечисленных служебных систем могут отсутствовать, например, спутники связи не имеют систем аварийного спасения, жизнеобеспечения.

В рамках диссертационного исследования особое внимание хотелось бы обратить на одну из наиболее важных систем КА именуемую системой коррекции (СК). Система коррекции – космического аппарата отвечает за его поступательное движение в космическом пространстве. Поскольку размеры КА по сравнению с длиной радиус-вектора его орбиты очень малы, движение спутника по орбите рассматривается как перемещение материальной точки. А как известно, траекторией движения объекта, принятого за материальную точку, является траектория движения центра масс этого объекта [12]. Следовательно, управляющие воздействия, генерируемые системой коррекции, должны быть направлены на управление движением центра масс КА.

Задачи управления движением КА посредством использования СК:

- коррекция ошибок выведения КА (исправление несоответствия полученной после окончания работы РБ орбиты целевой орбите по высоте, эксцентриситету и наклонению, является первоочередной задачей СК КА. Так, штатная точность выведения разгонный блок (РБ) ДМ-03 составляет километр по высоте, по эксцентриситету и по наклонению, а разгонный блок «Бриз-М» – километр по высоте, по эксцентриситету и по наклонению. Также возможно нештатное выведение с большой погрешностью, исправлять которую также должна СК КА);

- приведения КА на орбиту с заданными параметрами (коррекция приведения необходима для установки космического аппарата в рабочую точку геостационарной орбите (ГСО) [13] (например, схема запуска с помощью ракеты-носителя «Протон-М» предусматривает выведение космического аппарата только в точки с долготой порядка  $53^{\circ}$  восточной долготы, перемещение космического аппарата в рабочую точку с другой долготой возлагается на систему коррекции космического аппарата) или, для нестационарных орбит, изменении аргумента перигея таким образом, чтобы обеспечить требуемую угловую привязку с другими космическими аппаратами на той же орбите (например, равномерное распределение аппаратов навигационной системы по орбите);

- перевод КА на другую рабочую орбиту (коррекция перевода в основном идентична коррекции приведения, однако выполняется не на начальном этапе работы космического аппарата, а после того, как спутник некоторое время проработал на орбите [14]. Коррекция перевода, в отличие от коррекции приведения, может быть сопряжена с изменением наклонения орбиты);

- удержание КА на заданной орбите (коррекция удержания заключается в парировании изменения орбиты космического аппарата, вызванного как внешними, так и внутренними возмущающими силами. Характерным примером коррекции удержания является совокупность коррекций широты и долготы при работе спутника на геостационарной орбите: необходимо удерживать плоскость орбиты от «сползания» в плоскость эклиптики, а также корректировать эволюцию рабочей точки космического аппарата по долготе (удерживать от сползания в «потенциальные ямы» в точках  $68^{\circ}$  восточной долготы и  $112^{\circ}$  западной долготы).

Принцип изменения траектории комического аппарата схож с принципом бильярдных шаров: движение происходит в результате воздействия внешних сил, движущиеся объекты меняют траекторию и скорость движения с учётом начальных параметров движения в момент воздействия [15]. Если двигающемуся со скоростью  $V_1$  спутнику с помощью реактивного двигателя сообщить

дополнительную скорость  $V_2$ , векторы  $V_1$  и  $V_2$  сложатся по правилу параллелограмма и аппарат будет двигаться в направлении и со скоростью  $V_{\text{общ}}$ . То есть под действием реактивной силы космического аппарата не перемещается в пространстве, а только меняет направление и скорость движения как показано на рисунке 1.1. Из этого следует, что точка на орбите, в которой к аппарату прикладывается действие, остаётся на новой орбите, то есть вновь образованная орбита будет либо пересекать, либо касаться исходной орбиты космического аппарата. Также этот принцип определяет точки, в которых должно быть приложено действие для изменения наклонения орбиты космического аппарата. Поскольку изменение наклонения означает изменение направления вектора скорости спутника, необходимо, чтобы после окончания действия новый вектор скорости лежал в требуемой плоскости орбиты. А это означает, что требуемая точка одновременно должна принадлежать двум плоскостям: плоскости исходной орбиты плоскости требуемой орбиты, то есть лежать на линии пересечения этих плоскостей. Для перелёта на геостационарную орбиту такой линией является линия, связывающая восходящий и нисходящий узлы исходной орбиты, следовательно, импульс изменения наклонения необходимо выдавать в узлах орбиты. При переходе между двумя орбитами с ненулевым наклонением импульс можно выдавать в любой удобной точке орбиты, однако импульсы в узловых точках позволяют сохранить значение долготы восходящего узла (восходящий узел будет принадлежать и исходной, и требуемой орбитам).

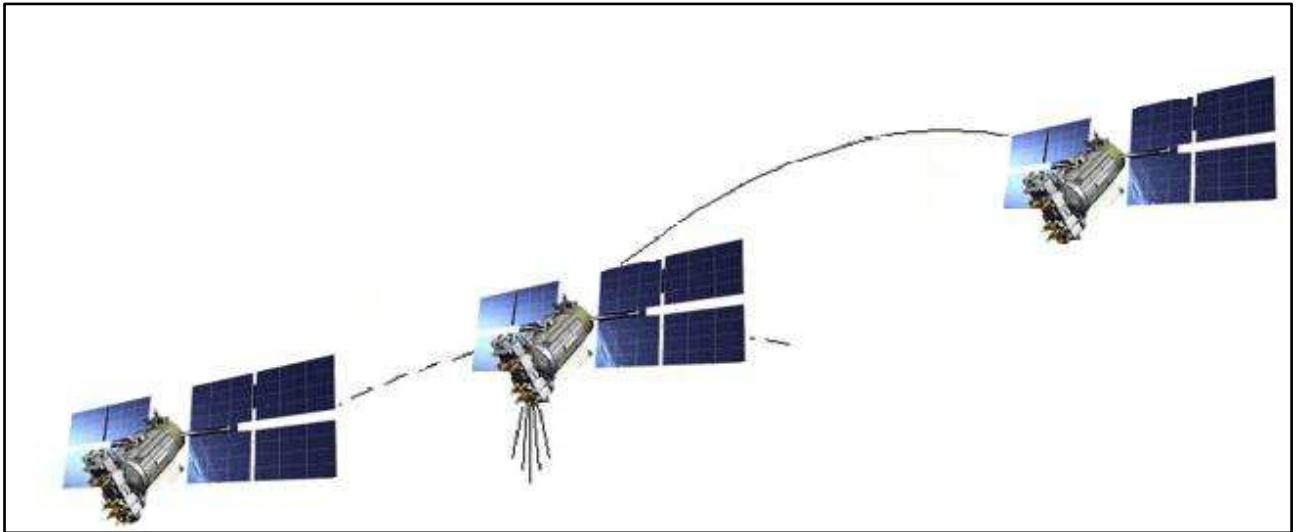


Рисунок 1.1 – Подача импульса для коррекции орбиты

Из задачи управления вектором скорости следует необходимость использовать для перемещения космического аппарата воздействия, изменяющие импульс ( $p = m*V$ , где  $m$  – масса,  $V$  – скорость) спутника. Источниками таких воздействий могут быть реактивные силы, возникающие при отделении от космического аппарата вещества определённой массы с определённой скоростью, или силы светового давления, вызываемые взаимодействием поверхности спутника (или, например, солнечного или электрического паруса) с фотонами или заряженными частицами, движущимися в космическом пространстве с определённой скоростью [16].

Система коррекции на ряду с вышеозначенными системами жизнеобеспечения спутника является очень важной, так как корректное функционирование космического аппарата возможно лишь при четком соблюдение его запланированной орбиты. На протяжении всего процесса выведения спутника на целевую орбиту система коррекции посредством двигательных установок (ДУ) решает локальные задачи коррекции ошибок выведения космического аппарата, коррекции приведения космического аппарата на орбиту с заданными параметрами, коррекции перевода

космического аппарата на другую рабочую орбиту, коррекции удержание космического аппарата на заданной орбите.

## **1.2 Стационарные плазменные двигатели**

Электрореактивные двигательные установки (ЭРДУ) – можно охарактеризовать как двигательные установки, в которых разгон рабочего тела осуществляется с использованием электрической энергии [17].

Так как электрореактивные двигательные установки имеют высокий удельный импульс, обладают хорошей экономичностью они используются для выполнения тех задач, которые требуют длительного и многократного включения двигателей. Такие задачи решает система коррекции, для которой, в отличие от системы ориентации и стабилизации, управляющее воздействие может быть длительным по времени и которая вынуждена использовать только исполнительные органы, работающие с безвозвратной потерей рабочего вещества [18]. Поэтому электрореактивные двигатели нашли широкое применение в составе системы коррекции и электрореактивные двигательные установки решают задачи, характерные для этой системы.

Согласно современной классификации электрореактивные двигатели подразделяют на следующие группы:

- электротермические (электронагревные, электродуговые);
- электростатические (плазменные, ионные);
- импульсные;
- сильноточные (магнитоплазменные): с собственным магнитным полем; с внешним магнитным полем [19].

В данной работе отдельное внимание уделено стационарным плазменным двигателям, внешний вид которых изображен на рисунке 1.2, так как в рамках диссертационного исследования именно для калибровки тяги стационарных плазменных двигателей осуществляется разработка конструкции пьезоактуатора.

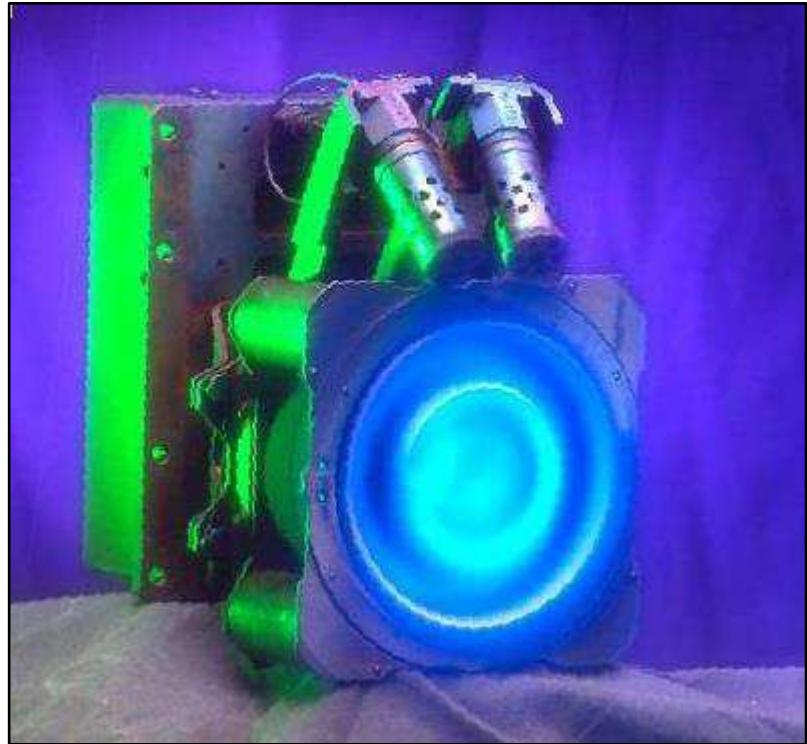


Рисунок 1.2 – Стационарный плазменный двигатель

Стационарные плазменные (холловские) двигатели используют в своей работе эффект Холла: возникновение поперечного тока заряженных частиц в электромагнитном поле с взаимно перпендикулярными векторами магнитной и электрической индукции [20].

Радиальное магнитное поле создаётся внутренней катушкой с током, расположенной по оси двигателя, и внешними катушками. Для выравнивания напряжённости магнитного поля количество внешних катушек должно быть не менее трёх, обычно же имеется четыре внешних катушки. По причине необходимости в радиальном магнитном поле рабочая камера и сопло холловского двигателя имеют кольцевую форму.

Работа холловского двигателя состоит из двух этапов. На первом этапе путём создания высокой разности потенциалов между анодом и катодом генерируется (в дополнение к сформированному катушками магнитному полю) электрическое поле, а с катода в рабочую камеру испускаются свободные

электроны как проиллюстрировано на рисунке 1.3. Электроны, попадая в электромагнитное поле с взаимно перпендикулярными линиями электрической и магнитной напряжённостей, начинают двигаться в азимутальном направлении (по кругу).

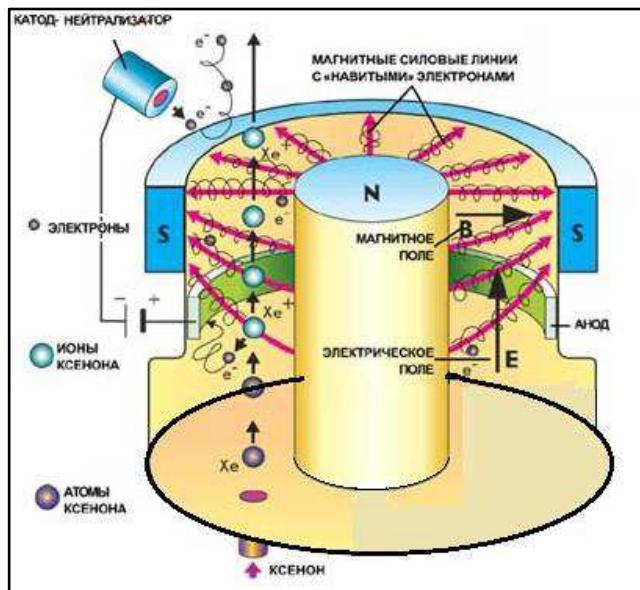


Рисунок 1.3 – Генерация электрического поля и испускание свободных электронов в рабочую камеру

На втором этапе разность потенциалов между анодом и катодом уменьшают, как показано на рисунке 1.4 электрическое поле генерируется за счёт разности потенциалов между анодом и электронами в холловском токе. Этот же ток выбивает электроны из атомов ксенона, ионизируя рабочее тело. Для того, чтобы заряженные частицы из потока плазмы не влияли на поверхности космического аппарата, им «вдогонку» из катода испускаются электроны, нейтрализуя ионы ксенона [20].

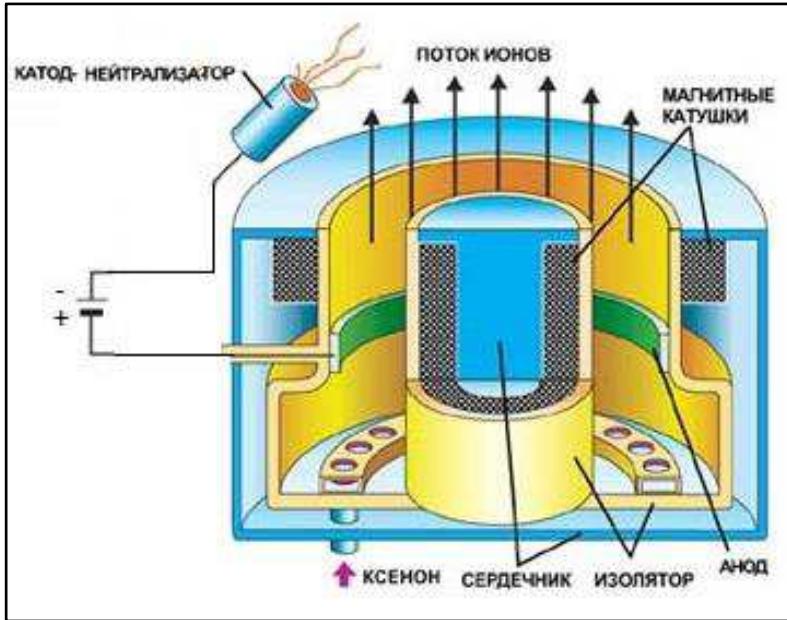


Рисунок 1.4 – Генерация электрического поля за счет разности потенциалов анодом и электронами

Алгоритм функционирования стационарных плазменных двигателей представлен на рисунке 1.5 и его можно описать следующим образом:

- 1) Разность потенциалов между внешним катодом(отрицательным) и внутренним анодом (положительным) создает в ионизационной камере преимущественно осевое электрическое поле;
- 2) Горячий катод испускает электроны, некоторые из них дрейфуют к аноду. Когда электроны попадают в камеру, сочетание радиального магнитного и осевого электрического полей заставляет их обращаться вокруг оси двигателя, создавая холловский ток;
- 3) Газообразный ксенон подается через анод-инжектор в кольцевую ускорительную камеру, где обращающийся по кругу электроны сталкиваются с атомами ксенона, превращая их в положительные ионы;
- 4) Плазма (состоящая из положительных ионов и электронов) ускоряется в направлении кормы космического аппарата электромагнитными силами, которые возникают в результате взаимодействия преимущественно радиального магнитного поля с холловским током [19, 21].

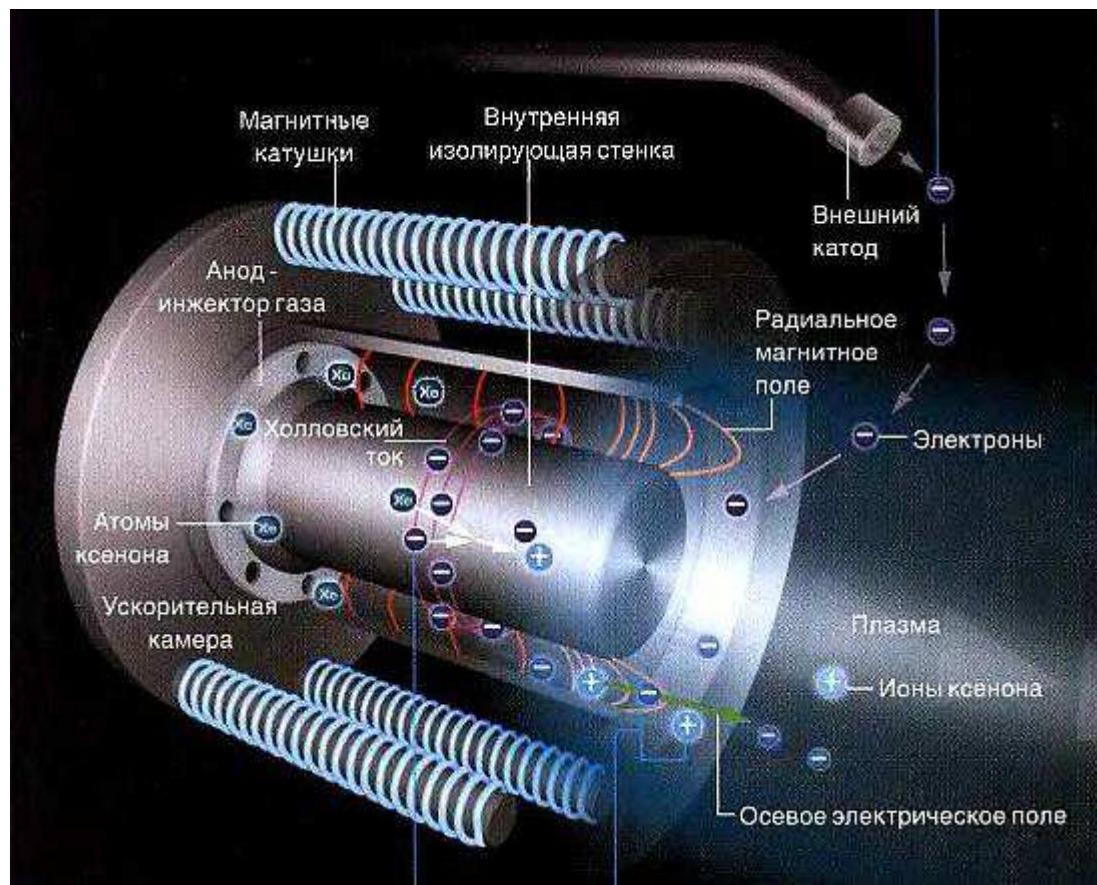


Рисунок 1.5 – Инфографика функционирования стационарного плазменного двигателя

Одной из лидирующих компаний в России и в мире с 55-летним опытом разработки различных электрических двигательных систем и более чем 40-летним летным опытом электрических двигательных подсистем является ФГУП ОКБ «Факел». Производимые на означенном предприятии электрореактивные двигательные установки базируются на стационарных плазменных двигателях (СПД), которые успешно применялись для коррекции орбиты на КА «Метеор» и «Метеор-Природа» в 70х-г. и применяются на КА серии «Космос» и «Луч» с 1982г., на КА «Галс» и «Экспресс» с 1994 г.

«Факел» основан в 1955 как «Двигательная лаборатория» Российской Академии Наук, в 1962 «Факелу» присвоен статус ОКБ. В начале 1980-х «Факел» начинает серийно производить двигатели СПД-50, СПД-60, СПД-70. Первый

спутник с СПД-70, «Гейзер №1», был запущен в 1982-м, а в 1994-м новой моделью СПД-100 оснастили спутник связи «Галс-1». Однако, хотя сообщение об успешном испытании плазменного двигателя «Эол» в 1974 году было совершенно открыто опубликовано в журнале «Космические исследования», зарубежные конструкторы считали СПД лишь интересной теоретической разработкой [22].

Сегодня ОКБ «Факел» тесно сотрудничает со многими российскими предприятиями ОАО «ИСС», РКК «Энергия», ГКНПЦ «Хруничев», НПП «ВНИИЭМ», а также с зарубежными компаниями: Astrium (Airbus Group), TAS, OHB, IAI, RUAG и Space Systems Loral.

В связи с ростом потребностей современной космонавтики, увеличением сроков активного существования современных и перспективных геостационарных спутников, усложнением решаемых задач бортовой ДУ, ужесточением требований к двигателям по эффективности, надежности и совместимости с аппаратурой КА возникают новые направления исследований и дальнейшего совершенствования ЭРД.

Ниже в таблицах 1-3 приведены примеры стационарных плазменных двигателей с перечисленными основными характеристиками и параметрами производства ФГУП ОКБ «Факел» г. Калининград [22]:

Таблица 1 – Стационарный плазменный двигатель СПД-70



Тип двигателя	СПД
Рабочее тело	Ксенон
Состояние разработки	Эксплуатируется
Электрическая мощность, Вт	660
Разрядное напряжение, В	300
Тяга, мН	40
Удельный импульс тяги, с	1470
КПД (тяговый и др.), %	43
Ресурс, ч	3100
Масса, кг	2,0
Габаритные размеры, мм	198×146×98
Количество двигателей в летной эксплуатации	128

Таблица 2 – Стационарный плазменный двигатель СПД-100



Тип двигателя	СПД
Рабочее тело	Ксенон
Состояние разработки	Эксплуатируется
Электрическая мощность, Вт	1350
Разрядное напряжение, В	300
Тяга, мН	83,0
Удельный импульс тяги, с	1600
КПД (тяговый и др.), %	45
Суммарный импульс тяги, кг·с	2,8·105
Ресурс, ч	>9000
Масса, кг	3,5
Габаритные размеры, мм	225×150×125
Кол-во двигателей в летной эксплуатации	272

Таблица 3 – Стационарный плазменный двигатель СПД-140



	Тип двигателя	СПД
Рабочее тело	Ксенон	
Состояние разработки	Квалификация	
Электрическая мощность, Вт	3000, 4500	
Разрядное напряжение, В	300	
Тяга, мН	193, 290	
Удельный импульс тяги, с	1680, 1770	
Достигнутый ресурс, ч	7850	
Летный ресурс, ч	-	
КПД, %	50, 55	
Суммарный импульс (прогноз), мН·с	11	
Масса, кг	8,4	
Габаритные размеры, мм	317×270×109	

В настоящем параграфе раскрыто определение электрореактивных двигательных установок, представлено место стационарных плазменных двигателей в разрезе общей современной классификации электрореактивных двигательных установок. Подробно рассмотрены этапы работы и алгоритм функционирования стационарных плазменных двигателей. Приведена справка о ведущем на мировом и российском рынке производителе ФГУП ОКБ «Факел» г. Калининград, представлены некоторые из производимых стационарных плазменных двигателей, в том числе и тех, которые используются АО «ИСС» г. Железногорск.

### 1.3 Калибровка тяги плазменных двигателей

Тяга является важнейшим показателем ЭРДУ. Различают два метода определения тяги в стендовых условиях: прямой и косвенный. При прямом методе тяга определяется по показаниям динамометрических устройств, которые предварительно градуируются. Косвенный метод определения тяги основан на вычислении тяги по результатам измерения других параметров.

ЭРДУ развивают малые тяги, порядка  $10^{-2} - 10^{-3}$  Н, поэтому измерение необходимо располагать совершенной и точной измерительной аппаратурой высокой чувствительности. Дополнительными трудностями являются: жесткость магистралей подвода рабочего тела и токопроводящих шин, а также влияние собственного веса двигателя.

Для измерения малой тяги можно применить как активный, так и реактивный метод. При активном методе в вытекающую из ЭРДУ струю помещают ловушку и измеряют силовое воздействие струи на ловушку. В применении к ЭРДУ этот метод наряду с гидродинамической погрешностью имеет также погрешность, которая обусловлена эффектом взаимодействия плазменного или ионного потока с ловушкой. Реактивный метод связан с созданием тягоизмерительной системы высокой чувствительности, уменьшением жесткости различных магистралей и токопроводящих шин.

Конфигурация токопроводящих шин и их взаимное расположение должны быть такими, чтобы электромагнитные силы неискажали результаты измерения тяги. При вертикальном расположении ЭРДУ тягоизмерительное устройство имеет уравновешивающую систему, чтобы скомпенсировать силу от собственного веса испытуемого двигателя. При горизонтальном расположении ЭРДУ тягоизмерительное устройство возможно в двух вариантах:

- упругие элементы под действием тяги (действующей в горизонтальном направлении) деформируются, и вся система перемещается в горизонтальном направлении;

- упругие элементы предварительно нагружены продольной нагрузкой (весом испытуемого ЭРДУ) в такой степени, что работают под критической нагрузкой и имеется автоматическая компенсирующая система, которая обеспечивает сохранение исходного положения.

При горизонтальном расположении ЭРДУ может быть установлен (подвешен) на упругих элементах (например, пластинах). Деформация изгиба этих элементов зависит от тяги ЭРДУ и может быть зарегистрирована с

помощью тензометрических, емкостных, индуктивных (линейных дифференциальных трансформаторов) преобразователей.

ЭРДУ может быть установлен горизонтально на площадке, к которой прикреплены поплавки, погруженные в стаканы с жидким металлом (например, ртутью). В этом случае такая плавающая подвеска выполняет одновременно функции жидкокометаллических контактов.

Горизонтальное расположение ЭРДУ во время испытаний отличается удобством и позволяет создать простые системы для измерения тяги. В таких системах ЭРДУ практически имеет одну степень свободы перемещения. Для того чтобы не возникло погрешностей измерения, нужно во время испытаний тщательно контролировать горизонтальность положения ЭРДУ.

Для измерения тяги ЭРДУ применяют также тягоизмерительное устройство типа крутильных весов. Горизонтальная траверза в средней части подвешена на тонком стержне, на одном конце траверзы закреплен испытуемый ЭРДУ (вместе с емкостью для рабочего тела), а на другом – уравновешивающая масса. Тяга ЭРДУ создает момент, который вызывает упругую деформацию кручения стержня, регистрируемую отсчетным устройством. Для подвода электрической энергии к ЭРДУ применяют многожильные гибкие кабели [23].

Тягоизмерительное устройство (ТИУ) – устройство предназначенные для преобразования горизонтальной тяги испытуемого блока коррекции в электрический сигнал в вакуумной камере и передачи его через герметичные разъемы в регистрирующее и отображающее оборудование вне камеры.

Унифицированный посадочный модуль (УПМ), продемонстрированный в Приложение Б., крепится на монтажной плате и предназначен для установки блока коррекции, преобразователя усилия (ПУ), модуля дистанционной калибровки (МДК) и компенсатора веса и жесткости подводимых цепей и магистралей. На универсальный посадочный модуль должны быть предусмотрены необходимые подвижные соединения, позволяющие передавать тяговое усилие на преобразователь усилия. На универсальный посадочный модуль должны быть предусмотрены опорные элементы, предназначенные для

крепления подводимых цепей и магистралей. Эскиз универсального посадочного места приведен на рисунке 1.6.

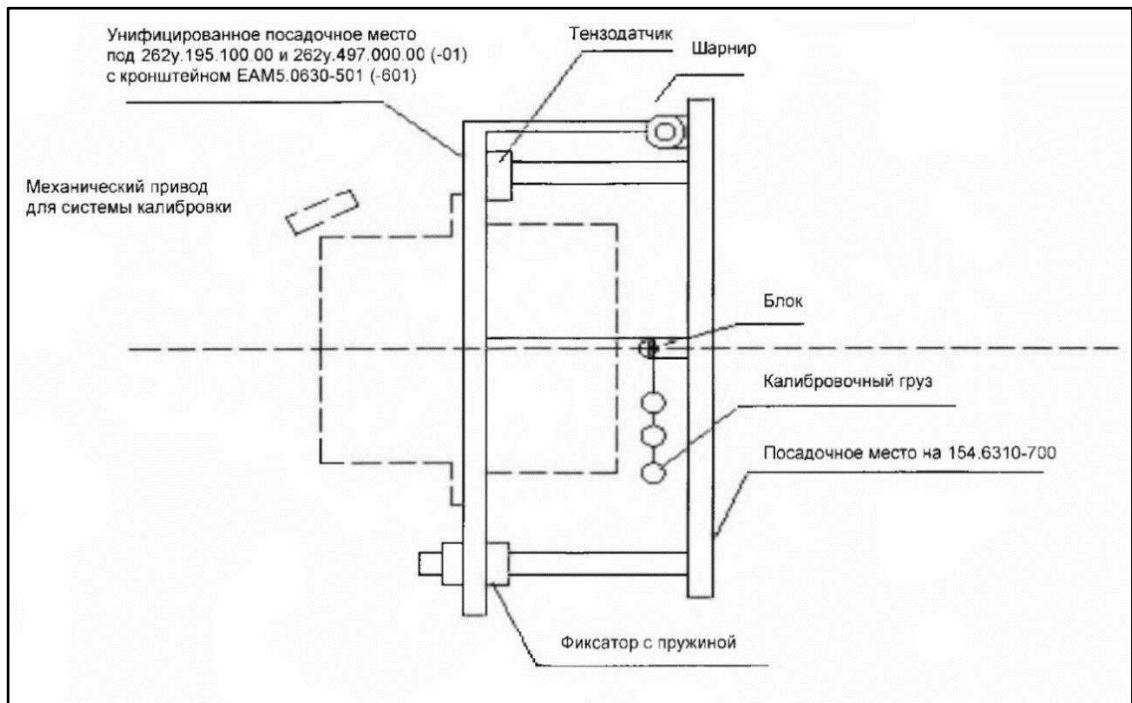


Рисунок 1.6 – Эскиз одного унифицированного посадочного модуля с ПУ и МДК

ПУ предназначен для преобразования усилия, возникающего при работе БК в электрический сигнал. Модуль дистанционной калибровки предназначен для калибровки выходного сигнала, формируемого преобразователем усилия в составе измерительной схемы тягоизмерительного устройства.

Программное обеспечение ТИУ предназначено для регистрации, отображения и трансляции в (собственный) электронный протокол и в программное обеспечение показаний преобразователей усилия ТИУ. Кроме этого программное обеспечение ТИУ должно обеспечивать управление модулями дистанционной калибровки автономно.

Масса унифицированного посадочного модуля вместе со всем установленном на нем оборудованием (кроме БК) – не более 7 кг.

### **1.3.1 Требования к преобразователю усилия**

Преобразователь усилия должен быть выполнен на основе мостового тензоизмерительного датчика силы. В нормальных условиях работы выходной сигнал предварительно прогретого преобразователя усилия при постоянной нагрузке 1 кг должен быть постоянным с отклонением за 1 час не более чем 0,05% от начальной величины. Диапазон измеряемых усилий от 0,01962 до 0,2942 Н (от 2 до 30 гс).

Абсолютная погрешность регистрируемой тяги (разность между значениями фактически приложенного и отображаемого (регистрируемого) усилия) - не более  $\pm 0,00981$  Н ( $\pm 1$  гс) во всех допустимых испытательных режимах.

Допустима передача полученного электрического сигнала в регистрирующее и отображающее оборудование вне вакуумной камеры в аналоговой или цифровой форме по обоснованному выбору разработчика.

Значение отображаемой и регистрируемой тяги должно рассчитываться по формуле 1.

$$F_{\text{РЕГ}} = \frac{(F_{\text{ПУ}} - b(ti))}{k(ti)} \quad (1)$$

где:  $F_{\text{РЕГ}}$  - значение регистрируемой тяги;

$k(ti)$  и  $b(ti)$ - коэффициенты линейной зависимости, определенные при калибровке при показании датчика температуры из состава преобразователя усилия, соответствующем температуре  $ti$ ;

$F_{\text{ПУ}}$  - значение сигнала, поступающего с преобразователя усилия.

Значение тяги должно отображаться на устройствах отображения информации и вноситься в протокол испытаний в физических единицах усилия - «Ньютон» («грамм-сила»).

ПУ должен выдерживать нагрузки в направлении сжатия не менее 10 кгс без изменения характеристик. Нагрузка на ПУ более 10 кгс – не допускается.

На период выполнения монтажных операций, хранения и транспортировки преобразователь усилия должен быть защищен фиксатором положения, исключающим его деформацию, воздействия ударов и вибрации.

### **1.3.2 Требования к модулю дистанционной калибровки**

Модуль дистанционной калибровки предназначен для калибровки выходного сигнала, формируемого преобразователем усилия в составе измерительной схемы ТИУ, с дискретным шагом 0,00981 Н (1 гс) от 0 до 0,0981 Н (10 гс).

Количество калибровочных грузов – 4 шт. Масса калибровочных грузов №1 = 1 г, №2 = 2 г, №3 = 4 г, №4 = 8 г. Последовательность калибровочных нагрузок 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15 гс. Отклонение массы калибровочных грузов от номинальной – не более  $\pm 0,01$  г.

При настройке и эксплуатации ТИУ в составе автоматизированного рабочего места огневых приемочных испытаний (АРМ ОПИ) должны быть предусмотрены следующие режимы калибровки УПМ:

- калибровка в автоматическом (или пошаговом) режиме каждого модуля отдельно;
- калибровка в автоматическом (или пошаговом) режиме всех модулей одновременно.

Продолжительность сеанса калибровки не более 5 минут. Вес нити и возможное трение нити при выполнении калибровки не учитывать. Калибровочная нить должна быть устойчива к вакууму. Привод устройства калибровки не должен влиять на работу БК.

## **1.4 Постановка задачи**

Современная система калибровки стационарных плазменных двигателей должна преобразовывать величину измеряемой тяги в информационный сигнал с заданной точностью, по мимо этого конструкция модуля дистанционной калибровки ограничена жесткими требованиями по габаритным размерам и требованиям к жестким условиям эксплуатации (условия вакуума и крайних температур).

Целью диссертационного исследования является разработка конструкции пьезоактуатора для калибровки тяги плазменных двигателей коррекции космических аппаратов (КА).

Для достижения означенной цели в рамках диссертационного исследования поставлены следующие задачи:

1) Исследование предметной области и анализ существующих методов и средств калибровки стационарных плазменных двигателей системы коррекции космического аппарата;

2) Разработка кинематического принципа функционирования модуля калибровки стационарных плазменных двигателей системы коррекции космического аппарата;

3) Разработка и создание модели конструкции пьезоактуатора для калибровки тяги стационарных плазменных двигателей коррекции космических аппаратов;

4) Проведение практических исследований отдельных узлов разработанной конструкции пьезоактуатора.

Для решения задач, в работе будут использованы существующие методы:

Имитационное моделирование (англ. *simulation*) – это разновидность экспериментального моделирования, реализуемого с помощью математических методов, компьютерных программ и технологий программирования, позволяющих на аналоге реального объекта (модели) осуществить целенаправленное исследование сложного процесса путем имитации его

действия средствами ЭВМ [24]. В диссертационной работе были приняты некоторые ограничения и допущения.

## **1.5 Выводы по главе 1**

В первой главе диссертационной работы осуществлен анализ предметной области, приведены общие сведения о системе коррекции, объяснена важность системы коррекции как одной из систем, обеспечивающих жизнедеятельность КА, так как, корректное функционирование космического аппарата возможно лишь при четком соблюдение его запланированной орбиты, проиллюстрирован принцип изменения траектории комического аппарата.

Рассмотрены стационарные плазменные двигатели как основной исполнительный орган системы коррекции, раскрыто определение электрореактивных двигательных установок, представлено место стационарных плазменных двигателей в разрезе общей современной классификации электрореактивных двигательных установок. Подробно рассмотрены этапы работы и алгоритм функционирования стационарных плазменных двигателей. Приведена справка о ведущем на мировом и российском рынке производителе ФГУП ОКБ «Факел» г. Калининград, представлены некоторые из производимых стационарных плазменных двигателей, в том числе и тех, которые используются АО «ИСС» г. Железногорск.

Представлено определение тяги электрореактивной двигательной установки, описаны два метода определения тяги. Отмечена важность обеспечений точной тяги двигателей коррекции. Более подробно рассмотрены существующие методики и средства калибровки плазменных двигателей коррекции. Дано определение понятиям тягоизмерительное устройство и унифицированный посадочный модуль, перечислены основные требования к преобразователю усилия и к модулю дистанционной калибровки.

Опираясь на вышеизложенный материал, была поставлена цель исследования – разработка конструкции пьезоактуатора для калибровки тяги плазменных двигателей коррекции космических аппаратов (КА).

## **2 Основной исполнительный элемент системы калибровки**

Изложены результаты поиска по информационному ресурсу Федерального института промышленной собственности запатентованных пьезокерамических элементов и устройств. Также в ходе выполнения первой задачи был осуществлен поиск по открытым ресурсам сети Интернет, проанализировано содержание сборников научно-практических конференций, сборники материалов выставок и форумов на заявленную тематику.

Среди отечественных ведущих производственных предприятий в области разработке пьезокерамических актуаторов можно выделить следующие:

- АО «Научно исследовательский институт «Элпа» г. Зеленоград. Научно исследовательский институт «Элпа» является ведущим в России разработчиком и производителем специфической научноемкой пьезотехнической продукции – пьезокерамических материалов, приборов на их основе, изделий акустоэлектроники. На предприятии было организовано производство, основанное на проведенных научных исследованиях и конструкторских разработок [25];

- ООО «Евротек Дженирал» г. Москва. Предприятие специализируется на поставках широкого спектра высокотехнологичного научного и промышленного оборудования для оснащения российских научных центров, лабораторий и производств (является дистрибутером) [26];

- Дистрибутор компании «CEDRAT TECHNOLOGIES» ООО «Промышленная метрология» г. Санкт-Петербургом. Компания обеспечивает поставку пьезоэлектрических двигателей и электронных компонентов стандартного и повышенного (космического) уровня качества, обладает собственной пьезоэлектрической лабораторией, обеспечивает поставку и установку оборудования и программного обеспечения для линейно-угловых измерений [27];

- ОАО «Научно-исследовательский институт физических измерений» (НИИФИ) г. Пенза. АО «НИИФИ» - предприятие Федерального космического

агентства, специализирующееся в области создания и применения измерительной аппаратуры в ракетно-космических комплексах научного, социально-экономического и двойного назначения и являющееся центром компетенций по пьезотехнике и созданию датчико-преобразующей аппаратуры, систем измерения, диагностики, управления для ракетно-космической техники [28].

- ОАО «Витебский завод радиодеталей «Монолит» (ОАО «ВЗРД «Монолит») г. Витебск. Завод специализируется по производству электронных компонентов в СНГ, соответствует требованиям российских стандартов и аттестована на право разработки и производства изделий электронной техники в системе «Военэлектронсерт» Министерства обороны Российской Федерации [29].

## **2.1 Обзор существующих пьезоактуаторов**

На сегодняшний день существует большое количество разнообразных типов и видов пьезокерамических актуаторов, но не существует единой международной классификации. В зависимости от используемых направлений пьезоэффектов, конструкции, предназначения их условно можно свести в нижеперечисленные основные группы.

Пакетные (линейные) пьезоактуаторы – наиболее широко используемые. В свою очередь они делятся на разнообразные типы, например, низковольтные и высоковольтные, корпусные и бескорпусные многослойные дискретные и многослойные монолитные и прочие типы. Пакетные актуаторы могут генерировать силу огромной величины – 100 килоньютон и более. Максимальный ход не превышает 500 мкм. Для защиты пьезокерамического пакета они выполняются в металлических корпусах со встроенной системой предварительного механического напряжения как изображено на рисунке 2.1.

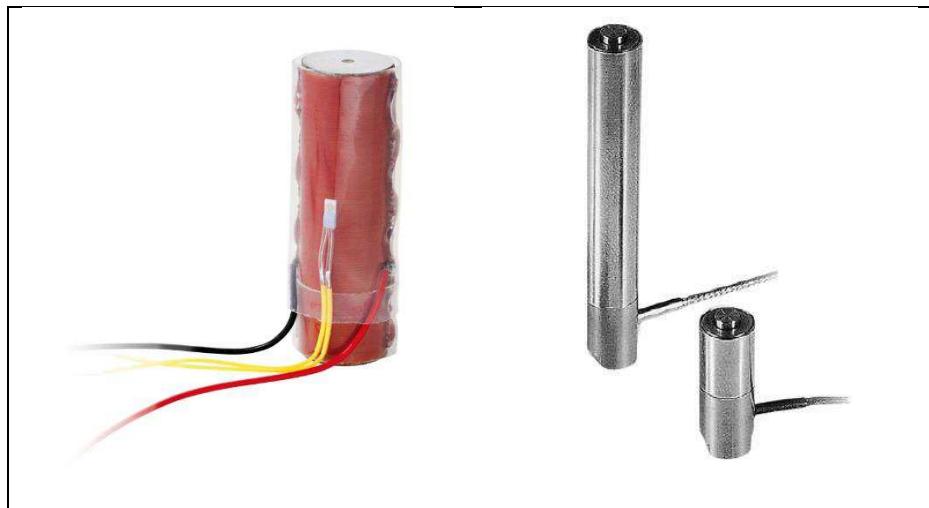


Рисунок 2.1 – Пакетные (линейные) пьезоактуаторы

Трубчатые пьезоактуаторы проиллюстрированы на рисунке 2.2 – в основе принципа работы лежит явление сужения внутреннего сечения полого пьезокерамического цилиндра. В основном применяются в сканирующих микроскопах и микронасосах.



Рисунок 2.2 – Трубчатые пьезоактуаторы

Зашемляемые изгибные пьезокерамические биморфы. Отличительной особенностью актуаторов такой конструкции является их специфическое крепление (зашемление). Данная конструкция обеспечивает значительные перемещения в миллиметровом диапазоне, но при низкой жесткости, малой

блокирующей силе и резонансной частоте. В зависимости от формы такие актуаторы бывают пластинчатыми и дисковыми как показано на рисунке 2.3.

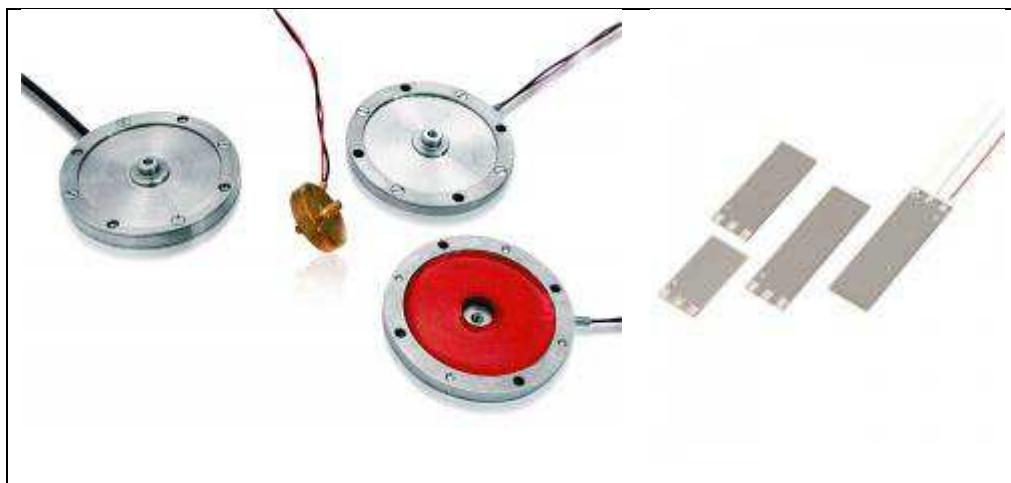


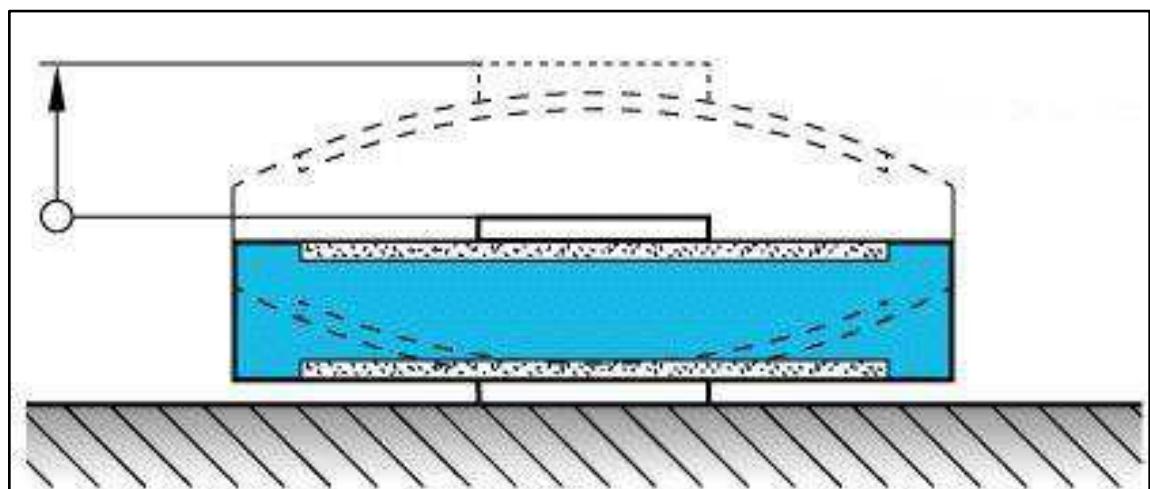
Рисунок 2.3 – Изгибные пьезокерамические биморфы (дисковые и пластинчатые)

Дисковые биморфные пьезоактуаторы состоят из двух склеенных дисков, закреплённых по диаметру. В основе работы пьезоактуатора лежит обратный пьезоэффект. В результате приложения напряжения на электроды верхнего диска происходит его радиальная деформация, при этом, как показано на рисунке 2.4, нижний пьезодиск остаётся неподвижным. Таким образом, пьезоактуатор приобретает форму свода.

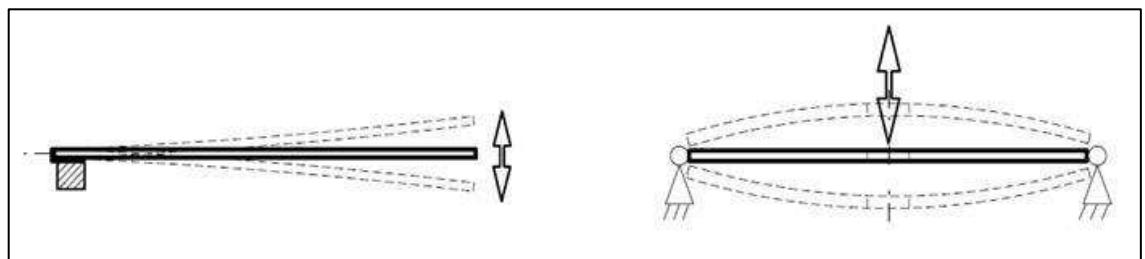
Пьезоактуаторы изгиба пьезокерамические компоненты изготавливаются из пьезокерамических слоёв толщиной около 50 мкм с нанесением серебряно-палладиевых электродов на верхний слой. Мультислойные пьезоактуаторы обладают более высокой жёсткостью и временем отклика по сравнению с биморфными пьезоактуаторами, а также низким значением управляющего напряжения (от 0 до 60 Вольт или от – 30 до 30 Вольт). Работа при низких напряжениях позволяет миниатюризировать систему управления. Данные устройства устойчивы к влажности. Высокие резонансные частоты пьезоактуаторов изгиба позволяют использовать их для высокодинамических приложений с малыми нагрузками. Температура Кюри таких пьезоактуаторов

составляет  $320^{\circ}$  С, что позволяет использовать их при температурах до  $150^{\circ}$  С.

Данные устройства можно использовать для работы в вакууме (до  $10 - 9$  ГПа).



а) принцип работы защемляемого дискового пьезокерамического биморфа



б) принцип работы защемляемого пластинчатого пьезокерамического биморфа

Рисунок 2.4 – Изгибные пьезокерамические биморфы (дисковые и пластинчатые)

Сдвиговые пьезоактуаторы способны генерировать большую блокирующую силу при значительном сдвиге. Находят применение в качестве пьезоэлектрических линейных моторов, а также как изображенные на рисунке 2.5, одноосевые и двухосевые позиционирующие элементы.

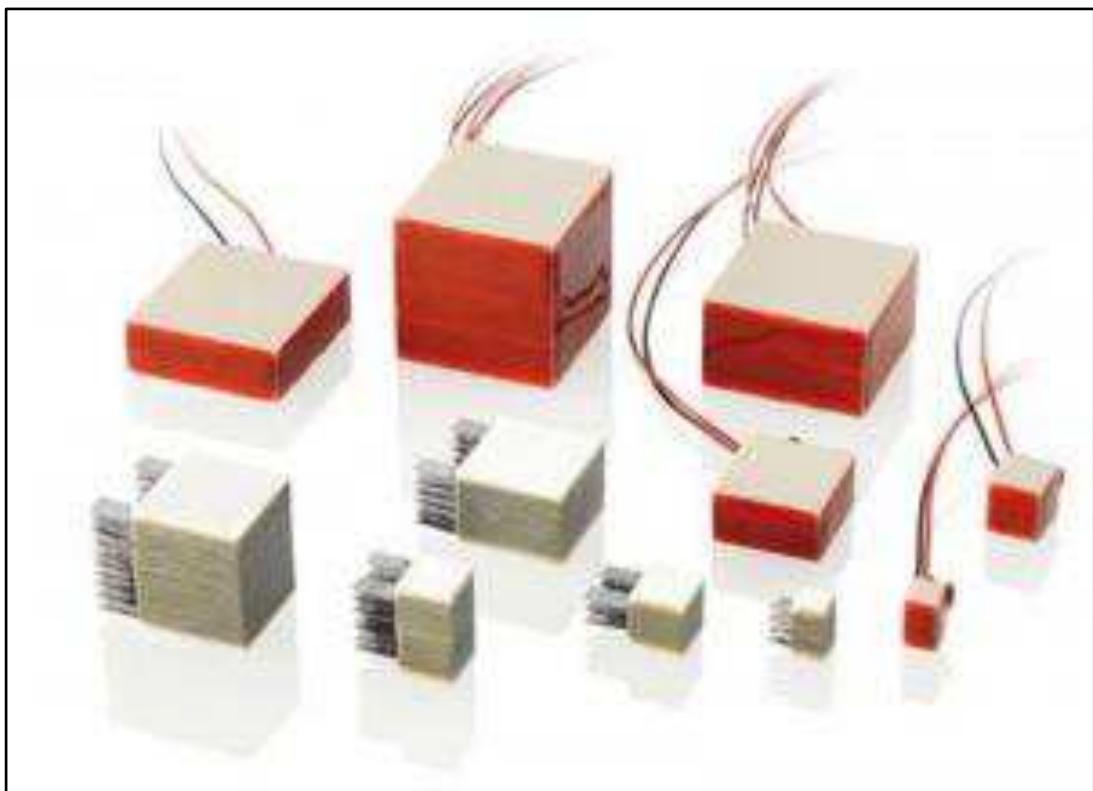


Рисунок 2.5 – Сдвиговые пьезоактуаторы

Ламинарные полосковые пьезоактуаторы (актуаторы сжатия). Активный материал этих актуаторов представляет собой полоски пьезокерамики. Сдвиг в таких актуаторах происходит в 5 направлении, перпендикулярном направлению поляризации и приложенному электрическому полю.

Актуаторы с интегрированным рычажным усилителем перемещения предназначены для обеспечения субнанометрического разрешения при увеличенном перемещении.

Управляемые пьезофлексерные актуаторы – представляют собой сложные позиционирующие устройства на базе пьезоактуатора с интегрированным в него флексером. Применяются в тех случаях, когда требуется получить исключительно прямое перемещение по одной и более осям (до шести осей) с нанометрическим отклонением от идеальной траектории. Такие устройства часто используют с рычажным усилителем перемещения, что позволяет увеличить максимальный ход

пьезоактуатора почти в 20 раз, в результате чего он может составлять несколько сотен микрон [30].

## 2.2 Пьезокерамический биморф

Для конструкции устройства калибровки плазменных двигателей космических аппаратов, был выбран пьезокерамический актуатор изгибного типа, проиллюстрированного на рисунке 2.6.

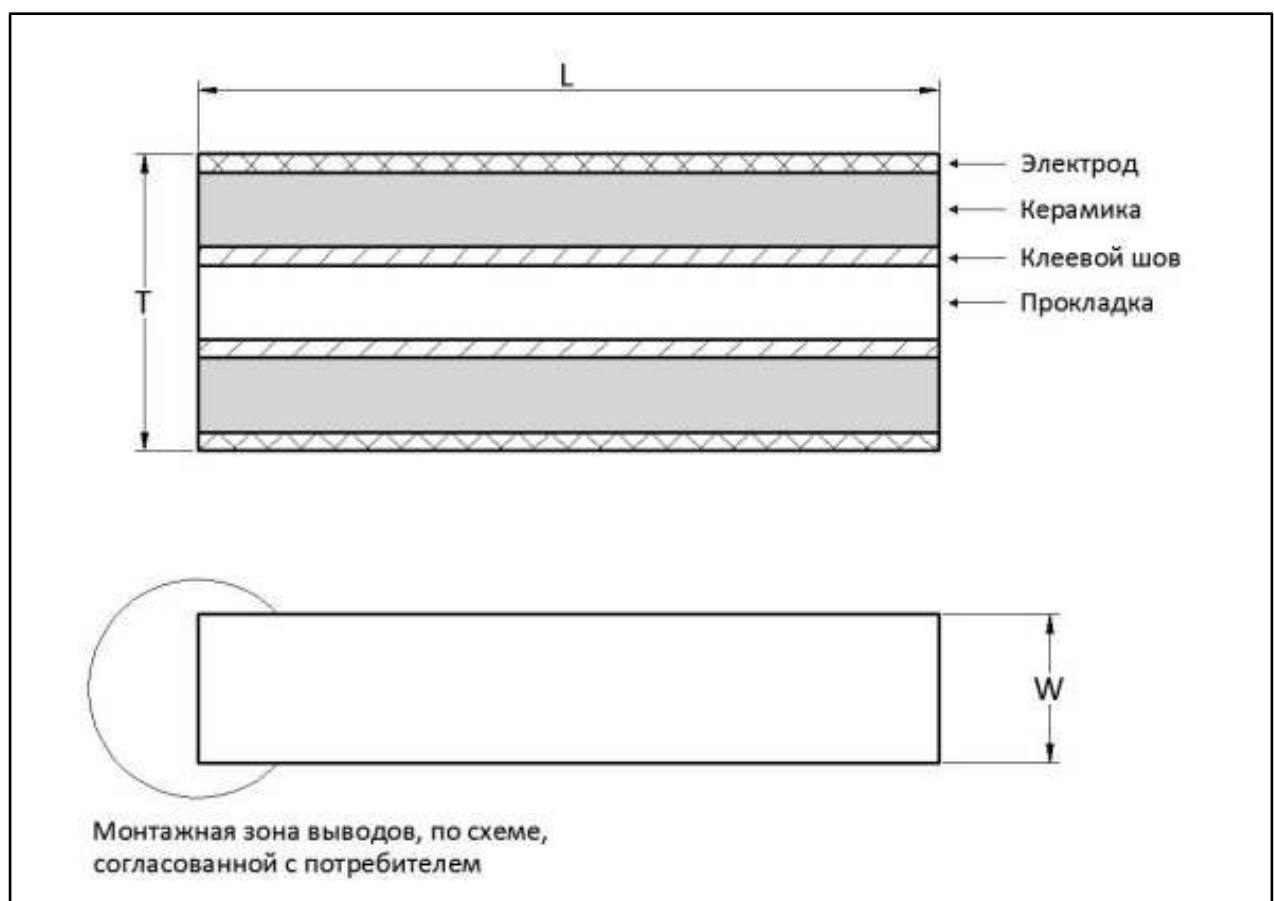


Рисунок 2.6 – Конструкция пьезокерамического биморфа

К преимуществам пьезоактуаторам изгибного типа можно отнести: не лимитированные возможности по разрешению – пьезоэлектрические актуаторы преобразуют электрическую энергию непосредственно в механическую. Способность осуществлять перемещение в субнанометрическом диапазоне,

скорость срабатывания – в диапазоне микросекунд. Также к характеристикам можно отнести: развитие больших сил – существующие на сегодняшний день мощные пакетные актуаторы способны перемещать конструкции весом 100 и более тонн на 250-500 микрон с минимальным шагом (чувствительностью) 0,05 – 0,1 нм; отсутствие магнитного поля - действие актуаторов связано с электрическими полями; схема подключения пьезобиморфа в электрическую цепь проиллюстрировано на рисунке 2.7.

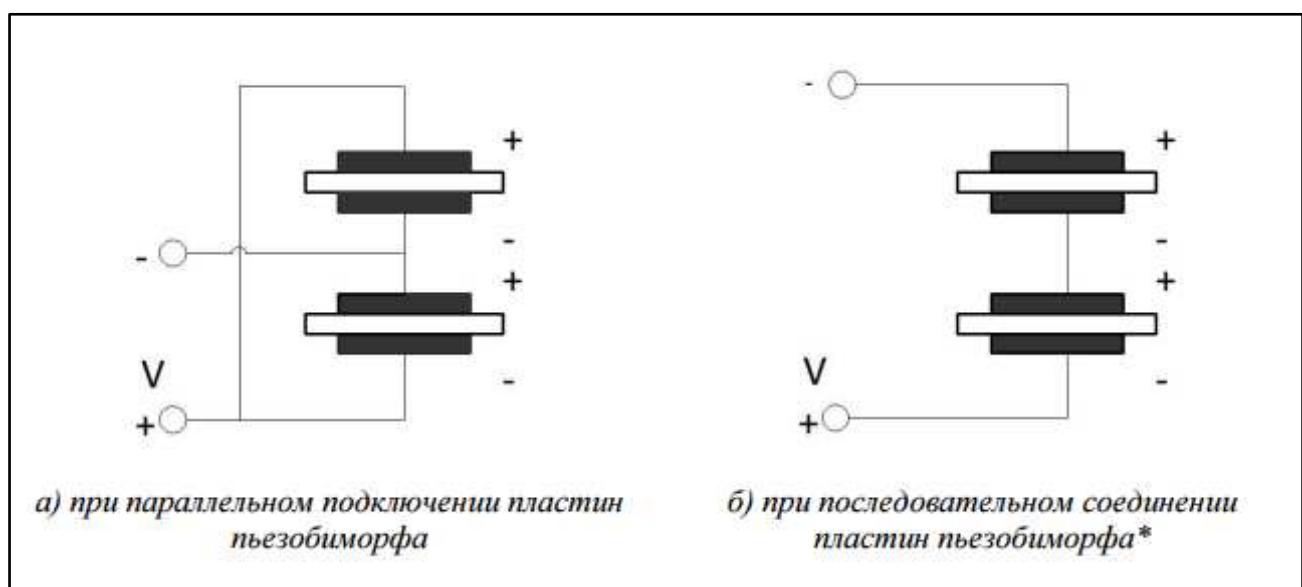


Рисунок 2.7 – Вариативность подключения пьезокерамического биморфа

Они не генерируют магнитные поля, а также не подвержены влиянию таких. Это особенно важно при использовании в оборудовании, где недопустимы электромагнитные помехи. Внешний вид и способ заделки пьезокерамического биморфа изображен на рисунке 2.8.

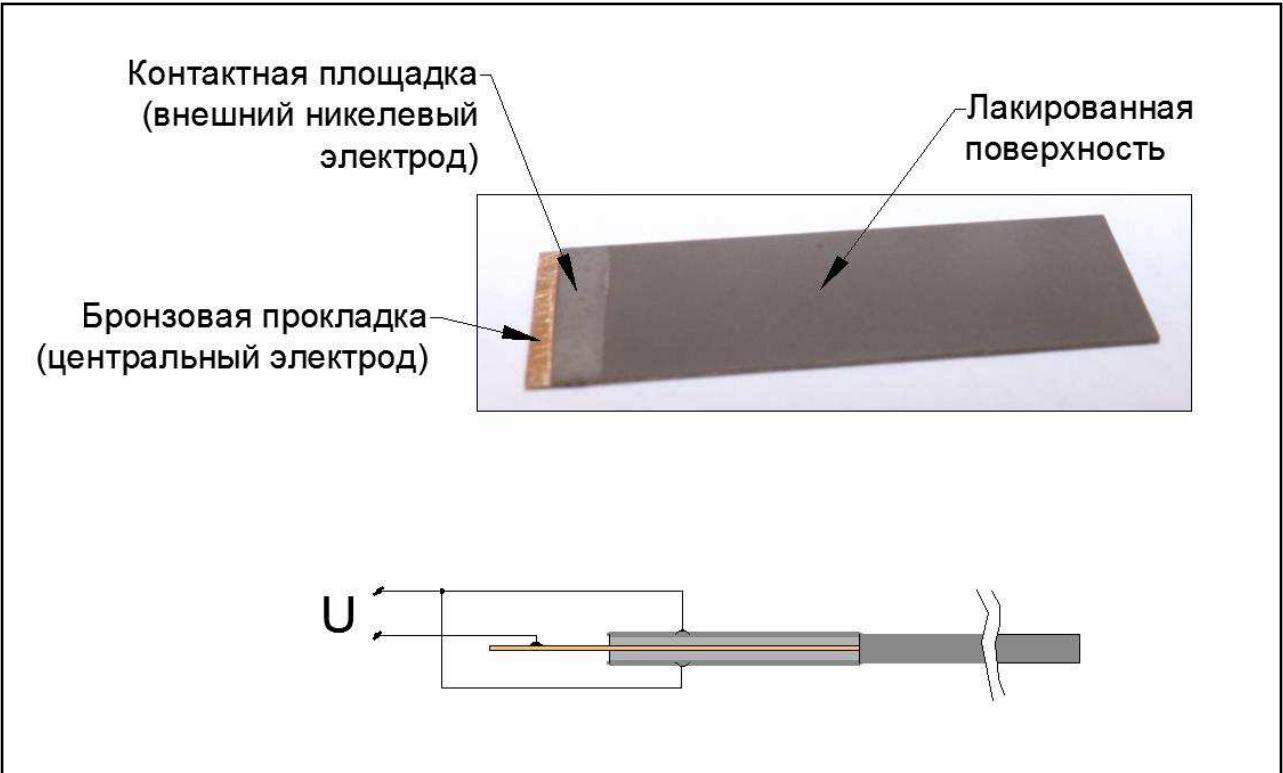


Рисунок 2.8 – Внешний вид и схема подключения пьезокерамического биморфа

Низкое потребление энергии – в статическом состоянии, даже под воздействием больших нагрузок, актуаторы не потребляют энергию. Действие пьезоактуаторов очень схоже с электрическим конденсатором. В состоянии покоя также не выделяется тепловая энергия. Не подверженность износу - в конструкции пьезоактуаторов нет шестерен или подшипников. Их перемещение обусловлено динамикой твердого тела. На практике не выявлен у пьезоактуаторов какой-либо износ после нескольких миллионов рабочих циклов. Возможность работы в экстремальных условиях – пьезоактуаторы не требуют смазки, а пьезоэлектрический эффект присутствует даже при низких температурах. Выбранный пьезоактуатор, способный работать при криогенных температурах. А также означенный актуатор относится к актуатором с керамической изоляцией, которые идеально подходят для работы в условиях сверхвысокого вакуума [30].

## 2.3 Эффект гистерезиса при эксплуатации биморфа

В автоматизированных системах, используемых в различных областях народного хозяйства, часто встречается задача обеспечения контролируемой, дозирующей тяги в вертикальном и горизонтальном направлениях. Перемещение грузов, деталей и других мелкогабаритных объектов в означенных направлениях, является важной, актуальной задачей в мехатронике. В частных случаях, когда в роботах, автоматах, конвейерных машин не допускается использование подъемных узлов, основанных на электромагнитных устройствах, предлагается подъемный механизм на основе пьезоактуатора.

В данной работе в рамках решения задачи калибровки стационарных плазменных двигателей, исполнительным элементом системы калибровки является пьезокерамический биморф [31] и дисковое колесо. Под термином биморф в настоящем отчете предполагается элемент, состоящий из двух тонких склеенных между собой пьезокерамических пластин с прокладкой между ними или без нее, склейка осуществляется с помощью эпоксидного компаунда или легкоплавкого припоя [32,33]. Если конструкция закреплена с одной стороны консольным образом, то свободный конец совершают угловые перемещения [34]. Внешний вид пьезокерамического биморфа и принципиальная схема его подключения приведены на рисунках 2.9, 2.10.

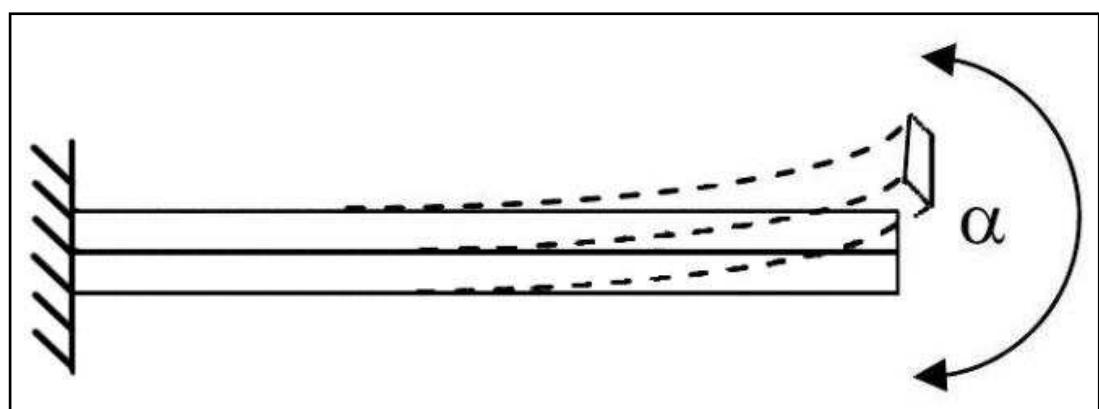


Рисунок 2.9 – Пьезокерамический биморф, изгиб конструкции биморфа

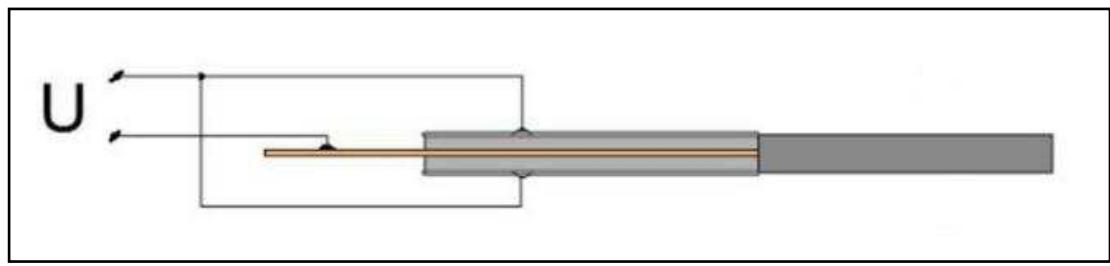


Рисунок 2.10 – Пьезокерамический биморф, принципиальная схема подключения биморфа

Лабораторные исследования и практические эксперименты показали, что биморф, как генератор силы, обладает ярко выраженным гистерезисом. На рисунке 2.11 приведена экспериментальная кривая, полученная в полном диапазоне допустимых напряжений на биморфе ЭП-9-47-ПлБ-001.

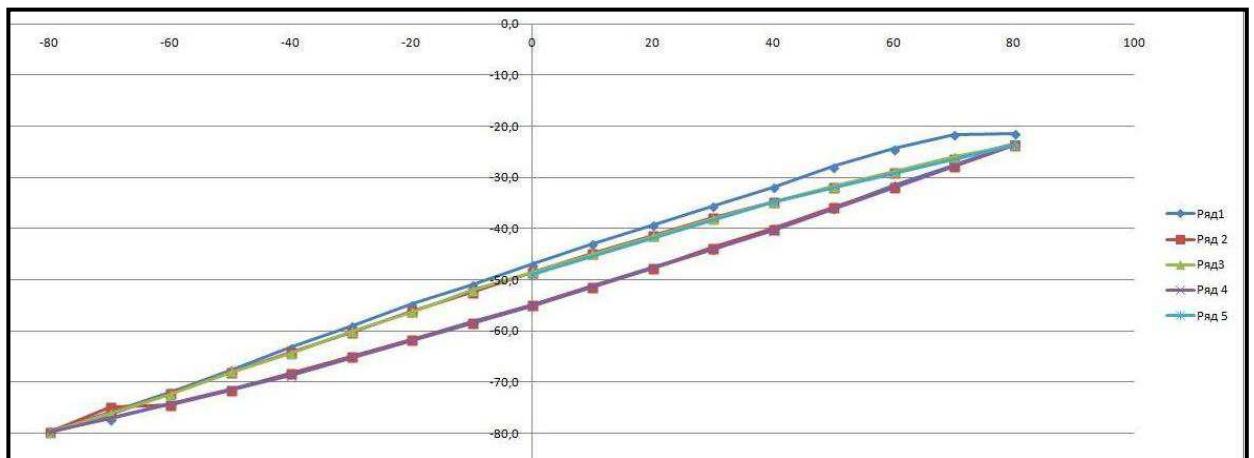


Рисунок 2.11 – Большая петля гистерезиса биморфа (ОХ – сила, регистрируемая датчиком силы, ОY – напряжение на биморфе)

На графике видно, что первая ветвь биморфа (Ряд1) проходит по точкам, отличным от тех, которые далее с высокой точностью ложатся на классическую петлю гистерезиса (Ряд2 – Ряд5).

Размах генерируемой биморфом силы при максимально допустимых напряжениях на нем избыточен для калибровки ТИУ в пределах от 0 до 8 гс,

поэтому можно понизить напряжение на биморфе до предела, обеспечивающего необходимые усилия калибровки [35]. В нашем случае напряжение питания биморфа выбрано 42 В (при желании можно повысить почти в два раза), а размах напряжений на биморфе, генерируемый контроллером ТИУ  $\pm 29$  В. При более низких напряжениях ширина петли гистерезиса силы сужается, график этого процесса изображен на рисунке 2.12.

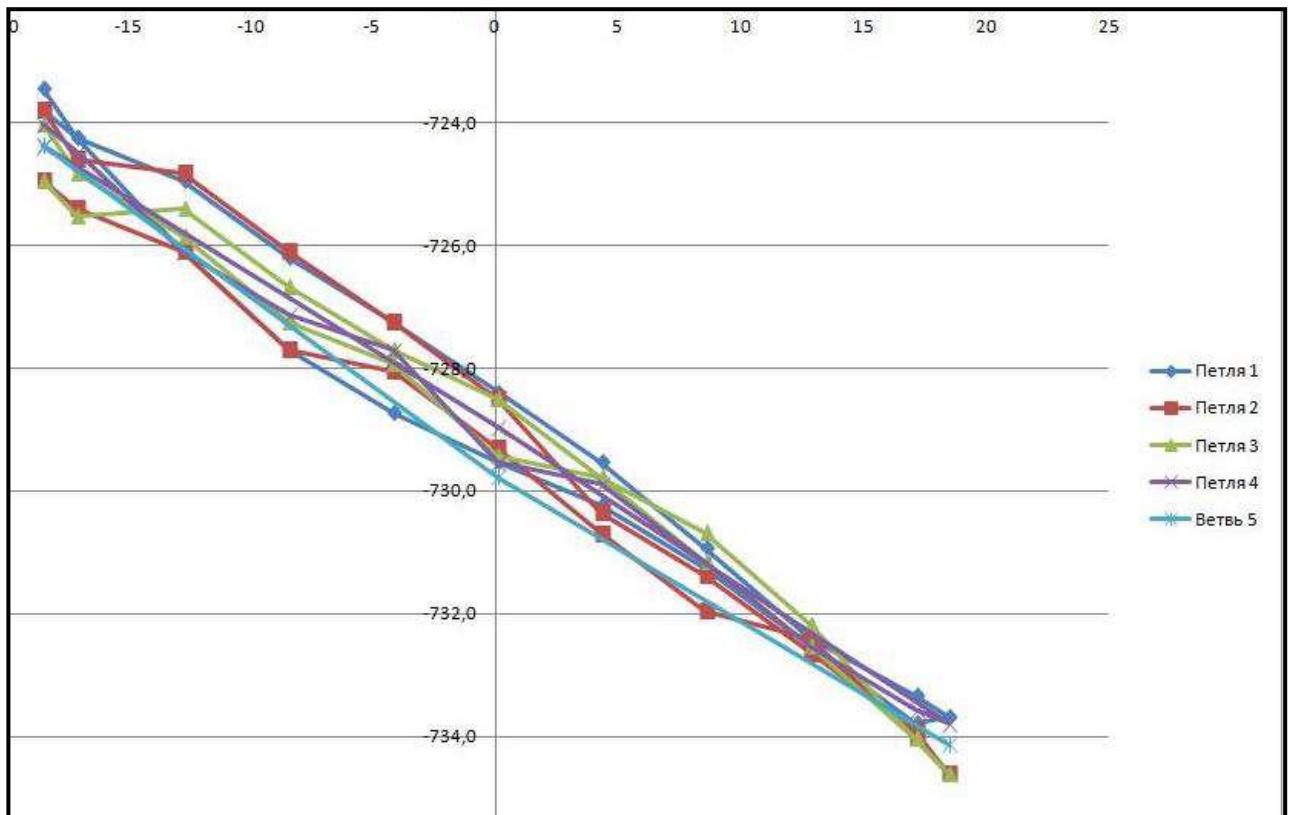


Рисунок 2.12 – Малая петля гистерезиса биморфа (ОХ – сила, регистрируемая датчиком силы, ОY – напряжение на биморфе)

Однако ширина петли гистерезиса все же остается широкой. Поэтому при калибровке ТИУ следует пользоваться всегда одной (верхней или нижней) кривой гистерезиса.

Гистерезис в пьезоактуаторах определяется поляризацией кристаллической решетки и молекулярными эффектами, происходящими при смене направления перемещения рабочего тела актуатора [36]. На рисунке 2.13

показаны полупетли кривой гистерезиса биморфа. Эти кривые воспроизводятся с высокой точностью.

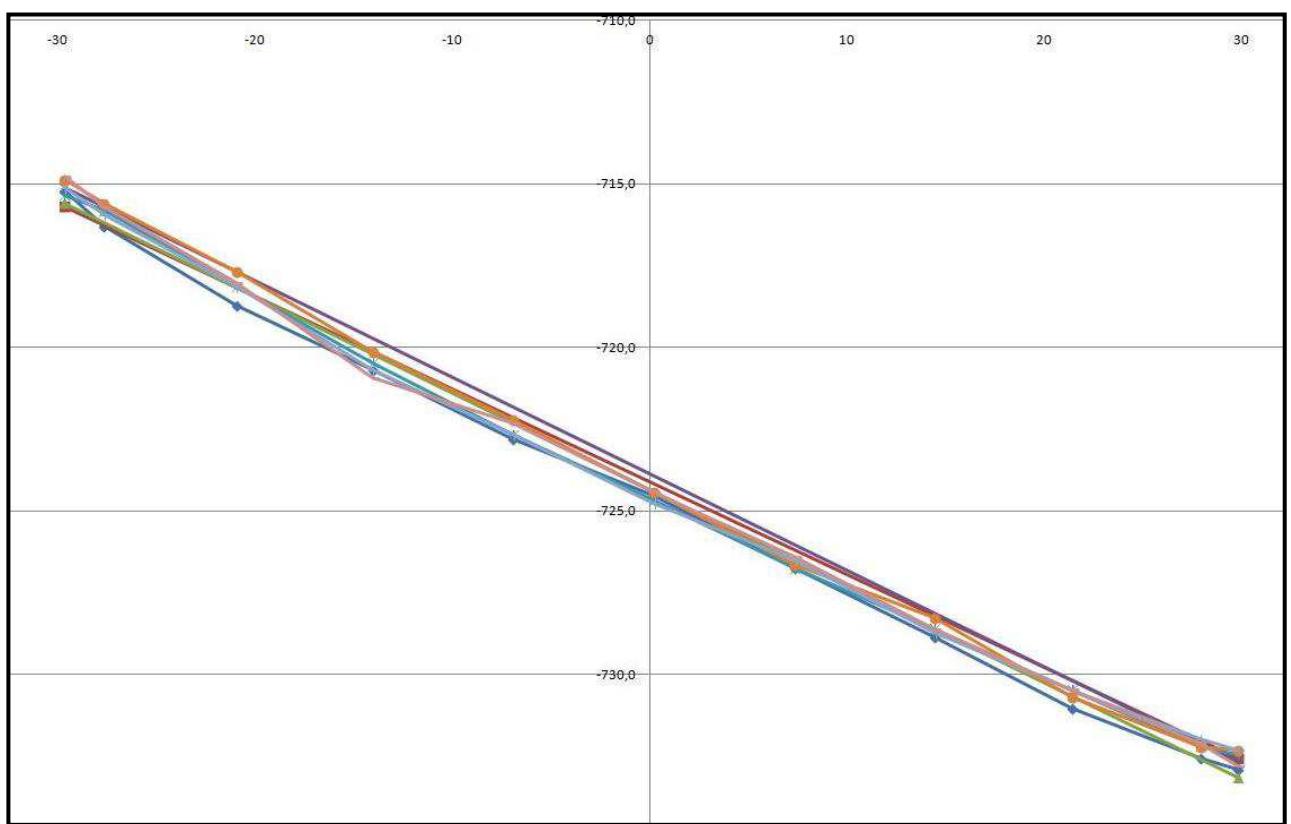


Рисунок 2.13 – Малая полупетля гистерезиса биморфа

Гистерезис – свойство физической системы не реагировать мгновенно на приложенное воздействие или не возвращаться полностью в свое исходное состояние как показано на рисунке 2.14. Явление гистерезиса подлежит контролю при работе пьезоактуатора в режиме управления без обратной связи (разомкнутой цепи). Актуатор проявляет диэлектрический и электромагнитный гистерезис в условиях больших уровней управляющего напряжения. Гистерезис определяется поведением поляризованной кристаллической структуры и молекулярными эффектами в пьезокерамике [37].

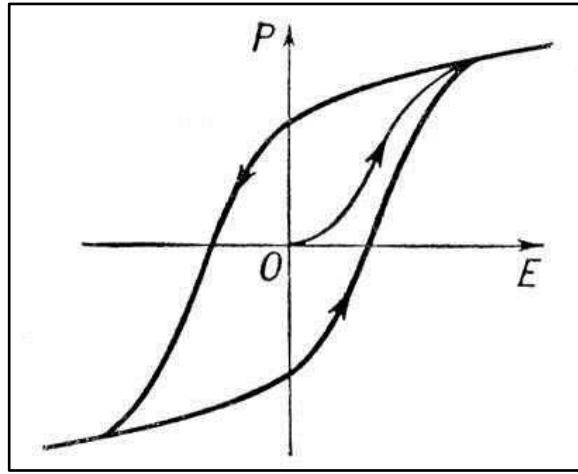


Рисунок 2.14 – Гистерезис пьезоактуатора, работающего в режиме открытой цепи, в зависимости от различных пиковых напряжений.

Гистерезис связан с величиной конкретного перемещения, а не с величиной номинального шага. Величина гистерезиса актуатора пропорциональна управляющему напряжению (напряженности поля). «Провал» в кривой зависимости перемещения от напряжения обычно начинается на уровне 2% (слабый сигнал) и длится до уровня 10 – 15% при подаче сильного сигнала (наибольшее значение характерно для сдвиговых актуаторов). Например, если управляющее напряжение пьезоактуатора с ходом в 50мкм увеличить на 10%, что эквивалентно увеличению перемещения приблизительно на 5мкм, то способность выполнить управление (повторяемость позиции) останется на уровне 1% от полного хода или чуть больше, чем 1мкм. Чем меньше величина перемещения, тем меньше недостоверность. Гистерезис нельзя путать с холостым ходом обычного механизма. Холостой ход практически не зависит от перемещения, а остается постоянным для данной системы.

Для задач, где не требуется прецизионного позиционирования, гистерезис является второстепенным фактором, и можно использовать пьезоактуаторы в режиме работы незамкнутой цепи. Такая схема может использоваться даже при необходимости обеспечения высокого разрешения. Для снижения явления гистерезиса подбирается оптимальная система управления или вводится система

обратной связи. Работа в режиме обратной связи позволяет полностью компенсировать явление гистерезиса. Это применяется тогда, когда требуется обеспечить абсолютную информацию о позиционировании системы, а также перемещение с высокой степенью линейности, повторяемости и точности в нанометрическом диапазоне [38].

Материалы конструкции пьезоактуатора должны удовлетворять требованиям эксплуатации в термовакуумных условиях при крайних температурах, особенно важным является параметр газации материала в условиях вакуума.

Тестируемая модель пьезокерамического биморфа отвечает условиям предъявляемым техническим заданием для модуля дистанционной калибровке. Основным требованием к устройствам, реализуемых в космической отрасли и функционирующих в условиях вакуума, является минимизация массогабаритных показателей и компактность.

Разработка актуатора на основе пьезокерамичкого биморфа позволит удаленно поводить пошаговую калибровку и сверять показания датчика на рамке подвеса двигателя с номиналом грузов, действующих на калибровочную нить. Оператор, проводящий процедуру калибровки, постоянно будет иметь актуальную информацию о состоянии всех четырех грузов за счет наличия индикаторной лапки, замыкающей контакт в момент, когда груз находится в верхнем положении.

Широкий диапазон входного напряжения питания пьезокерамических биморфов, позволяет регулировать амплитуду колебания, что в свою очередь обеспечивает плавное поднятие и опускание грузов. В конструкции предусмотрены направляющие стержни для рабочего хода грузов для вертикально направленного воздействия грузов на калибровочную нить.

## **2.4 Выводы по главе 2**

Во второй главе диссертационной работы изложены результаты поиска по информационному ресурсу Федерального института промышленной собственности запатентованных пьезокерамических элементов и устройств, а также поиск по открытым ресурсам сети Интернет, проанализировано содержание сборников научно-практических конференций, сборники материалов выставок и форумов на заявленную тематику. Сформирована актуальной базы данных пьезокерамических элементов и конструкций, предложена классификации типов и видов пьезокерамических актуаторов. Проработка стратегии и обоснование выбора пьезокерамического элемента для решения, в рамках диссертационного исследования, задачи практически-прикладного характера.

Лабораторные исследования и практические эксперименты показали, что биморф, как генератор силы, обладает ярко выраженным гистерезисом. В результате проведенных экспериментов можно сказать, что управление бимирфом относительно поданного на него напряжения линейно, ширина петли гистерезиса все же остается весьма существенной. Исходя из выявленного эффекта гистерезиса в функциональной работе пьезокерамического биморфа предлагается следующий алгоритм управления:

- выдать на биморф минимально возможное напряжение (биморф ослабит давление на датчик силы);
- подать выбранное напряжение, которое обеспечит заданную силу на датчике (такое двухступенчатое управление биморфом обеспечит нагружение датчика силы и воспроизводимость этого нагружения с точностью лучше, чем 1 гс);
- завершение работы с биморфом является процедура «парковки» (после калибровок необходимо перевести биморф в «нулевое» состояние путем нескольких колебаний напряжения на нем около нулевого значения с непрерывно падающей амплитудой).

Таким образом в задачах точного, высокопрецизионного приложения силы в системах с использованием пьезокерамического биморфа, предложенный алгоритм и результаты практических экспериментов позволяют существенно повысить точность прилагаемых усилий и уменьшить погрешность управления исполнительным устройством.

### **3 Разработка конструкции пьезоактуатора**

В независимости от объекта конструирования, процесс конструирования можно разделить на ряд, выработанных практикой, этапов. Государственным стандартом Единая система конструкторской документации (ЕСКД) ГОСТ 2.103 – 2013 «ЕСКД. Стадии разработки» определена следующая последовательность и содержание этапов разработки и производства на основании технического задания (ТЗ) заказчика [39]:

- разработка технического предложения – совокупности конструкторской документации, которая должна содержать техническое и технико-экономическое обоснование целесообразности разработки конструкции изделия на основании анализа технического задания и различных вариантов возможных решений, сравнительной оценки решений, а также патентных материалов;
- разработка эскизного проекта – совокупности конструкторской документации, которая должна содержать принципиальные конструкторские решения, дающие общие представления об устройстве, а также данные, определяющие назначение, основные параметры и габаритные размеры изделия. Эскизный проект после согласования и утверждения служит основанием для разработки технического проекта или рабочей конструкторской документации;
- разработка технического проекта – совокупности конструкторской документации, которая должна содержать окончательное техническое решение, дающее полное представление об устройстве разрабатываемого изделия и исходные данные для разработки рабочей конструкторской документации. Технический проект после согласования и утверждения служит основанием для разработки рабочей конструкторской документации;
- разработка рабочей документации опытного образца изделия, конструкторской документации, предназначенной для изготовления и испытания опытного образца на основании решений, принятых в техническом проекте.

Рабочая документация опытного образца изделия должна включать конструкторскую документацию, для обеспечения возможности технической подготовки производства, изготовления и испытания опытного образца изделия на предприятии [39].

### **3.1 Основные элементы и функции среды разработки**

Для разработки и моделирования элементов конструкции и создания сборки системы калибровки стационарных плазменных двигателей космического аппарата, в рамках настоящего диссертационного исследования осуществлялась в среде 3D-моделирования SolidWorks.

SolidWorks (Солидворкс) – программный комплекс система автоматизированного проектирования (САПР) для автоматизации работ промышленного предприятия на этапах конструкторской и технологической подготовки производства. Обеспечивает разработку изделий любой степени сложности и назначения [40].

При моделировании и разработке модуля дистанционной калибровки в САПР SolidWorks использовалась возможность создания файлов, которые содержат элементы из других файлов, схема структуры взаимосвязей проиллюстрирована на рисунке 3.1.

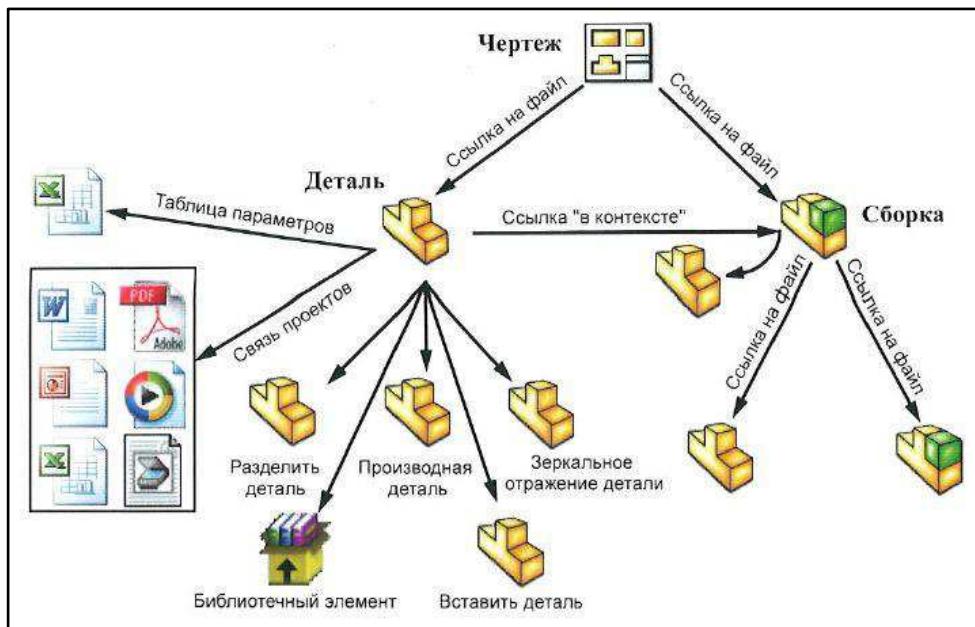


Рисунок 3.1 – Структура взаимосвязей файлов, элементов, деталей и сборок

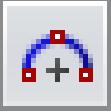
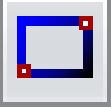
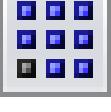
Преимуществом прикладного пакета программ SolidWorks является возможность вместо дублирования информации, содержащейся в многочисленных файлах, использовать ссылки на файл, которые создаются путем связывания файлов.

Ниже приведены основные структурные элементы их обозначения на панели инструментов SolidWorks (таблица 4) используемые для создания непосредственно самой модели модуля дистанционной калибровки стационарных плазменных двигателей космических аппаратов [41].

Таблица 4 – Элементы и функции САПР SolidWorks

Название элемента	Обозначение элемента	Описание элемента
Компоненты панели инструментов «Эскиз»		
Сплайн		Создание сплайнов с несколькими точками

## Продолжение таблицы 4

Название элемента	Обозначение элемента	Описание элемента
Дуга (через 3 точки)		Вычерчивание дуги через 3 точки
Окружность		Вычерчивание окружностей
Скругление		Срезается угол на пересечении двух объектов эскиза
Прямоугольник		Вычерчивание прямоугольников из угла
Линия		Вычерчивание линий
Зеркало		Зеркально отразить объекты
Точка		Вычерчивание точек
Массив		Создание линейных массивов эскизов
Компоненты панели инструментов «Элементы»		
Вытяжки		Вытяжка - это элемент, вытягивающий материал из эскиза по нарисованному контуру

#### Окончание таблицы 4

Название элемента	Обозначение элемента	Описание элемента
Вырезы		Вырез - это элемент, удаляющий материал из детали или сборки
Придать толщину		Создает твердотельный элемент путем придания толщины одному или нескольким соседним поверхностям.
Линейный массив		Линейный массив отображается при размещении одного или нескольких элементов вдоль одной или двух траекторий
Скругление		Скругление создает скругленную внутреннюю или внешнюю грань на детали, имеется возможность скруглить все кромки грани, выбранные множества граний, выбранные кромки или петли.
Уклоны		Команда заостряет выбранные грани модели под заданным углом

В связи с развитием новых электронных технологий существует более развитое программное обеспечение в области телекоммуникаций и систем обработки данных, благодаря им составление проектов, схем, рисунков, графиков можно делать и на электронных устройствах, что даёт возможность проектировщикам (инженерам, дизайнерам) экономить массу времени на создании какого-либо проекта или же объекта-модели. 3D-моделирование – это процесс создания виртуальных объемных моделей любых объектов, позволяющий максимально точно представить форму, размер, текстуру объекта,

оценить внешний вид и эргономику изделия [42]. Трёхмерная графика активно применяется для создания изображений на плоскости экрана или листа печатной продукции в науке и промышленности, например, в системах автоматизации проектных работ, архитектурной визуализации, в современных системах медицинской визуализации. Использование 3D-моделирования для решения задач промышленного предприятия даёт некоторые преимущества:

- снижение затрат на изготовление каких-либо изделий;
- очень быстрая разработка новых изделий;
- простота использования готовых изделий.

### **3.2 Разработка кинематической схемы пьезоактуатора**

В основе функционирования пьезоэлектрических двигателей вращения лежит принцип, согласно которому все точки пьезоэлемента, входящие в контакт с ротором, должны двигаться по траектории описывающей эллипс. Для этого в пьезоэлементе одновременно возбуждают два типа взаимно ортогональных колебаний. В простейшей кинематической схеме в пьезоэлементе электрически возбуждены продольные по длине волны, а поперечные волны – изгибные возбуждаются при движении конца пьезоэлемента по поверхности ротора. Тогда коэффициент полезного действия может превышать 80%. При подобном подходе используется свойство наклонённой и прижатой к гладкой поверхности пластины изменять усилие прижима при движении в одну и противоположную сторону [43]. На рисунке 3.2 изображена кинематическая схема, ИП – источник питания (переменное напряжение), ПЭ – пьезоэлемент.

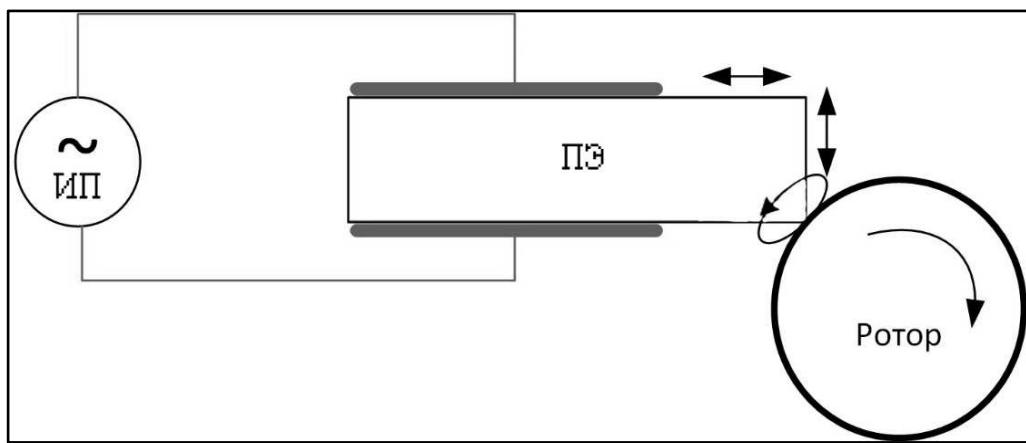


Рисунок 3.2 – Кинематическая схема классического пьезодвигателя

Предлагается взглянуть на возможности пьезоактуатора через призму обеспечения вертикальной тяги для перемещения с переменным направлением, каких-либо объектов в механике. Преобразование энергии колебаний в крутящий момент подробно описанное в [44] посредствам взаимодействия пьезокерамического биморфа и дискового колеса как показано на рисунке 3.3, предлагается использовать как подъемный механизм.

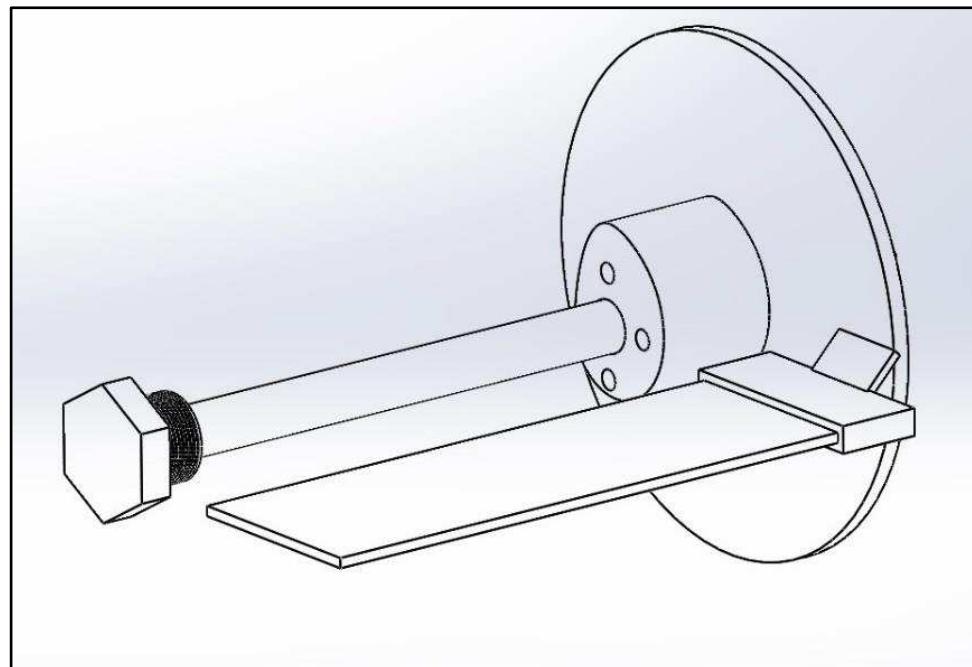


Рисунок 3.3 – Пьезокерамический биморф и дисковое колесо

В качестве поьеозэлемента в рамках решения поставленной задачи обеспечения механического привода предлагается использовать пьезокерамический биморф, основная функция которого, под воздействием переменного напряжения, выгибаться то в одну, то в другую стороны. На рисунке 3.4 проиллюстрирована кинематическая схема разработанная на основе пьезокерамического биморфа. Диапазон входного напряжения от – 80 В до +80 В, в соответствие и пропорционально номиналу поданного напряжения пьезокерамический биморф выгибается относительно зафиксированного конца. Подведение управляемого напряжения производится через пружинные контакты в области заделки или монтажными проводами путём пайки к выведенным электродам [45].

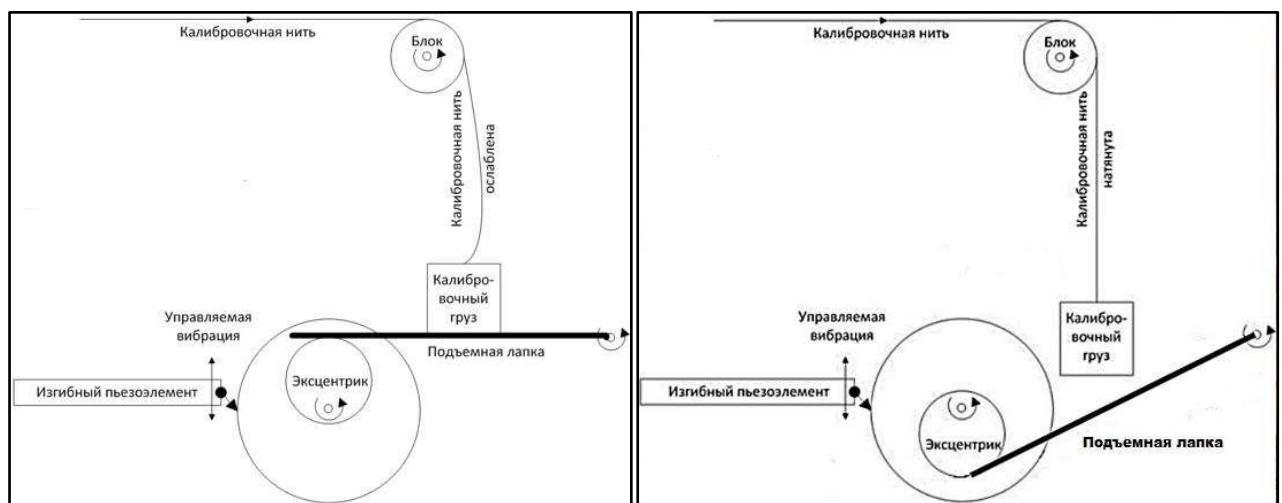


Рисунок 3.4 – Кинематическая схема модуля дистанционной калибровки в двух крайних положениях

Испытуемый двигатель устанавливается на подвижную рамку. Эта рамка передает тяговое усилие на прецизионный тензоизмерительный датчик силы. Задача калибровки – имитировать тягу двигателя с помощью точных грузов разной массы. Калибровочная нагрузка передается на рамку крепления двигателя посредством калибровочной нити. Приемлемым результатом

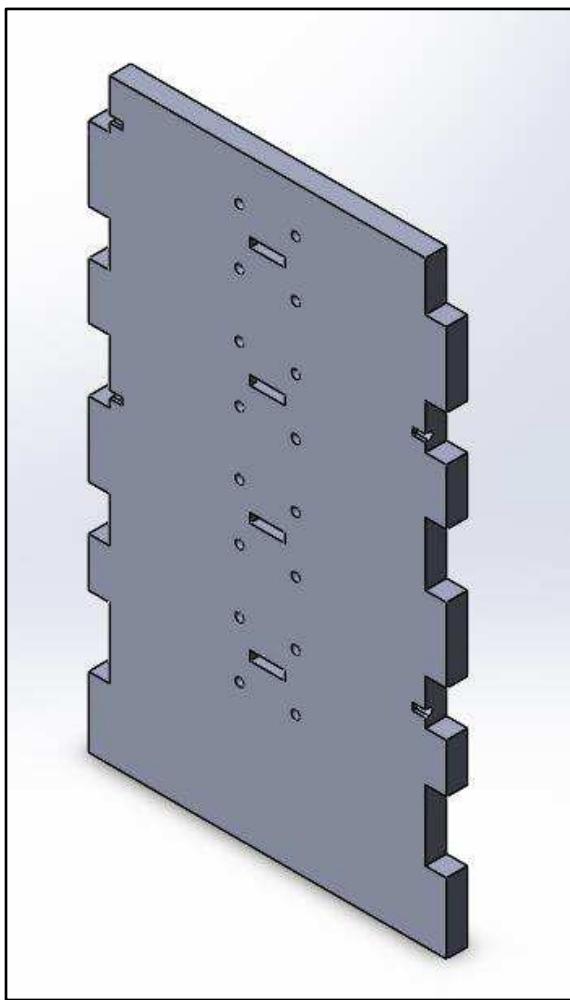
калибровки является точное соответствие показаний датчика калибровочным грузам (допустимая норма погрешности  $\pm 0,5$  гс.), подвешенным на калибровочную нить. Количество калибровочных грузов – 4 шт. Масса калибровочных грузов №1 = 1 г., №2 = 2 г., №3 = 4 г., №4 = 8 г., поэтому МДК позволяет имитировать калибровочные нагрузки 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15 гс в любой последовательности. Отклонение массы калибровочных грузов от номинальной, заявленной массы должно быть не более  $\pm 0,01$  гр.

Создания крутящего момента в условиях вакуума, предполагается с последующим его преобразованием в вертикальную тягу, имея, введу поднятие и отпускание грузов различного номинала (кинематическая схема изображена на рисунке 3.4). Работоспособность представленной схемы устройства подъемного механизма подтверждена положительными результатами проведенных экспериментов [46].

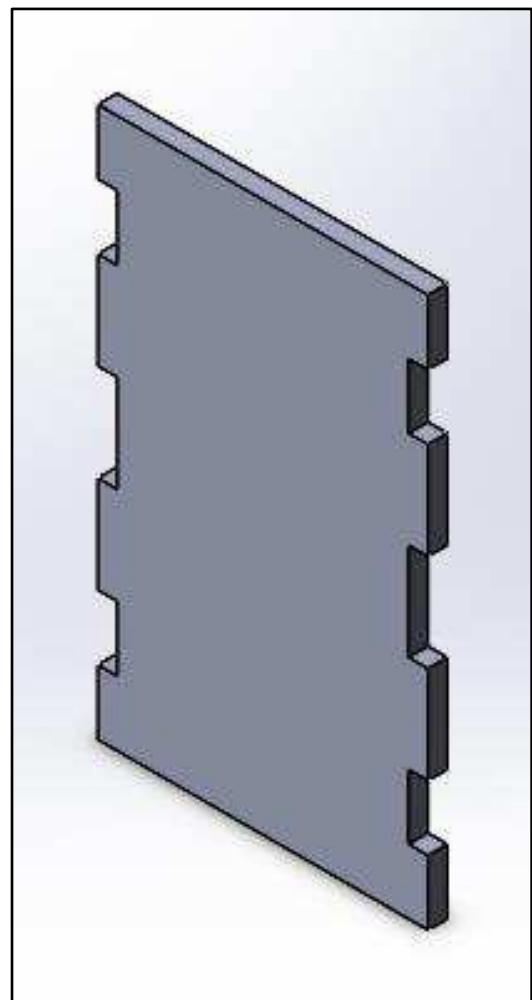
### **3.3 Проектирование элементов конструкции**

Корпус конструкции модуля дистанционной калибровки стационарных плазменных двигателей состоит из следующих составных частей:

- стенка задняя изображена на рисунке 3.5.а;
- стенка передняя изображена на рисунке 3.5.б;
- донышко изображено на рисунке 3.6.а;
- крышка изображена на рисунке 3.6.б;
- стенка левая изображена на рисунке 3.7.а;
- стенка правая изображена на рисунке 3.7.б;

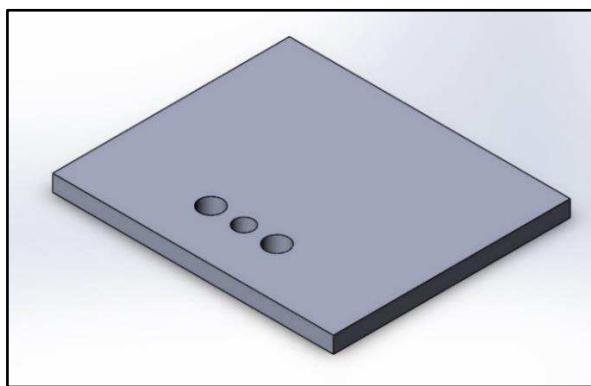


а) стенка задняя

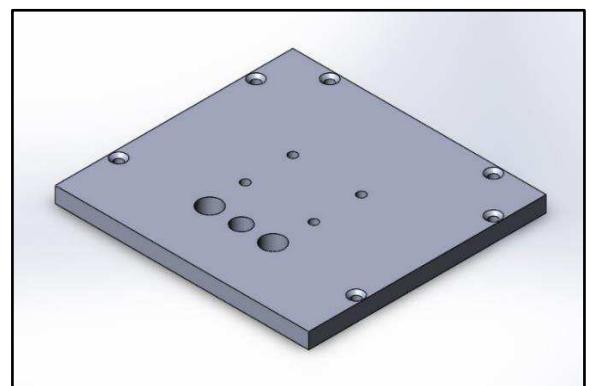


б) стенка передняя

Рисунок 3.5 – Передняя и задняя стенки модуля дистанционной калибровки

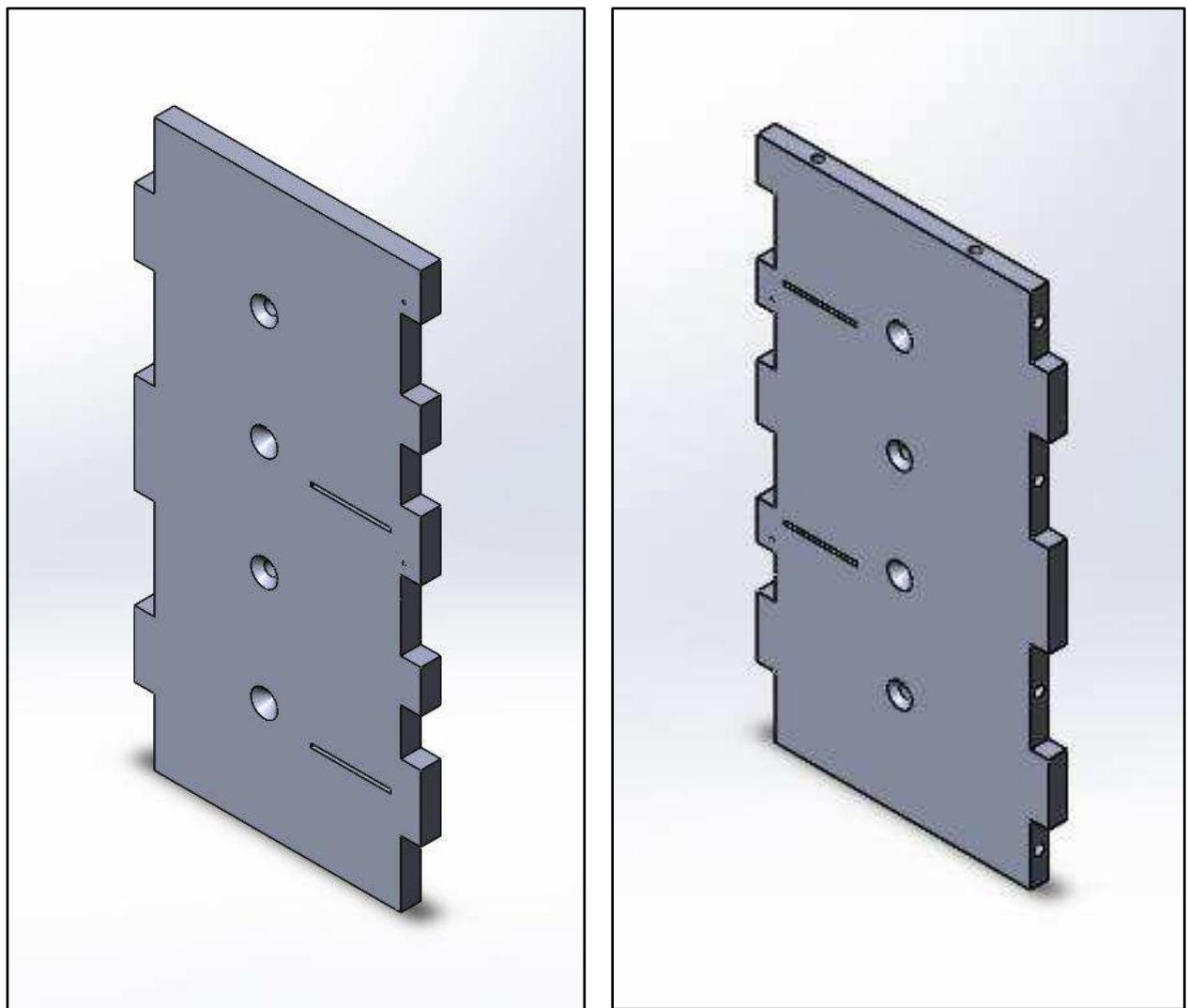


а) стенка нижняя



б) стенка верхняя

Рисунок 3.6 – Нижняя и верхняя стенка модуля дистанционной калибровки

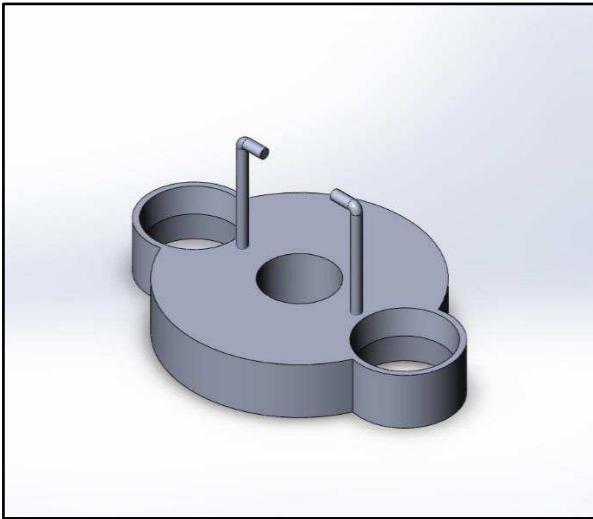


а) стенка левая

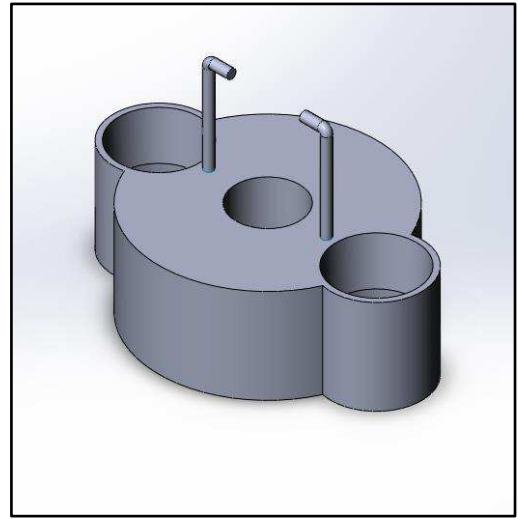
б) стенка правая

Рисунок 3.7 – Боковые стенки модуля дистанционной калибровки

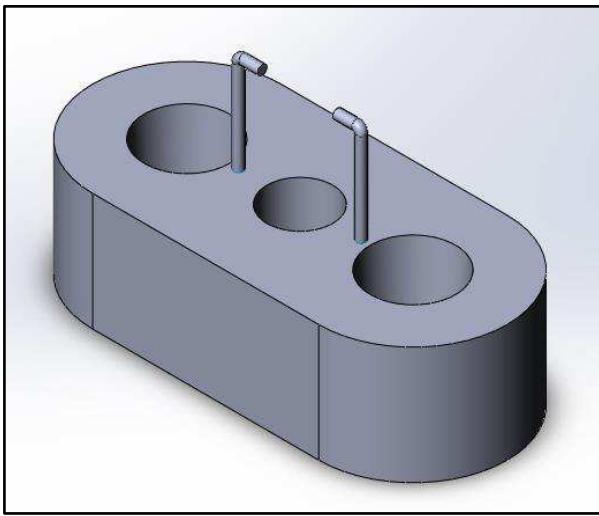
На рисунке 3.8 изображены грузики для имитации силы тяги в модуле дистанционной калибровки стационарных плазменных двигателей. Номинал грузов 1, 2, 4, 8 гр. Грузики оснащены зацепными «усиками» для поднятия и опускания их по штоку.



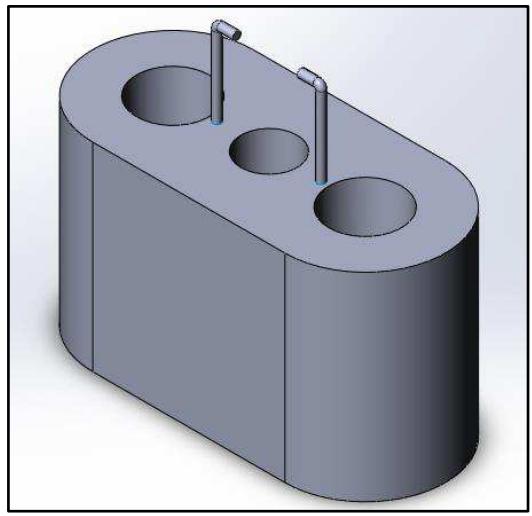
а) грузик 1 грамм



б) грузик 2 грамма



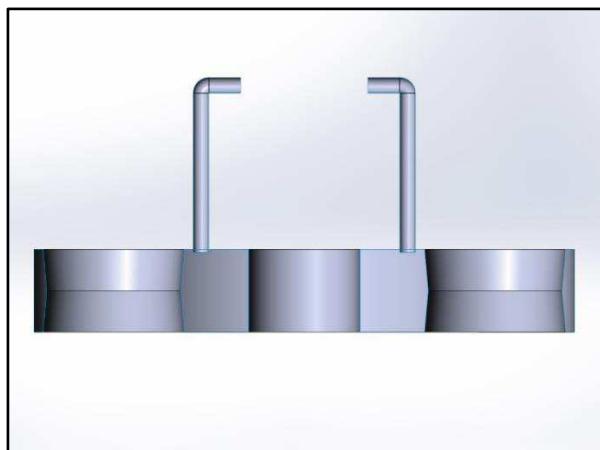
в) грузик 4 грамма



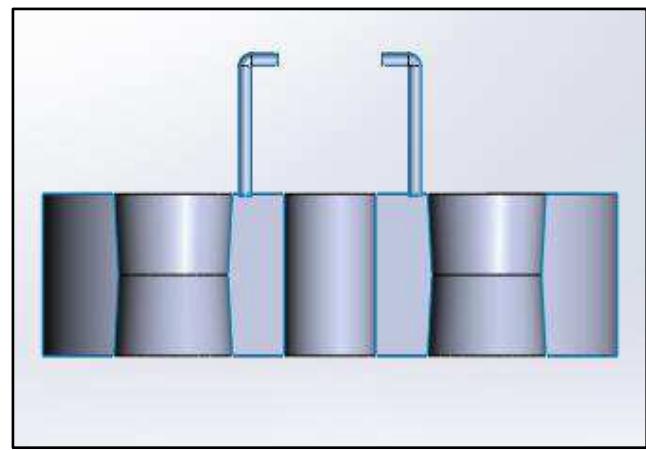
г) грузик 8 грамм

Рисунок 3.8 – Калибровочные грузики модуля дистанционной калибровки

Центральный шток, на который прикладывается нагрузка опущенных грузиков, как будет показано дальше располагается по центру всех четырех грузиков, два боковых штока предназначены для обеспечения направления хода движения грузиков и выступают в качестве направляющих. Как показано на рисунке 3.9 боковые отверстия грузиков выполнены с двух сторон под конус по принципу песочных часов, для минимизации площади соприкосновения грузиков и направляющих штоков.



а) грузика 1 грамм



б) грузика 2 грамма

Рисунок 3.9 – Вертикальные разрезы грузиков модуля дистанционной калибровки

На рисунке 3.10 изображены направляющие и центральный нагрузочный штоки. Центральный нагрузочный шток оснащен четырьмя выступами на которые грузики находясь в нижнем состоянии осуществляют давление согласно своему номиналу.

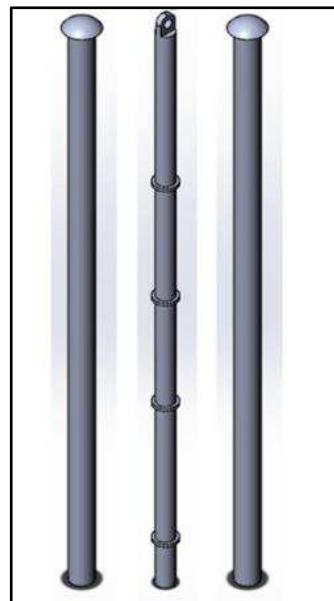
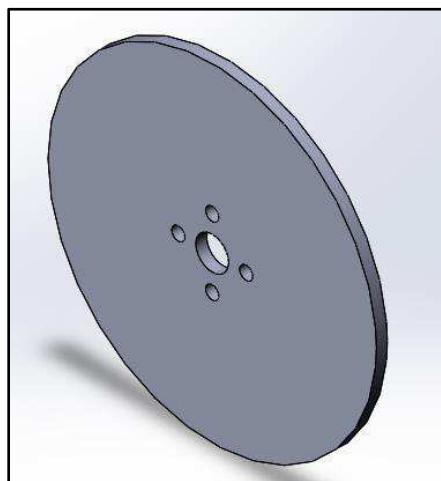


Рисунок 3.10 – Центральный и направляющие штоки

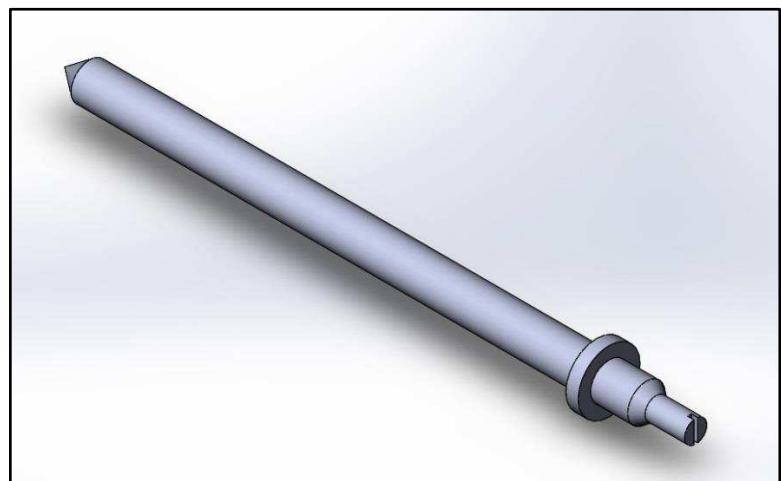
В данном случае подобный принцип позволяет нагружать на центральный шток нагрузку в диапазоне от 1 до 15 гс, с шагом 1 гс, так и оставлять центральный шток без нагрузки.

В данной работе не освещен вопрос выбора материалов, из которых изготавливаются элементы конструкции, в частности вертикальные стержни, которые должны иметь минимальное поверхностное трение с, движущимися по ним, грузам. Так же материалы должны удовлетворять требованиям эксплуатации в термовакуумных условиях при крайних температурах, особенно важным является параметр газации материала в условиях вакуума.

Следующая группа элементов конструкции модуля дистанционной калибровки стационарных плазменных двигателей обеспечивает преобразование вращательное движение дискового колеса в вертикальное движение подъемной лапки. На рисунках 3.11.а, 3.11.б изображены дисковое колесо и ось вращения подъемного механизма.



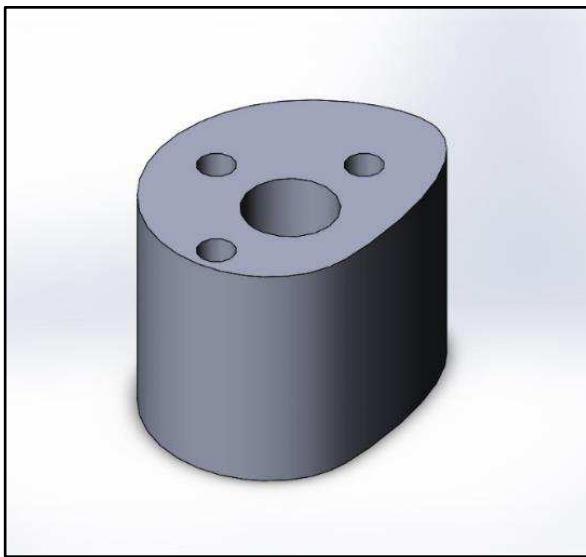
а) дисковое колесо



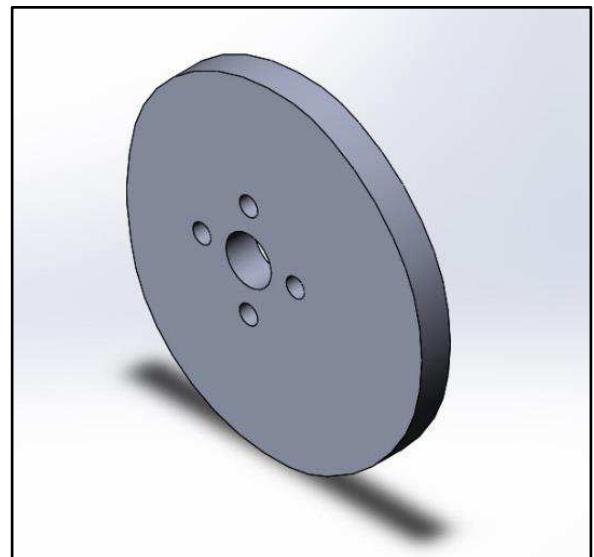
б) ось

Рисунок 3.11 – Элементы подъемного узла модуля дистанционной калибровки

На рисунке 3.12 проиллюстрированы еще два элемента конструкции, входящие в группу элементов, обеспечивающих преобразование вращательное движение дискового колеса в вертикальное движение подъемной лапки.



а) эксцентрик изменения положения лапки  
подъема грузиков



б) эксцентрик изменения лапки-индикатора  
положения грузика

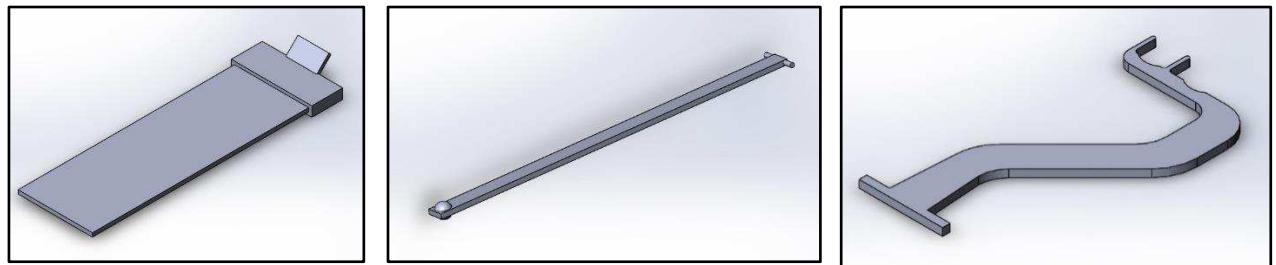
Рисунок 3.12 – Кулачковые элементы модуля дистанционной калибровки

Конструкция актуатора была частично доработана, конец пьезокерамического биморфа который монтировался в боковые стенки по консольному принципу остался без изменения, а свободный конец, совершающий угловые перемещения был оснащен зацепным язычком для вращения дискового колеса. Внешний вид доработанного пьезокерамического биморфа проиллюстрирован на рисунке 3.13.а, зацепной «язычок» выполнен таким образом, чтобы придавать дисковому колесу одностороннее вращение.

Лапка-индикатор груза, изображенная на рисунке 3.13.б в верхнем положении замыкает сигнальную цепь и тем самым оператор, проводящий процедуру калибровки, видит, какие грузы точно не воздействуют на калибровочную нить. Контактные лапки на шарнирном принципе заделываются между задней и боковыми стенками, а ответные части контактов находятся на внутренней стороне передней стенки.

Представленная на рисунке 3.13.в лапка подъема грузиков имеет изогнутый вид, с одной стороны она закреплена посредством шарнирной вставки

в заднюю стенку корпуса модуля дистанционной калибровки, с другого конца подъемная лапка оснащена двумя зацепами для непосредственного вертикального перемещения грузиков. Изгиб лапки подъема грузиков предназначен для взаимодействия с кулачковым приводом дискового колеса.



а) пьезокерамический  
биморф с зацепным  
«язычком»

б) лапка-индикатор  
положения грузика

в) лапка подъема грузиков

Рисунок 3.13 – Элементы модуля дистанционной калибровки

Вся нагрузка, поданная на шток посредством отпускания грузиков на выступы центрального штока, должна по техническому заданию передаваться на рамку универсального посадочного модуля огневых приемочных испытаний. Для передачи усилия создаваемого грузиками на штоке, на крышке модуля дистанционной калибровки предусмотрен, изображенный на рисунке 3.14, блок для нити, соединяющей шток и камку УПМ, таким образом, чтобы шток находился на нити в подвешенном состоянии.

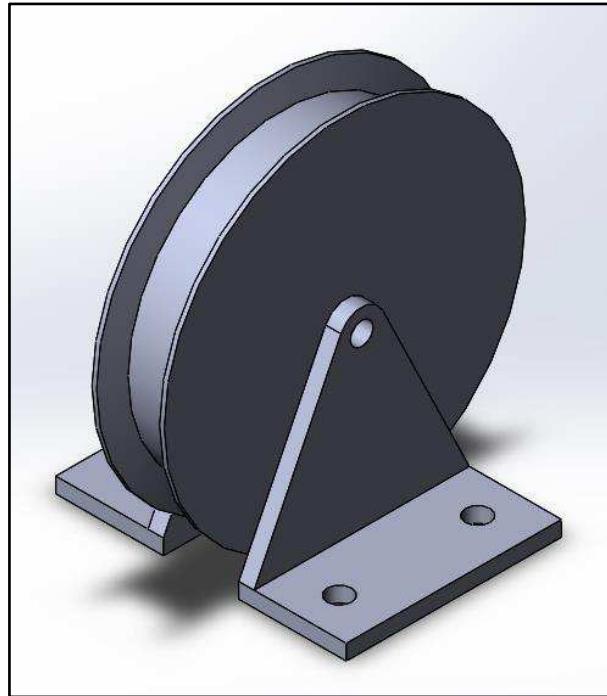


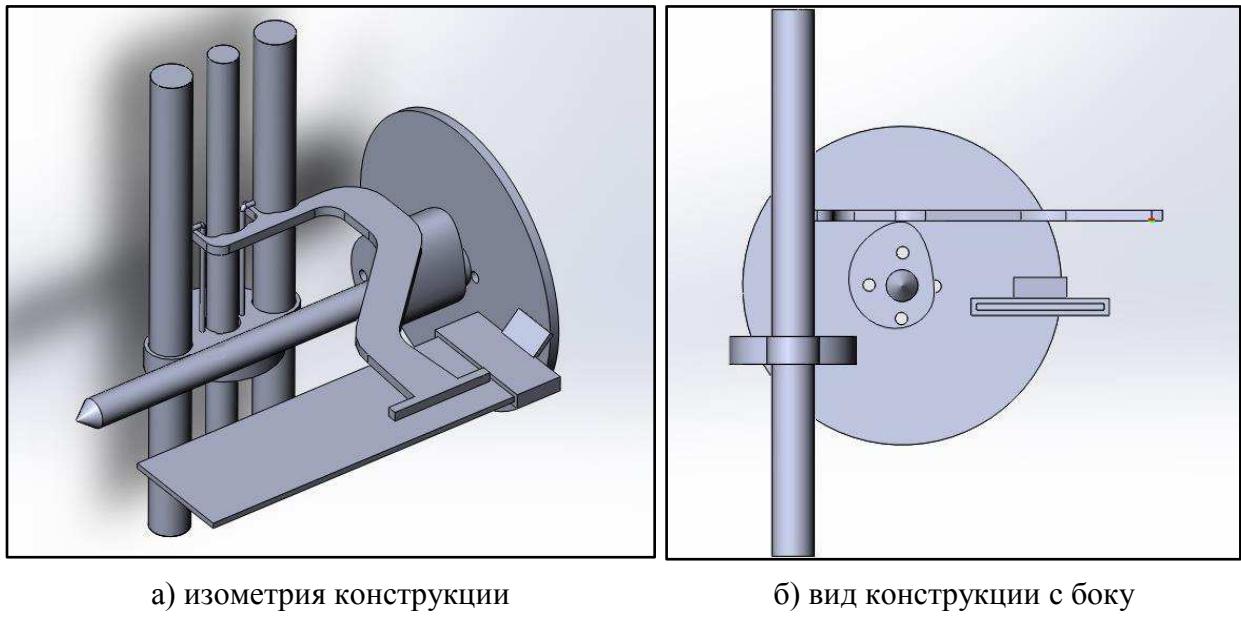
Рисунок 3.14 – Блок для передачи усилия на УПМ

В данном параграфе изложены и представлены графически основные элементы и составные части конструкции модуля дистанционной калибровки стационарных плазменных двигателей, для автоматизированного рабочего мата огневых приемочных испытаний.

### **3.4 Создание сборки конструкции пьезоактуатора**

На основе предложенного кинематического взаимодействия, ведущего и ведомого звеньев в виде пьезокерамического биморфа и дискового колеса, была разработана модель, посредством которой, осуществляется преобразование колебательных движений биморфа в плавное поднятие и опускание необходимого груза. В основу модели лежит принцип, согласно которому все точки пьезоэлемента, входящие в контакт с ротором, должны двигаться по траектории описывающей эллипс, момент вращения ведомого звена образуется за счет трения между пьезоактуатором и ротором двигателя [47,48].

Данный принцип представляет реверсивного пьезоэлектродвигателя с активным ротором и статором в осцилляторе, которого, возбуждаются колебания изгиба [47]. Принципиальная конструкция основного из узлов модуля МДК и взаимное расположение элементов, входящих в состав данного узла, приведено на рисунке 3.15.



а) изометрия конструкции

б) вид конструкции с боку

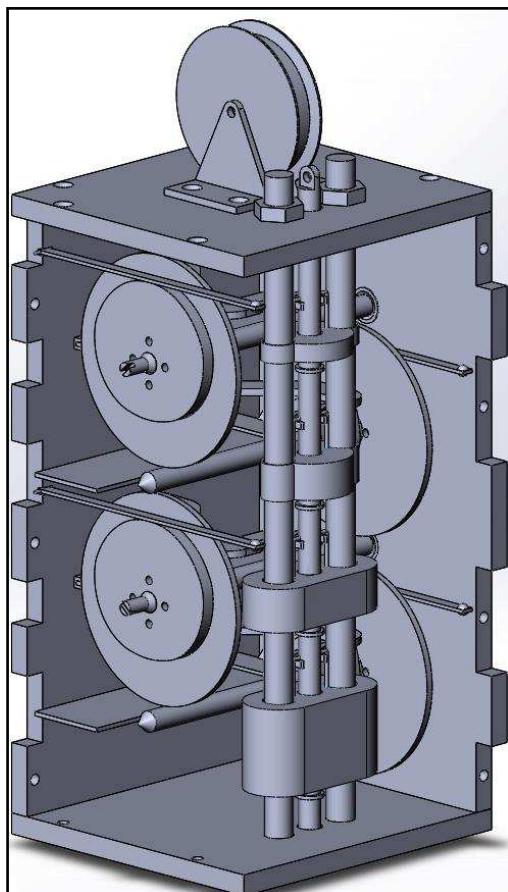
Рисунок 3.15 – Взаимное расположение элементов конструкции преобразователя

В разработанной конструкции ось, на которой закреплено дисковое колесо, оснащена кулачковой втулкой, полный цикл оборота которой, позволяет привести подъемную лапку в оба крайних положения [49]. Подъемная лапка, в представленной конфигурации, выполняет колебательные движения практически схожие с движениями пьезоэлемента, однако в этом случае амплитуда и усилия движения подъемной лапки регулируемые, также имеется относительная свобода в плане выбора длины рычага.

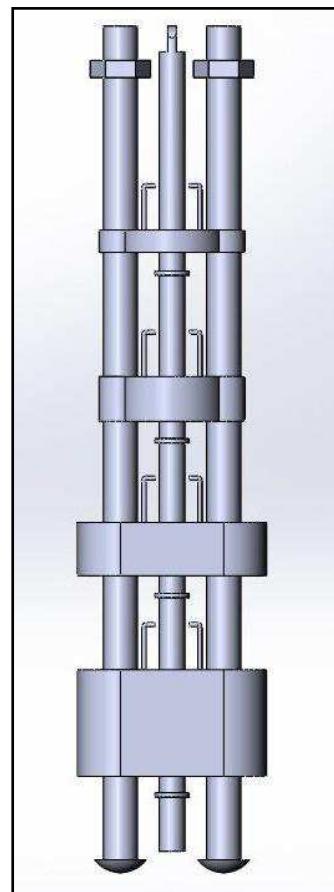
Важным условием конструкции МДК является плавное и вертикально направленное воздействие груза на калибровочную нить. С этой целью конструкция оснащена вертикальным штоком, по которому перемещаются

грузы. Шток представляет собой три параллельных стержня расположенных в ряд, средний стержень имеет меньший, относительно крайних, диаметр и снабжен четырьмя площадками, на которые отпускаются калибровочные грузы. В качестве направляющих, по которым поднимаются и отпускаются грузы, выступают крайние стержни штока, изображенные на рисунке 3.16.б.

В состав общей компоновке МДК входит 4 преобразователя усилия, заключенных в единый корпус как показано на рисунке 3.16.а, которые поднимают грузы 1, 2, 4, 8 грамм представленные на рисунке 3.16.б. Возможность программным путем управлять напряжением биморфов, обеспечивает режим автоматической, удаленной калибровки, когда приведением в нижнее положение одной или нескольких подъемных лапок, можно комбинировать варианты нагрузки на калибровочную нить.



а) изометрия конструкции МДК



б) шток с грузами

Рисунок 3.16 – Внешний вид конструкции МДК

В верхней части конструкции, изображенной на рисунке 3.16.а присутствует блок для натяжения калибровочной нити, соединяющей шток МДК и монтажную рамку двигателя. В связи с ограничениями массогабаритных показателей, разрабатываемых узлов и механизмов – конструкция получилась весьма компактная, габаритные показатели конечного модуля, можно представить относительно пьезокерамического биморфа, длина которого составляет 40 мм.

МДК в рабочем режиме, представляет собой полностью закрытую конструкцию, и не представляется возможным визуально оценить актуальное положение подъемных лапок. В этой связи необходимо решить вопрос идентификации положения той или иной подъемной лапки и соответственно груза. В рамках решения этой части вопроса, предусмотрено еще одно дисковое колесо кулачкового типа. Оно располагается вместе с дисковым колесом (ведомой частью преобразователя) на оси преобразователя, со стороны противоположной стороне взаимодействия колеса с биморфом как проиллюстрировано рисунке 3.17.

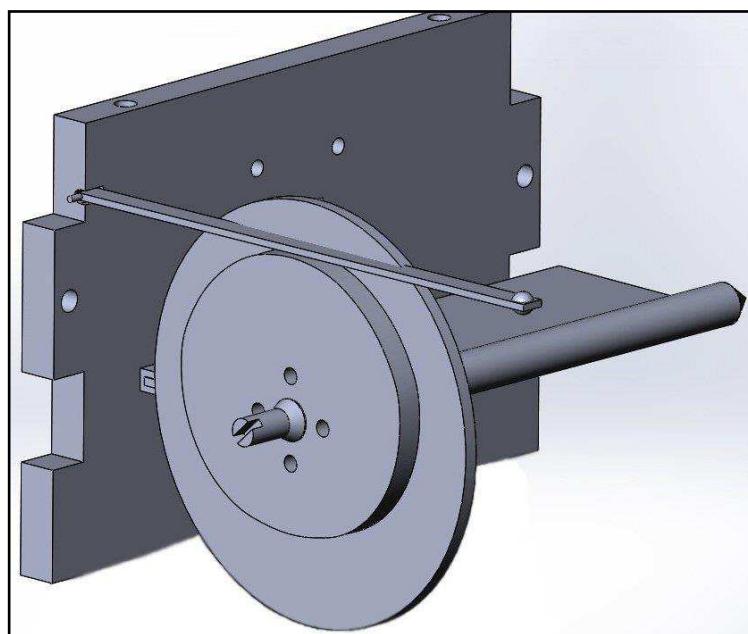


Рисунок 3.17 – Узел индикации положения грузиков

Дополнительное колесо кулачкового типа, поднимает лапку-индикатор грузиков, которая в верхнем положении замыкает сигнальную цепь и тем самым оператор, проводящий процедуру калибровки, видит, какие грузы точно не воздействуют на калибровочную нить. Лапки-индикаторы грузиков на шарнирном принципе заделываются между задней и боковыми стенками, а ответные части контактов находятся на внутренней стороне передней стенки.

Разработанная модель отвечает условиям предъявляемым техническим заданием для модуля дистанционной калибровке. Основным требованием к устройствам, реализуемых в космической отрасли и функционирующих в условиях вакуума, является минимизация массогабаритных показателей и компактность.

Возможность комбинировать нагрузку на калибровочную нить обеспечивается частичным или полным задействованием преобразователей усилия, подъемные лапки которых взаимодействуют с грузами номиналов: 1, 2, 4 и 8 гр. Широкий диапазон входного напряжения питания пьезокерамических биморфов, позволяет регулировать амплитуду колебания, что в свою очередь обеспечивает плавное поднятие и опускание грузов. В конструкции предусмотрены направляющие стержни для рабочего хода грузов для вертикально направленного воздействия грузов на калибровочную нить.

Разработанный МДК позволяет удаленно поводить пошаговую калибровку и сверять показания датчика на рамке подвеса двигателя с номиналом грузов, действующих на калибровочную нить. Оператор, проводящий процедуру калибровки, постоянно имеет актуальную информацию о состоянии всех четырех грузов за счет наличия индикаторной лапки, замыкающей контакт в момент, когда груз находится в верхнем положении.

### **3.5 Выводы по главе 3**

В третьей главе диссертационного исследования представлены этапы разработки конструкторской документации, определена последовательность и содержание этапов разработки и производства на основании технического задания.

Описано средство моделирования и разработки модуля дистанционной калибровки в качестве средства автоматизированного проектирования использовался пакет прикладных программ SolidWork. Приведены основные структурные элементы их обозначения на панели инструментов SolidWorks (таблица 4) используемые для создания непосредственно самой модели модуля дистанционной калибровки стационарных плазменных двигателей космических аппаратов.

Проиллюстрирована кинематическая схема модуля дистанционной калибровки стационарных плазменных двигателей в двух крайних положениях. Подробно изложены в графическом представление спроектированные элементы и составные части конструкции модуля дистанционной калибровки стационарных плазменных двигателей.

На основе предложенного кинематического взаимодействия, ведущего и ведомого звеньев в виде пьезокерамического биморфа и дискового колеса, была разработана модель, посредством которой, осуществляется преобразование колебательных движений биморфа в плавное поднятие и опускание необходимого груза.

Таким образом разработанная модель отвечает условиям предъявляемым техническим заданием для модуля дистанционной калибровке. Основным требованием к устройствам, реализуемых в космической отрасли и функционирующих в условиях вакуума, является минимизация массогабаритных показателей и компактность. Габариты спроектированного модуля:

- высота: 115 мм,

- ширина: 48 мм,

- глубина: 48 мм.

Возможность комбинировать нагрузку на калибровочную нить обеспечивается частичным или полным задействованием преобразователей усилия, подъемные лапки которых взаимодействуют с грузами номиналов: 1, 2, 4 и 8 гр. Широкий диапазон входного напряжения питания пьезокерамических биморфов, позволяет регулировать амплитуду колебания, что в свою очередь обеспечивает плавное поднятие и опускание грузов. В конструкции предусмотрены направляющие стержни для рабочего хода грузов для вертикально направленного воздействия грузов на калибровочную нить.

Разработанный МДК позволяет удаленно поводить пошаговую калибровку и сверять показания датчика на рамке подвеса двигателя с номиналом грузов, действующих на калибровочную нить. Оператор, проводящий процедуру калибровки, постоянно имеет актуальную информацию о состоянии всех четырех грузов за счет наличия индикаторной лапки, замыкающей контакт в момент, когда груз находится в верхнем положении.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Результатом данной диссертационной работы стала разработанная конструкция модуля дистанционной калибровки стационарных плазменных двигателей для автоматизированного рабочего места огневых приемочных испытаний.

В ходе работы были решены следующие задачи:

- 1) Исследована предметная область и осуществлен анализ существующих методов и средств калибровки стационарных плазменных двигателей системы коррекции космического аппарата;
- 2) Разработан кинематический принцип функционирования модуля дистанционной калибровки стационарных плазменных двигателей системы коррекции космического аппарата;
- 3) Осуществлено проектирование составных частей и элементов, и создание сборки модели конструкции МДК с САПР 3D-моделирования. Это предоставляет возможность применения как отдельных составных узлов, так и полностью разработанной модели на этапе проектирования автоматизированного рабочего места огневых приемочных испытаний.

Научная новизна: предложена модель конструкции МДК стационарных плазменных двигателей системы коррекции космических аппаратов.

Практическая значимость: предложенная конструкция может применяться на предприятии Акционерное общество «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева для проведения огневых приемочных испытаний стационарных плазменных двигателей коррекции космических аппаратов, с целью корректного учета тяги плазменных двигателей. По результатам диссертационного исследования было опубликовано четыре научные статьи.

## СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

ДУ	—	двигательная установка;
ЕСКД	—	единая система конструкторской документации;
ГСО	—	геостационарная орбита;
КА	—	космический аппарат;
МДК	—	модуль дистанционной калибровки;
ПУ	—	преобразователь усилия;
РБ	—	разгонный блок;
РКТ	—	ракетно-космическая техника;
РН	—	ракета-носитель;
РПК	—	ракетно-промышленный комплекс;
САПР	—	система автоматизированного проектирования;
САС	—	система аварийного спасения;
СК	—	система коррекции;
СОС	—	система ориентации и стабилизации;
СПД	—	стационарный плазменный двигатель;
СС	—	система связи;
СТР	—	система терморегулирования;
СУ	—	система управления;
ТЗ	—	техническое задание;
ТИУ	—	тягоизмерительное устройство;
УПМ	—	унифицированный посадочный модуль;
ЭРДУ	—	электрореактивные двигательные установки.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1) Гулиа, Н. В. Детали машин : науч. изд. / Н. В. Гулиа, В. Г. Клоков, С. А. Юрков – Москва : Издательский центр «Академия», 2004. – 416 с.
- 2) Ченцова, М. А. Космическая промышленность РФ : тенденции, перспективы, новые риски / М. А. Ченцова. Новости космонавтики. – Королев : 2011. – №1. – 336 с.
- 3) Бендиков, М. А. Узловые проблемы развития высокотехнологичного сектора российской экономики (на примере космической деятельности) учебное пособие / М. А. Бендиков, И. Э. Фролов. – Менеджмент в России и за рубежом : 2003. – №6. – 7 с.
- 4) Гущин, В. Н. Системы ориентации и стабилизации : учебник для вузов / В. Н. Гущин. – Москва : Основы устройства космических аппаратов : Машиностроение, 2003. – 272 с. – С. 241 – 257.
- 5) Гущин, В. Н. Системы ориентации и стабилизации : учебник для вузов / В. Н. Гущин. – Москва : Основы устройства космических аппаратов : Машиностроение, 2003. – 272 с. – С. 197–216.
- 6) Гущин, В. Н. Системы ориентации и стабилизации : учебник для вузов / В. Н. Гущин. – Москва : Основы устройства космических аппаратов : Машиностроение, 2003. – 272 с. – С. 217–241.
- 7) Чеботарев, В. Е. Основы проектирования космических аппаратов информационного обеспечения: учеб. пособие для вузов / В. Е. Чеботарев, В. Е. Косенко; Сибирский гос. аэрокосмический университет им. М. Ф. Решетнева. – Красноярск : Сибирский гос. аэрокосмический университет, 2011. – 486 с.
- 8) Макаров, М. И. Наземные комплексы управления космическими аппаратами / М. И. Макаров, А. А. Медведев // Наука и технологии в промышленности. – 2012. – № 1. – С. 81 – 89.
- 9) Малоземов, В. В. Системы жизнеобеспечения экипажей летательных аппаратов / В. В. Малоземов, В. Ф. Рожнов, В. Н. Правецкий. – Москва : «Машиностроение», 1986. – 583 с.

- 10) Ширнин, А. П. Анализ перспективных конструкций двигательных установок космических аппаратов / А. П. Ширнин, А. М. Лукишин // Решетневские чтения: материалы XIX Международной научной конференции Красноярск, Ч. 1. 2015. С. 117 – 118.
- 11) Прохоров, А. М. Большая советская энциклопедия: в 30 т. / Гл. ред. А. М. Прохоров, – 3-е изд. – Москва: Советская энциклопедия, 1969 – 1978.
- 12) Голубев, Ю. Ф. Основы теоретической механики / Ю. Ф. Голубев, 2-е изд. – Москва: Издательство Московского университета, 2000. – 719 с.
- 13) Назаров, А. Е. Использование комбинированного метода расчета программы коррекции приведения геостационарного КА для минимизации Эксцентриситета орбиты / А. Е. Назаров. Вестник ФГУП НПО им. С.А. Лавочкина №2. 2009. – С. 23 – 33.
- 14) Ходненко, В. П. Выбор проектных параметров системы коррекции орбиты космического аппарата дистанционного зондирования земли / В. П. Ходненко, А. В. Хромов. Вопросы электромеханики Т. 121. 2011. – С. 15-22.
- 15) Дмитриевский, А. А. Внешняя баллистика / А. А. Дмитриевский, Л. Н. Лысенко, 4-е изд., переработанное и дополненное – Москва: Машиностроение, 2005. – 608 с.
- 16) Левантовский, В. И. Механика космического полета в элементарном изложении : 3-е изд., дополненное и переработанное / В. И. Левантовский, – Москва: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1980. – 512 с.
- 17) Ходненко, В. П. Электрореактивные двигательные установки в системах управления космических аппаратов дистанционного зондирования земли / В. П. Ходненко. Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. Т. 102. 2005. – С. 135 – 142.
- 18) Синицкий, Д. Е. Динамический стенд для исследования характеристик и режимов работы двигателя-маховика системы ориентации и стабилизации КА / Д. Е. Синицкий, А. В. Мурыгин, Вестник СибГАУ. № 1(47). 2013. – С. 82 – 86.

- 19) Чуэйри, Э. Новый рассвет электрических ракет / «В мире науки» № 5. 2009. – С. 34 – 42.
- 20) Горшков, О. А. Холловские и ионные плазменные двигатели для космических аппаратов / О. А. Горшков, Москва : Машиностроение, 2008. – 280 с.
- 21) Михайлов, М. В. Устройство запуска и электропитания стационарного плазменного двигателя: диссертация. ... канд. техн. наук: 05.09.12 Томск, 2006. – 172 с.
- 22) Федеральное государственное унитарное предприятие опытно конструкторское бюро «Факел», «О нас» [Электронный ресурс] : <http://www.fakel-russia.com> (дата обращения: 20.10.2015).
- 23) Яковлев, Е.А. Испытания космических электроракетных двигательных установок: [Учебник для авиац. спец. вузов] / Е. А. Яковлев Москва: Машиностроение 1981. – 207 с.
- 24) Углев, В. А. Имитационное моделирование: учеб. пособие / В. А. Углев, В. А. Устинов; Сибирский федеральный ун-т, ХТИ – филиал СФУ. – Абакан: РИО ХТИ – филиала СФУ, 2011. – 117 с.
- 25) АО «Научно исследовательский институт «Элпа»: [Электронный ресурс]. Зеленоград, 2003-2017. URL: <http://www.elpapiezo.ru/> (Дата обращения: 12.05.2017).
- 26) ООО «Евротек Дженирал»: [Электронный ресурс]. Москва, 2003-2017. URL: <http://www.eurotek-general.ru/> (Дата обращения: 12.05.2017).
- 27) ООО «Промышленная метрология» [Электронный ресурс]. Санкт-Петербург, 2008-2017. URL: <http://metrology-spb.ru> (Дата обращения: 12.05.2017).
- 28) ОАО «Научно-исследовательский институт физических измерений» [Электронный ресурс]. Пенза, 2010-2017. URL: <http://old.niifi.ru/> (Дата обращения: 12.05.2017).
- 29) ОАО «Витебский завод радиодеталей «Монолит» [Электронный ресурс]. Витебск, 2010-2017. URL: <http://monolit.by> (Дата обращения: 12.05.2017).

- 30) Панич, А.Е. Пьезокерамические актуаторы / Ростов-на-Дону. 2008. – 159 с.
- 31) Азин, А. В. Исследование микролинейных пьезоприводов для космических аппаратов / А. В. Азин, С. В. Пономарев, С. В. Рикконен, А. М. Храмцов // Решетневские чтения: материалы XIX Междунар. науч. конф. Красноярск, 2015. Ч. 1. С. 58 – 59.
- 32) Софонов, А. Я. Биморфные пьезоэлектрические элементы: актуаторы и датчики / А. Я. Софонов, В. Г. Никифоров, В. М. Климашин // Компоненты и технологии. Санкт-Петербург: издательство Файнстрит. 2003 №30. С. 46 – 48.
- 33) Бобцов, А. А. Исполнительные устройства и системы для микроперемещений / А. А. Бобцов, В. И. Бойков, С. В. Быстров, В. В. Григорьев. Санкт-Петербург: СПбГУ ИТМО, 2011. – 131 с.
- 34) Коржов А.В. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике: учебное пособие для самостоятельной работы студентов / А.В. Коржов. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2007. – 70 с.
- 35) Кондратьев, К. В. Эффект гистерезиса в работе пьезокерамического биморфа/ К.В. Кондратьев, В.Н. Сергеевич, В.В. Двирный // Робототехника и искусственный интеллект: Материалы VIII Международной научной конференции. – Железногорск: 2016. – С. 29 – 33.
- 36) Данцигер, А. Я. Высокоэффективные пьезокерамические материалы : Справочник. Книга / А. Я. Данцигер, О. Н. Разумовская, Л. А. Резниченко, Л. Д. Гриднев, Р. У. Девликанова, С. И. Дудкина, С. В. Гавриляченко, Н. В. Дергунова, Клевцов А.Н. Ростов-на-дону. 1994. – 30с.
- 37) Гедько, П. Ю. Конечно-элементное моделирование пьезоэлектрического актуатора микро-робота / П. Ю. Гедько, П. Л. Павлов, А. С. Семенов, А. Б. Смирнов, XL Неделя науки СПбГПУ: материалы международной научно-практическая конференция – Спб: Издательство Политехнического университета, 2011. – С. 29.

- 38) Лавриненко, В. В. Пьезоэлектрические двигатели / В. В. Лавриненко, И. А. Карташев, В. С. Вишневский. – Москва: изд. «Энергия» 1980. – 112 с.
- 39) ГОСТ 2.103 – 2013. Межгосударственный стандарт. Единая система конструкторской документации. Стадии разработки. – Москва, 2013. – 9 с.
- 40) Dassault Systèmes SOLIDWORKS Corp. [Электронный ресурс]. Waltham, Massachusetts, USA, 1993-2017. URL: <http://www.solidworks.com/> (Дата обращения: 29.05.2017).
- 41) SOLIDWORKS Web Help [Электронный ресурс]. Waltham, Massachusetts, USA, 1993-2017. URL: <http://help.solidworks.com/> (Дата обращения: 30.05.2017).
- 42) Маслов, К. Ю. 3D-моделирование в промышленной сфере // К. Ю. Маслов, М. Ю. Похорукова, Молодой ученый. – 2016. – №11.3. – С. 19 – 22.
- 43) Белов, М. П. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов / М. П. Белов, В. А. Новиков, Л. Н. Рассудов. – 3-е изд., исправлено. – Москва: Издательский центр «Академия», 2007. – 575 с.
- 44) Кондратьев, К. В. Особенности пьезодвигателей в условиях вакуума/ К. В. Кондратьев, В. Н. Сергеевич, В. В. Двирный // Решетневские чтения: материалы XIX Междунар. науч. конф. Красноярск, 2015. Ч. 1. С. 330 – 331.
- 45) Кондратьев, К. В. Использование пьезоактуаторов в основе подъемных механизмов/ К. В. Кондратьев, В. Н. Сергеевич, В. В. Двирный // Робототехника и искусственный интеллект: Материалы VII Международной научной конференции. – Железногорск: 2015. – С.25-28.
- 46) Кондратьев, К. В. Применение пьезокерамического биморфа в основе подъемного механизма/ К. В. Кондратьев, В. Н. Сергеевич, Г. В. Двирный, А. Ф. Шишкина // Теория. Практика. Инновации. 2017. №2 (14) – С. 18 – 22.
- 47) Kenji Uchino [Piezoelectric ultrasonic motors: overview] Smart Mater. Struct. 1998, p. 273–285.

- 48) Soonho Park [Single vibration mode standing wave tubular piezoelectric ultrasonic motor] Theses and dissertations. 2011, 136 p.
- 49) Иващенко, А. П. Синтез кулачкового механизма: методические указания к практическим занятиям и курсовому проекту по дисциплине «Теория механизмов и машин» / Сост. А. П. Иващенко. – Волгоград: ИУНЛ ВолгГТУ, 2012. – 31 с.

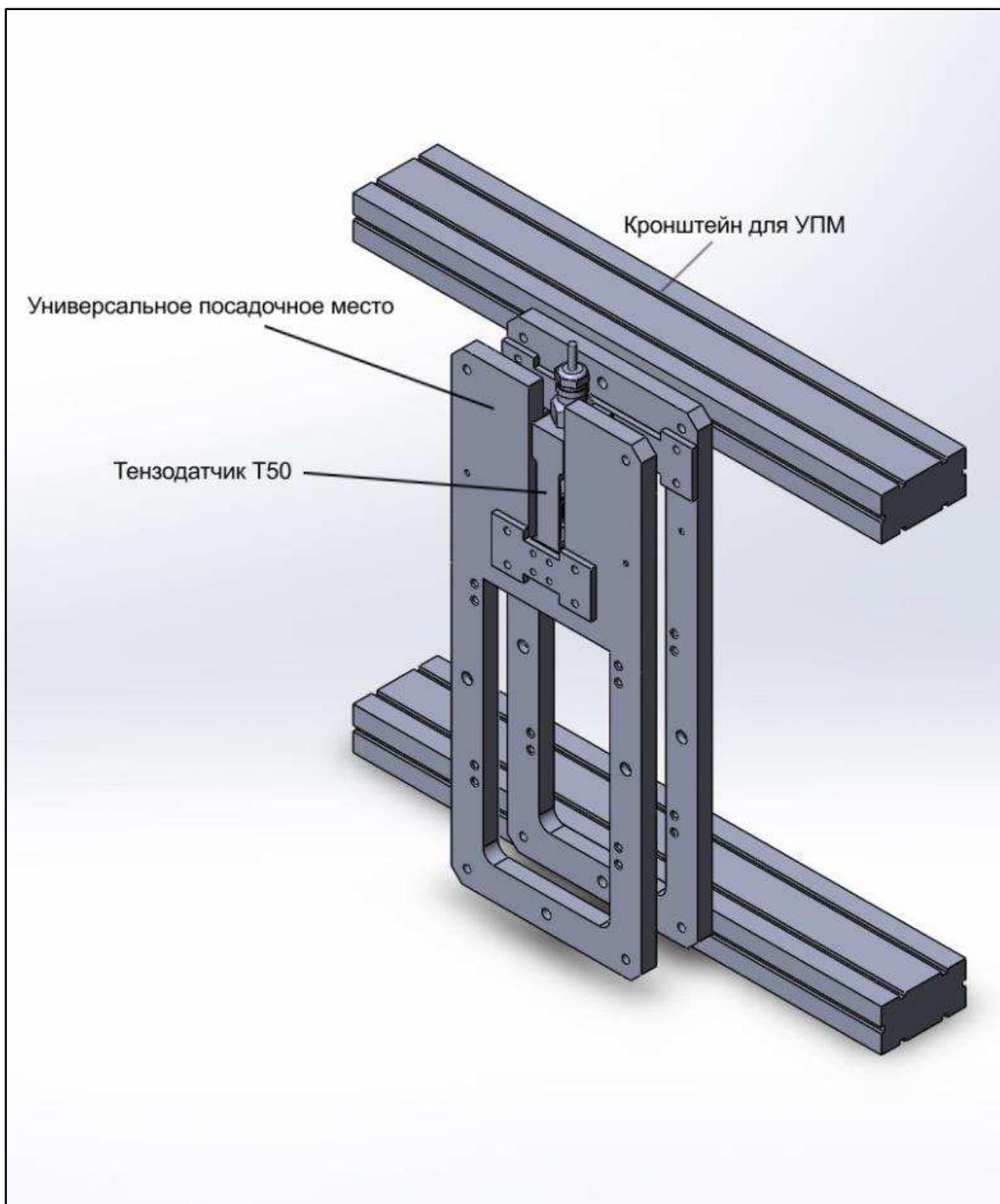
## **ПРИЛОЖЕНИЕ А**

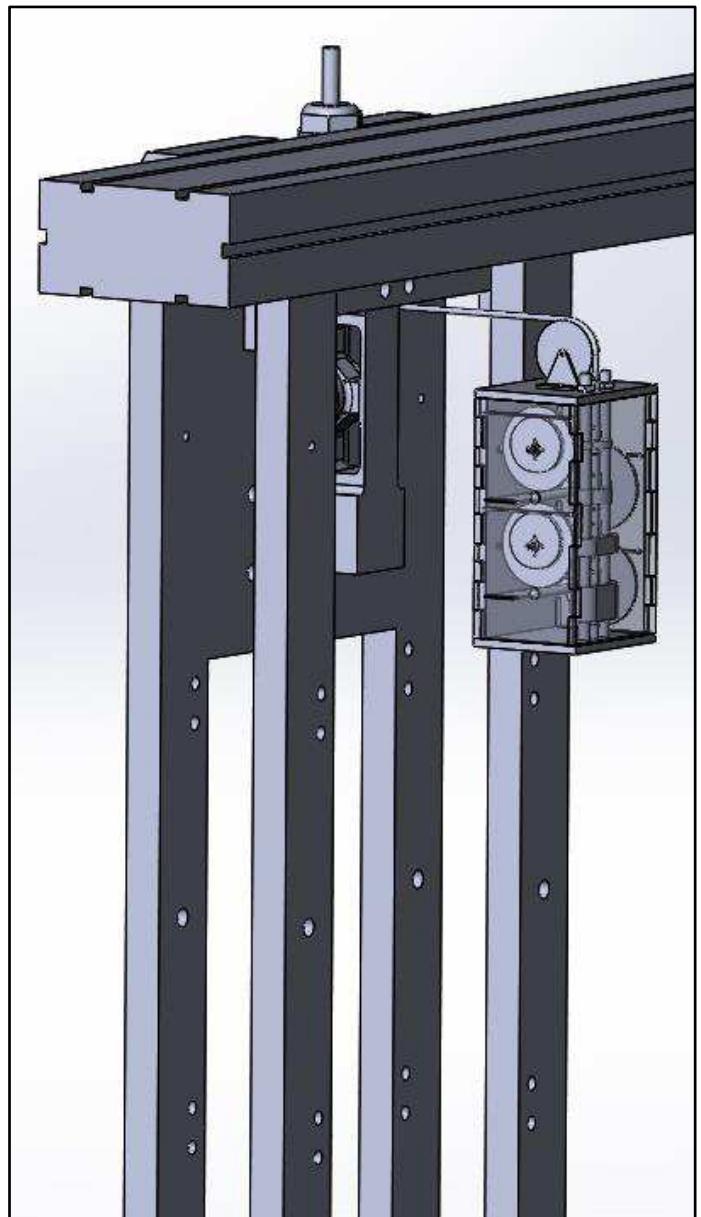
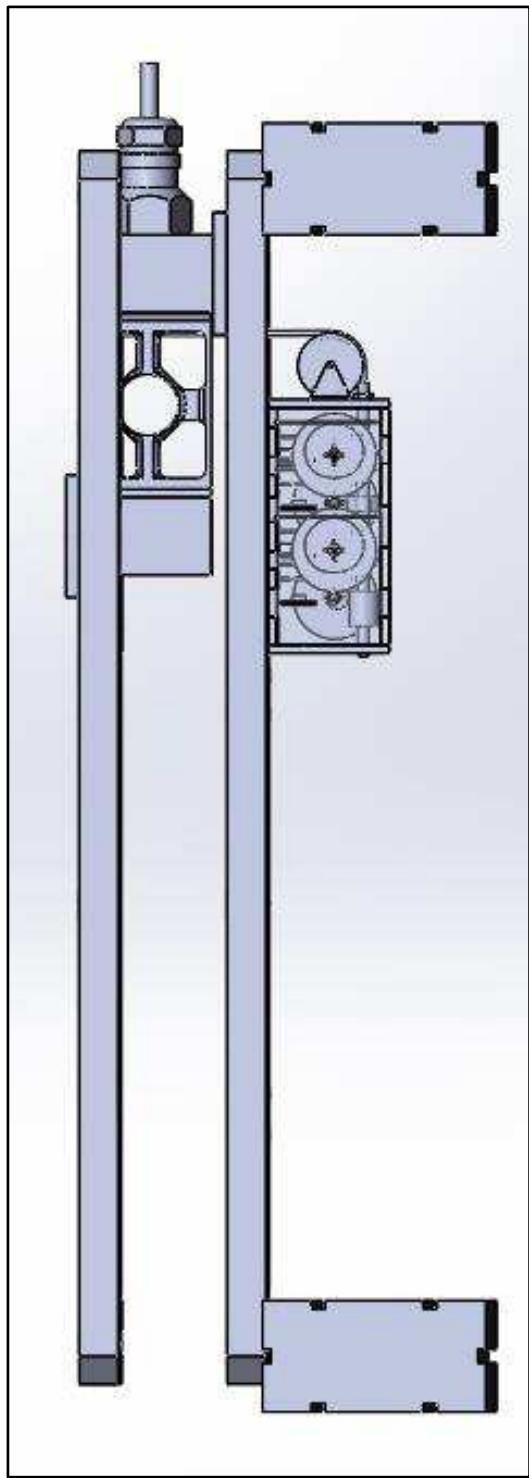
### **Публикации по теме диссертации**

- 1) Кондратьев К.В. Особенности пьезодвигателей в условиях вакуума/ К.В. Кондратьев, В.Н. Сергеевич, В.В. Двирный // Решетневские чтения: материалы XIX Международной научной конференции Красноярск, 2015 Ч. 1. С. 330–331.
- 2) Кондратьев К. В. Использование пьезоактуаторов в основе подъемных механизмов/ К.В. Кондратьев, В.Н. Сергеевич, В.В. Двирный // Робототехника и искусственный интеллект: Материалы VII Международной научной конференции. – Железногорск: 2015. – С. 25-28.
- 3) Кондратьев К.В. Эффект гистерезиса в работе пьезокерамического биморфа/ К.В. Кондратьев, В.Н. Сергеевич, В.В. Двирный // Робототехника и искусственный интеллект: Материалы VIII Международной научной конференции. – Железногорск: 2016. – С. 29-33.
- 4) Кондратьев К.В. Применение пьезокерамического биморфа в основе подъемного механизма/ К.В. Кондратьев, В.Н. Сергеевич, Г.В. Двирный, А.Ф. Шишкина // Теория. Практика. Инновации. 2017. №2 (14) – С. 18-22.

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

### Конструкция МДК





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

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

УТВЕРЖДАЮ  
Заведующий кафедрой  
Л В.Е. Косенко  
«20 06 2017г.

ЗАДАНИЕ  
НА ВЫПУСКНУЮ КВАЛИФИКАЦИОННУЮ РАБОТУ  
в форме магистерской диссертации

Студенту: Кондратьеву Кириллу Валерьевичу

Группа: МТ 15-04М

Направление (специальность): 15.04.05.02 «Технология космических аппаратов»

Тема выпускной квалификационной работы: «Разработка конструкции пьезоактуатора для калибровки плазменных двигателей космических аппаратов»

Утверждена приказом по университету от №16482/с от 30.10.2015г.

Руководитель ВКР: Двирный Валерий Васильевич д-р техн. наук, проф., профессор МБК «Прикладная физика и космические технологии».

Исходные данные для ВКР: Необходимость разработки конструкции системы калибровки для проведения огневых приемочных испытания стационарных плазменных двигателей.

Перечень рассматриваемых вопросов (разделов ВКР): исследование предметной области, разработка кинематической схемы, разработка и создание модели конструкции пьезоактуатора для калибровки тяги стационарных плазменных двигателей коррекции космических аппаратов;

Перечень графического материала с указанием основных чертежей, плакатов: 16 слайдов по презентации ВКР.

Руководитель ВКР

подпись

инициалы, фамилия

Задание принял к исполнению

подпись

инициалы, фамилия

«30» октября 2015 г.