

УДК 004

## СОЗДАНИЕ И АНАЛИЗ КОНСТРУКЦИИ МНОГОЗВЕННОГО МАНИПУЛЯТОРА МАЛОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

Уфимцев А.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Томский политехнический университет,  
Томск, Россия

**Аннотация.** В данной статье представлен процесс разработки и анализа конструкции многозвездного манипулятора, предназначенного для интеграции в малый космический аппарат (МКА). Рассмотрены этапы проектирования, включающие в себя создание 3D-модели, выбор материалов, и обоснование кинематической схемы. Особое внимание уделено проведению статического анализа методом конечных элементов (МКЭ) для оценки прочности и надежности конструкции в условиях космической среды. Представлены результаты моделирования распределения напряжений и деформаций при заданных нагрузках, а также анализ влияния различных факторов на работоспособность манипулятора.

**Ключевые слова:** Метод конечных элементов, деформации, проектирование конструкции, многозвездный манипулятор, космическая робототехника.

### Введение

Малые космические аппараты (МКА) играют все более значимую роль в современных космических исследованиях, обеспечивая экономически эффективные решения для широкого спектра задач. Однако, ограниченные размеры и масса МКА часто накладывают ограничения на их функциональные возможности, что требует разработки инновационных подходов к проектированию их компонентов. Одним из ключевых направлений развития МКА является создание роботизированных манипуляторов, способных выполнять различные операции в условиях космического пространства, такие как захват и перемещение объектов, установка оборудования, проведение экспериментов и техническое обслуживание.

В связи с этим, разработка многозвездных манипуляторов для МКА, обладающих высокой маневренностью, точностью и надежностью, является актуальной научно-технической задачей [1, 2]. Важным аспектом проектирования таких устройств является обеспечение их прочности и работоспособности в условиях экстремальных космических нагрузок, что требует проведения детального анализа напряженно-деформированного состояния. В данной статье представлен процесс создания и анализа конструкции многозвездного манипулятора для МКА, с особым акцентом на применение метода конечных элементов (МКЭ) для оценки ее прочности и надежности.

Целью данной работы является разработка и анализ конструкции многозвездного манипулятора для МКА, способного выполнять различные операции в условиях космической среды. В статье представлены этапы проектирования, моделирования и статического анализа манипулятора, а также результаты, полученные в ходе исследования. Рассмотрены основные параметры конструкции, результаты моделирования напряжений и деформаций, а также предложены направления для дальнейшей оптимизации и совершенствования разработанного устройства.

### Описание работы

В продолжение научно-исследовательской работы по разработке малого космического аппарата (МКА) формата CubeSat 3U (30 см x 10 см x 10 см) уже было составлено и спроектировано компонентное оснащение аппарата [1]. Предложено размещение роботизированной руки-манипулятора в двух оставшихся отсеках малого космического аппарата для повышения уровня его функциональных возможностей. Разрабатываемый манипулятор для соответствия формату МКА был помещен в короб размером 20 x 10 x 10 см который также служит основанием для его роботизированной руки. Материалом изготовления короба является алюминий благодаря его отличному соотношению прочности к весу, хорошей коррозионной стойкости, лёгкости обработки, термическим свойствам и другим преимуществам [2]. Эти характеристики делают алюминий экономичным, надежным и функциональным материалом для космических применений. Нижняя грань короба имеет 4 отверстия для крепления методом болтового соединения. Такой метод фиксации модели для исследования короба будет более правильный. Если мы прикрутим к чему-то заднюю грань, то она этой гранью прижимается и, если мы представим, что в дальнейшем болты ослабятся, может начаться скольжение. А основная фиксация будет производиться на болтах. В таком случае данное исследование будет более реалистичное. Спроектированная модель короба представлена на рис. 1.

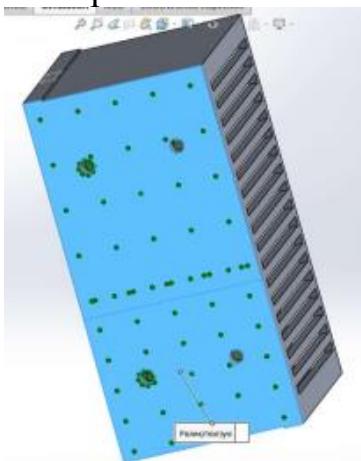


Рис. 1. – Основание роботизированной руки-манипулятора малого космического аппарата

Сама же модель спроектированного манипулятора в функционирующем виде представлена на рис. 2.

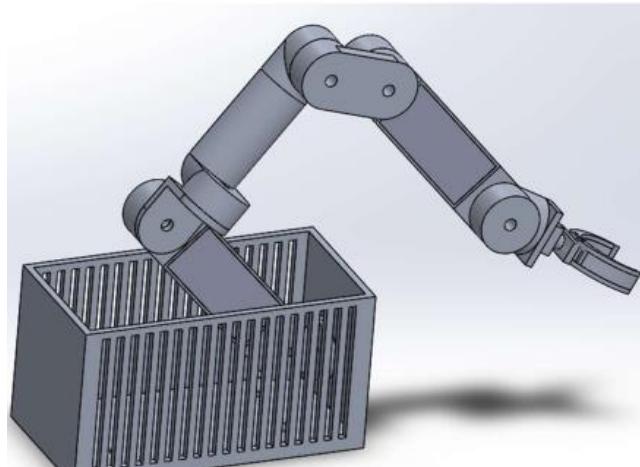


Рис. 2. – Роботизированной руки-манипулятора малого космического аппарата в разложенном виде

Представленная модель является многозвенной и содержит следующие элементы: угольное крепление, муфта, плечо, схват, сервопривод, редуктор, микроконтроллер, драйвер двигателя, источник питания [3]. Крепежные элементы в виде болтов, винтов, штифтов и других. Угольник представляет собой начальный элемент, который служит для крепления манипулятора к корпусу МКА, обеспечивает надежную фиксацию манипулятора. Муфта обеспечивает механическое соединение, передачу вращательного момента, а также служит платформой для установки сервопривода. Плечо является основным несущим элементом, определяет своей конструкцией досягаемость и рабочую зону манипулятора. Схват – это захватный элемент, позволяющий манипулировать объектами. Сервопривод предназначен для приведения в движение звеньев манипулятора. Редуктор увеличивает эффективность сервопривода, повышая значение крутящего момента передаваемого от сервопривода [4].

Следующим шагом необходимо провести имитацию нагрузки на спроектированную конструкцию стрелы манипулятора как представлено на рис. 3.

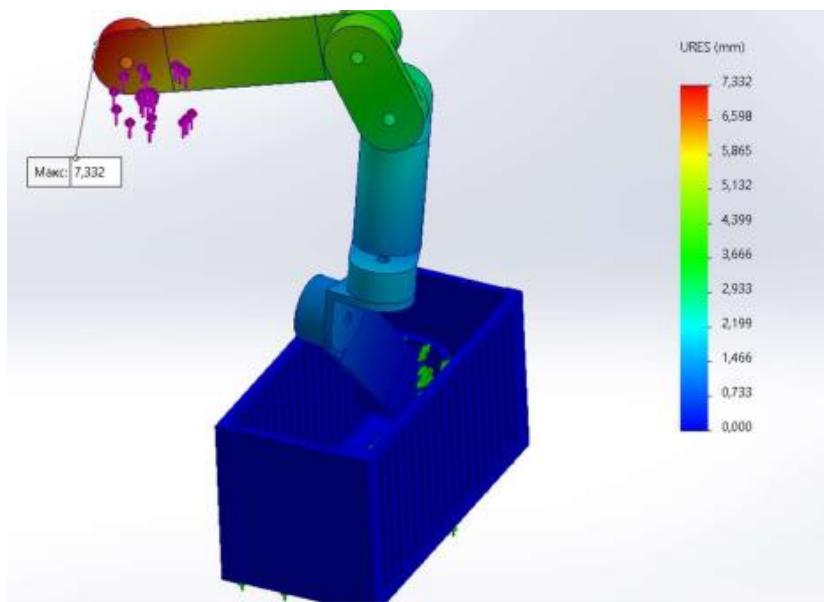


Рис. 3. – Анализ нагрузки на стрелу руки-манипулятора

Представленный анализ необходим для оценки практической применимости разработанной модели руки-манипулятора для выполнения разного рода задач в космическом пространстве. К основным из возможных задач можно отнести: сборка и развертывания космического оборудования в виде антенн, солнечных панелей, механизмов, сбор космического мусора, проведение экспериментов, захват и развертывание необходимых научных приборов и инструментов [5].

Исходя из вышеперечисленного объема задач была осуществлена имитация нагрузки на самый уязвимый элемент конструкции – стрелу манипулятора в объеме 4100 Ньютонов. Данная величина значительно превышает значения, с которыми малый космический аппарат действительно бы столкнулся в условиях невесомости, однако такой подход позволяет полностью удостовериться в надежности конструкции.

Таким образом проведенный анализ нагрузки конструкции демонстрирует её прочность и жизнеспособность в условиях космического пространства [6].

Следующим этапом было выполнено демонстрационное подключение электрических компонентов для работы манипулятора, необходимо сразу отметить, что сборка была упрощена, проделана только до плеча манипулятора, потому что дальше всё просто повторяется. А также для демонстрации возможного подключения электрические компоненты были просто расположены снизу короба. Результат данных работ представлен на рис. 4.

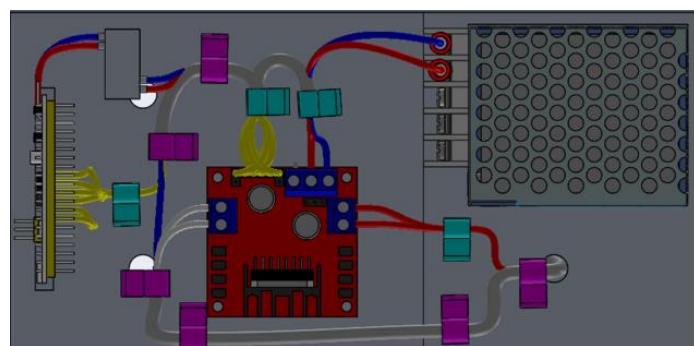


Рис. 4. – Размещение проводов в основании манипулятора

Также спроектировано и расположение токоведущих проводов и в верхней части манипулятора, как представлено на рис. 5.

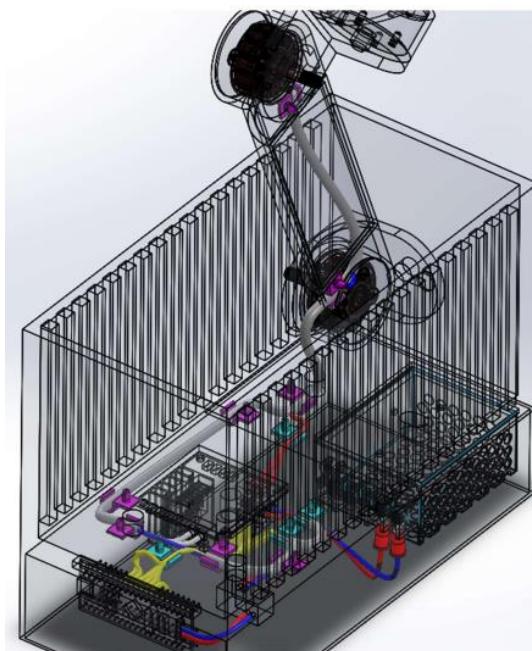


Рис. 5. – Общий вид всех подключений

Прокладка и подключение проводов в разработанном манипуляторе для малого космического аппарата (МКА) является критически важным аспектом, обеспечивающим работоспособность всей системы. Представленный вариант прокладки проводов обеспечивает надежную передачу энергии от источника питания к сервоприводам, управляющим движением звеньев манипулятора. Также провода передают управляющие сигналы от микроконтроллера к драйверам сервоприводов, обеспечивая точность и синхронизацию движений, обратная связь управления для корректировки ошибки осуществляется при помощи передачи данных от датчиков положения к микроконтроллеру.

## Заключение

В рамках данной научно-исследовательской работы была успешно проведена разработка и анализ конструкции многозвенного манипулятора для малого космического аппарата (МКА). Основным результатом работы

является создание 3D-модели манипулятора, отвечающей требованиям к габаритам, функциональности и весовым характеристикам МКА. Были рассмотрены основные этапы проектирования, включая выбор кинематической схемы, подбор материалов и обоснование конструктивных решений.

Ключевым аспектом работы стало применение метода конечных элементов (МКЭ) для оценки напряженно-деформированного состояния конструкции при заданных нагрузках. Результаты статического анализа позволили выявить области с максимальными напряжениями и деформациями, что дало возможность оценить прочность и надежность разработанной конструкции. Проведенный анализ показал необходимость внесения корректировок для оптимизации конструкции и обеспечения ее соответствия требованиям для работы в условиях космической среды.

Разработанная модель, наряду с полученными результатами анализа, может служить основой для создания прототипа и проведения дальнейших исследований, направленных на повышение эффективности и надежности роботизированных систем для малых космических аппаратов.

В перспективе, дальнейшие исследования могут быть направлены на оптимизацию кинематики манипулятора, использование новых материалов и технологий производства, а также проведение динамического анализа и испытаний в условиях, приближенных к космическим. Результаты проведенной работы представляют собой важный вклад в развитие космической робототехники и способствуют созданию более функциональных и эффективных малых космических аппаратов для будущих научных и прикладных миссий.

## Список литературы

1. Акуленко Л. Д., Михайлов С. А., Черноусько Ф. Л. Моделирование динамики манипулятора с упругими звеньями // Изв. АН СССР. Механика твёрдого тела, 1981, №3, с. 118–124.
2. Ефимова П. А. Кинематическая модель космического манипуляционного робота // Молодой учёный. — 2015. — №6 (86). — С. 1–7.
3. Кулаков Ф. М. Супервизорное управление манипуляционными роботами. — М.: Наука, 1980. — 448 с.
4. Кулаков Ф. М., Шмыров А. С., Шиманчук Д. В. Управление космическим роботом с использованием неустойчивой точки либрации // Мехатроника, автоматизация, управление. — 2014. — №7. — С. 23–28.
5. Полин А. В., Половко С. А., Юдин В. И. Мобильный манипулятор для обслуживания космических аппаратов // XIII Научно-техническая конференция «Экстремальная робототехника». Материалы конференции. Санкт-Петербург: Издательство СПбГТУ, 2003, с. 116–119.
6. Уфимцев А.В. Разработка и проектирование модели малого космического аппарата CUBESAT Сборник трудов XXIII научно-технической конференции молодых ученых и ПАО «РКК Энергия» 28 октября – 1 ноября 2024. – Королёв. – С. 348 – 350.