

## **КОМПЬЮТЕРНАЯ ГРАФИКА И 3D МОДЕЛИРОВАНИЕ В ПРОЦЕССЕ РАЗРАБОТКИ ШАРНИРНОГО МЕХАНИЗМА УНИФИЦИРОВАННОГО МЕХАТРОННОГО МОДУЛЯ С ТРЕМЯ СТЕПЕНЯМИ СВОБОДЫ ДЛЯ КОНСТРУИРОВАНИЯ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

*Дмитрий Дмитриевич Салогуб*

Национальный исследовательский университет "МИЭТ", 124498, Россия, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1, студент, тел. (985)401-88-71, e-mail: salogub.d@mail.ru

*Иван Владимирович Пьянов*

Национальный исследовательский университет "МИЭТ", 124498, Россия, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1, кандидат физико-математических наук, доцент Института биомедицинских систем, тел. (499)720-87-63, e-mail: biomedik@bk.ru

В процессе разработки шарнирного механизма унифицированного мехатронного модуля с тремя степенями свободы была выявлена необходимость проектирования и создания макетного образца устройства, установления реально возможной рабочей зоны механизма и особенностей его работы. На этапе симуляции рабочей зоны была установлена возможность использования таких программ, как MAXON Cinema 4D и Blender. В данных программах удалось визуализировать принцип работы разрабатываемого устройства, рабочую зону устройства, а также подготовить чертежи для последующего их использования при регистрации изобретения. Однако при подготовке чертежей конструкции, необходимых для 3D печати деталей конструкции, была установлена неэффективность работы в данных 3D редакторах в силу особенностей их работы с геометрией тел, создаваемых в них. Было принято решение производить проектирование деталей в программе Solidworks 2019 SP 4.0. Данная программа позволила произвести анимацию итоговой сборки устройства, а также подготовить чертежи для 3D печати. 3D печать производилась на принтерах, использующих технологии FFF/FDM и SLA/DLP. Было установлено преимущество технологии SLA/DLP для выполнения поставленной задачи. По итогу работ был изготовлен макет, подтверждающий жизнеспособность, заложенного в разрабатываемое устройство, принципа работы.

**Ключевые слова:** шарнирный механизм манипулятора, робототехника, протезирование, гидравлика, моделирование, мехатроника, 3D печать

## **COMPUTER GRAPHICS AND 3D MODELING IN THE PROCESS OF DEVELOPING A HINGE MECHANISM OF A UNIFIED MECHATRONIC MODULE WITH 3 DEGREES OF FREEDOM FOR ROBOTIC SYSTEMS DESIGN**

*Dmitriy D. Salogub*

National Research University "MIET", 1, Shokin Square, Moscow, Zelenograd, 124498, Russia, Student, phone: (985)401-88-71, e-mail: salogub.d@mail.ru

*Ivan V. Pryanov*

National Research University "MIET", 1, Shokin Square, Moscow, Zelenograd, 124498, Russia, Ph. D., Associate Professor, Institute of Biomedical Systems, phone: (499)720-87-63, e-mail: biomedik@bk.ru

In the process of developing the hinge mechanism of the unified mechatronic module with three degrees of freedom, the need to design and create a prototype device was identified, to establish

a real possible working area of the mechanism and the features of its operation. At the stage of simulating the working area, the possibility of using such programs as MAXON Cinema 4D and Blender was established. Using these programs, it was possible to visualize the principle of operation of the device being developed, the working area of the device, and also to prepare drawings for their subsequent using in the process of registering the invention. However, when preparing the design drawings necessary for 3D printing of structural parts, the inefficiency of work in these 3D editors was established due to the peculiarities of their work with the geometry of bodies created in them. It was decided to design construction components using Solidworks 2019 SP 4.0. This program made it possible to animate the final assembly of the device, as well as prepare drawings for 3D printing. 3D printing was carried out on FFF/FDM and SLA/DLP technologies based printers. The advantage of SLA/DLP technology was established for accomplishing the current task. As a result of the work, a model was made, confirming the viability of the principle of operation laid down in the device being developed.

**Keywords:** articulated mechanism of a manipulator, robotics, prosthetics, hydraulics, modeling, mechatronics, 3D printing

### *Введение*

Научно-технический прогресс в современном обществе неразрывно связан с развитием робототехники. Импульсом взрывного развития робототехники служит создание и развитие программ компьютерной графики и аддитивных технологий.

Высокий уровень сложности разрабатываемых робототехнических систем делает актуальным моделирование на всех стадиях работ, начиная с исследовательского проекта или разработки нового продукта, и заканчивая серийным производством. Применение современных методов компьютерной графики, 3D моделирования и аддитивных технологий сокращает время разработки, снижает риски, связанные с конструированием и технологическими просчётами, что значительно сокращает затраты на проектно-конструкторские работы и обеспечивает снижение вероятности выхода из строя робототехнической системы в последующей практической эксплуатации [1, 2].

Понимая, что нельзя полностью раскрыть все возможности микроэлектроники без прогресса в разработке исполнительных механизмов, была сформулирована задача создать без редукционный шарнирный механизм с тремя степенями свободы [3]. Реализация унифицированного шарнирного механизма с использованием вторичного энергоносителя на основе электромагнитного возмущения столкнулась с отсутствием технологических возможностей [4]. Поэтому было принято решение разработать унифицированный шарнирный механизм с использованием в качестве вторичного энергоносителя давления жидкости. Такой модуль должен обеспечивать усилия на рабочем органе, предполагающие практическое применение, будь то в конструировании протезов, специальной технике и технике бытового назначения или в возможности разработки отечественного робототехнического конструктора, что создаст предпосылки включения в процесс робототехнического конструирования бóльшего количества инженерно-технических специалистов [5].

## *Методы и материалы*

Для теоретической оценки возможностей механизма и рациональности разработки такого технического решения использовалась программа Cinema 4D. В ней были выполнены анимации, показывающие рабочую зону манипулятора, состоящего из двух разрабатываемых шарнирных механизмов, соединённых последовательно, а также взаимодействие их внутренних элементов устройства. Также были созданы первые версии чертежей, которые в последствии были выведены в STL формате для дальнейшей «нарезки на слои» и печати на 3D принтере. Эта же программа использовалась при подготовке чертежей для регистрации интеллектуальной собственности с визуализацией всех составляющих конструкции. Анимация внутреннего устройства и создания чертежей обеспечивалась встроенным тегом Sketch and toon, позволяющим выделить контуры интересующих 3D объектов, а также организовать штриховку и эффекты абсолютной прозрачности.

В процессе практической реализации был инициирован проект создания унифицированного мехатронного модуля на базе разработанного шарнирного механизма, поддержанный Фондом Содействия Инновациям по программе УМНИК-20 (ЦЭ-1) / ЦЭ – Электроника - 2020 [6, 7, 8].

## *Результаты*

В результате проделанной работы была подана заявка на регистрацию - интеллектуальной собственности, произведено трёхмерное моделирование разрабатываемого устройства, визуализация принципа его работы, выполнены чертежи для 3D печати деталей конструкции, а также изготовлен макетный образец, позволивший экспериментально подтвердить работоспособность предлагаемого технического решения конструкции шарнирного механизма. В процессе работ также было установлено, что печать с использованием технологии SLA/DLP обладает рядом преимуществ перед технологией FFF/FDM при решении поставленных задач.

## *Обсуждение*

Поскольку Cinema 4D работает с объектами, состоящими из полигонов, при необходимости создания геометрически чётких и гладких объектов сложной конструкции, возникает проблема достаточно долгого ожидания произведения булевых операций с объектами. Наиболее часто использовалась операция вычитания. С объектами, состоящими из 1-4 миллионов полигонов, указанная операция могла производиться вплоть до 3-7-ми минут на конфигурации, включающей в себя процессор Intel Core i7-7700K, работающий на частоте 5 ГГц, 16 Гб оперативной памяти DDR4 3200 МГц и видеокарту GTX 1060. Данный аспект работы значительно усложнял процесс выполнения работ по проектированию деталей, поэтому предпочтение было отдано программе, предназначенной непосред-

ственно для решения задач, связанных с проектированием. Кроме того, в Cinema 4D операции булевых вычитаний не во всех случаях производятся адекватно с позиции формирования полигональной сетки итогового объекта. Могут возникать искажения в тех или иных частях итогового объекта, что, в случае необходимости точного проектирования, является достаточно критическим моментом, требующим внимания и выделения немалого количества времени для коррекции. Решить проблему длительности и неточности произведения операций вычитания удалось путём портирования объектов, с которыми было необходимо произвести указанную операцию, в Blender. Практика показала, что данный 3D пакет позволяет качественнее выполнять Булевы операции.

В дальнейшем была выявлена необходимость использования при проектировании специализированного программного Solidworks 2019 SP 4.0. Работа в данной программе значительно ускорила процесс проектирования необходимых деталей. Именно с использованием данного пакета были выполнены финальные чертежи для 3D печати. В указанной системе операции вырезания одних объектов из других занимают значительно меньше времени независимо от сложности участвующих объектов, что обусловлено отсутствием необходимости обработки операций с полигонами.

Сама конструкция шарнира представляет собой три низшие сферические пары, каждая из которых самостоятельно вращается вокруг одной из трёх осей под воздействием давления рабочего тела – жидкости (рис. 1).

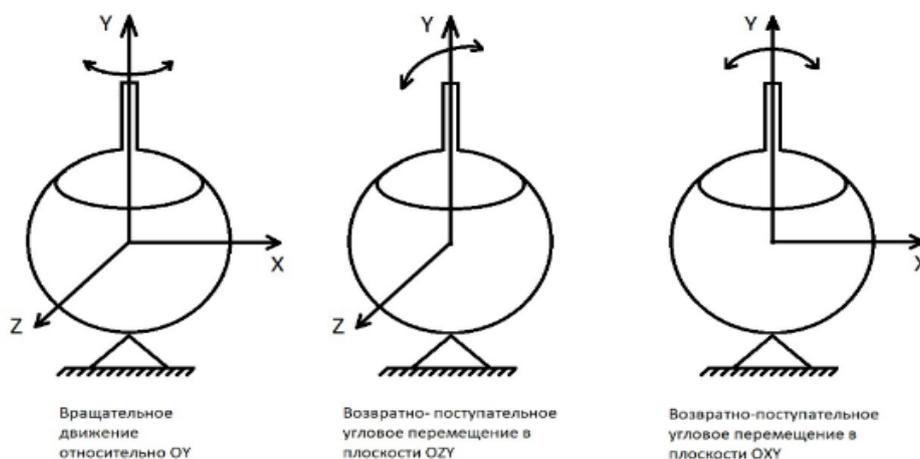


Рис. 1. Степени свободы шарнирного механизма

Практическая реализация осуществлялась по сборке, выполненной в программе Solidworks (рис. 2).

Создаваемое устройство предполагает сопряжение по сферической поверхности звеньев с внутренними каналами. В связи с этим встал вопрос о технологических возможностях создания указанных деталей.

Предполагалась достаточность использования печати на 3D принтере с использованием технологии FDM/FFF и SLA/DLP.

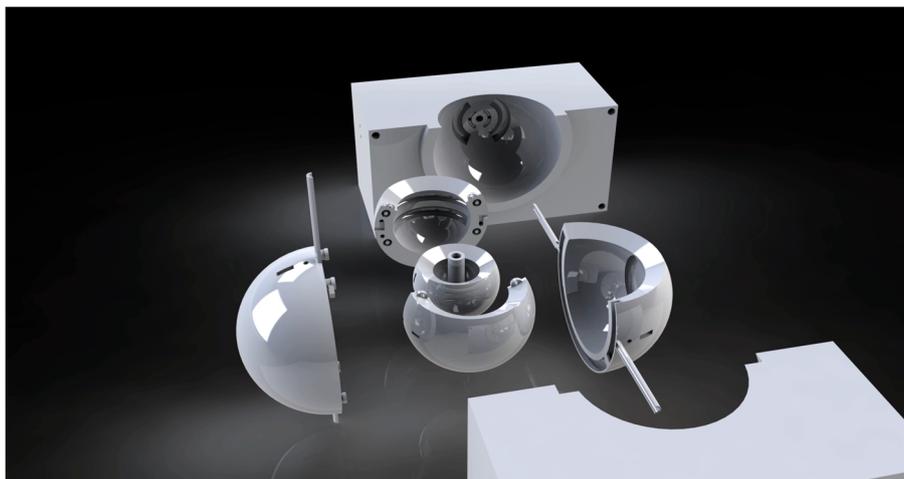


Рис. 2. Концепт сборки, Solidworks

Для печати на принтере 3D quality prism mini, представляющем семейство дельта-принтеров, использовался PLA пластик. В процессе печати на данном 3D принтере были отмечены следующие особенности:

- Необходимо производство калибровки перед каждой новой печатью;
- Высота конструкции и скорость перемещения печатающей головки в купе с её массивностью создают достаточно сильные колебания принтера, что требует тщательной его фиксации с целью устранения погрешностей, вызываемых появлением указанных колебаний;

- Абсолютная погрешность при печати составляет около 3-5 мм по всем осям при габаритных размерах в пределах до 100 мм. Это связано с особенностями технологии печати, например – неравномерной усадкой пластика в разных областях печатаемого объекта в процессе печати, неоднородность прогрева пластика и окружающей среды, что отрицательно сказывалось на размерах слоев и адгезии между ними. Относительная погрешность при печати сферической детали составила 3-5 %, что не обеспечивало необходимой точности деталей.

Печать с использованием принтера Picaso Designer X Pro (FFF/FDM). В котором сопла перемещаются только в плоскости XOY, а перемещение по оси Z осуществляется подъемом стола. Был использован пластик двух видов: PLA и PVA, - от компании REC 3D. Данный принтер имеет два сопла, используемых для печати непосредственно детали, а также необходимых поддержек, предотвращающих деформации при печати нависающих элементов. В процессе печати были выявлены проблемы с адгезией слоёв, что негативно сказывалось на прочности печатаемых деталей, создавая многочисленные проблемы с печатью, вызванные сужением и расширением печатаемых площадок. В среднем, приблизительно на отметке в 50-70 % прогресса происходили сильные деформации такие, что дальнейшая печать была невозможна. При анализе напечатанных деталей было выявлено, что относительные погрешности составляли 2-4 % для сферических деталей диаметром в 100 мм, что не удовлетворяло необходимым требованиям к точности исполнения деталей. Наблюдалась плохая адгезия слоёв, из-за

чего детали получались недостаточно прочными и не обеспечивали герметичности стенок каналов и конструкции изделия.

К общим недостаткам печати с использованием технологий FFF/FDM относятся:

- Неравномерное охлаждение и укладка элементов детали при печати, что не позволяло адекватно предсказывать их с целью введения корректировок в чертежи;
- Печать с использованием данной технологии крайне длительна, до 5-7 суток, что повышает риски перебоев печати при невозможности продолжения печати после устранения причин сбоя;
- Много нюансов, связанных с обеспечением адгезии детали к столику;
- Точность исполнения деталей не удовлетворительна, если требуется изготавливать детали с абсолютными погрешностями в районе 0,05-0,5 мм.

Была выявлена необходимость смены технологии печати. Предпочтение было отдано технологии SLA/DLP, и, в частности, фотополимерному 3D принтеру Anycubic Photon MONO X.

Данная технология позволила исполнить те же детали с абсолютными погрешностями в 0,1-0,3 мм независимо от размеров детали. Важно отметить, что в данном случае погрешности являются постоянными для каждого слоя печати. Они обусловлены нестабильностью стойки столика, создающей погрешность по осям X-Y, а также разбиением детали на пиксели. Но эти погрешности поддавались программной корректировке. Данный способ обеспечивает достижение допустимой для лабораторных исследований, но недостаточной для макетного образца точности деталей при печати с постоянным составом полимера, постоянными зазорами, толщинами защитных пленок, состоянием источников УФ излучения для всей совокупности деталей изделия, что позволило осуществить печать деталей и сборку макета, и на практике подтвердить работоспособность изделия (рис. 3).



Рис. 3. Практическая реализация шарнира для лабораторных исследований

Однако в процессе экспериментального исследования мы столкнулись с недостаточностью точности изготовления деталей с точки зрения герметичности. Поэтому на данном этапе планируется рассмотреть возможность изготовления деталей по технологии SLM.

Однако в любом случае следует ориентироваться на механическую пост-печатную обработку изделий для достижения точности изготовления, обеспечивающую молекулярную герметизацию сопряжения сферических поверхностей.

### *Заключение*

Результаты проделанных работ показали особенности 3D печати с использованием FFF/FDM и SLA/DLP технологий в процессе изготовления деталей для гидравлического устройства. Была установлена необходимость использования технологий, позволяющих производить более точно исполненные детали. Также установлено, что при 3D печати с использованием указанных технологий требуется делать значительный акцент на пост-обработке деталей, являющейся весьма ресурсоёмким процессом. Также были установлены сферы применения ряда программ для 3D моделирования и анимации в рамках заданного проекта, а также определена их эффективность в решении возникающих задач.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бжихатлов И.А. Моделирование робототехнических систем в программе V-REP. Учебно-Методическое пособие. – СПб: Университет ИТМО, 2018. – 59 с. – URL: <https://books.ifmo.ru/file/pdf/2351.pdf> (дата обращения 23.02.2021г.).
2. Ступина Е.Е., Ступин А.А., Чупин Д.Ю., Каменев Р.В. С884 Основы робототехники: учебное пособие. —Новосибирск: Агентство «Сибпринт», 2019. — 160 с. – ISBN 978-5-94301-769-8. – URL: <https://repo.nspu.ru/bitstream/nspu/3630/1/osnovy-robototehniki-uchebnoe-po.pdf> (дата обращения 20.02.2021г.).
3. Жавнер В.Л. Мехатронные системы: учеб. пособие / В. Л.Жавнер, А. Б. Смирнов. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. – 131 с.
4. SALOGUB Dmitrii. Mecanism articulatat al manipulatorului, INVENȚII 4619, B1, MD - BOP1 2/2019.
5. Салогуб Д.Д. Исследование унифицированного шарнирного механизма мехатронного модуля для конструирования робототехнических систем, стр. 228. Сборник материалов VII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Образование в военно-инженерном деле: теория и практика» Часть II. – Тюмень: ТВВИКУ, 2020. – 752 с.
6. Салогуб Д. Д., Сарыгин М. С. Проектирование унифицированного мехатронного модуля на базе шарнирного механизма для конструирования робототехнических систем, стр. 83, Актуальные проблемы информатизации в цифровой экономике и научных исследованиях. Международная научно-практическая конференция: тезисы докладов. – М.: МИЭТ, 2019. - 112 с.
7. Салогуб Д. Д., Сарыгин М. С. Исследование рабочей зоны унифицированного шарнирного механизма, интегрированного с двигателями, обеспечивающими не менее трех степеней свободы 27-я Всероссийская межвузовская научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Микроэлектроника и информатика - 2020».

8. Салогуб Д.Д. Разработка шарнирного механизма манипулятора, интегрированного сдвигателями, обладающего не менее, чем тремя степенями свободы для использования в унифицированных мехатронных модулях, применяемых при конструировании антропоморфных и других робототехнических систем. Материалы Международного молодежного научного форума «ЛОМОНОСОВ-2020» [Электронный ресурс] – Режим доступа: [https://lomonosov-msu.ru/archive/Lomonosov\\_2020/index.htm](https://lomonosov-msu.ru/archive/Lomonosov_2020/index.htm) , свободный.

© Д. Д. Салогуб, И. В. Пьянов, 2021