

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

Инженерно-строительный институт

Кафедра Строительных материалов и технологий строительства

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

\_\_\_\_\_ И.Г. Енджиевская

подпись инициалы,  
фамилия « \_\_\_\_\_ »

\_\_\_\_\_ 2021 г.

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

Тема: 3D печать строительных изделий

08.04.01 Строительство

код и наименование направления

08.04.01.00.07 Комплексная механизация и автоматизация строительства

код и наименование магистерской программы

Научный руководитель \_\_\_\_\_ доц., канд. техн. наук Н.Ю. Клиндух

подпись, дата должность, ученая степень инициалы, фамилия

Выпускник \_\_\_\_\_ И.К. Амузин

подпись, дата инициалы, фамилия

Рецензент \_\_\_\_\_ проф., д-р техн. наук В. И. Иванчура

подпись, дата должность, ученая степень инициалы, фамилия

Нормоконтролер \_\_\_\_\_ доц., канд. техн. наук Е.С. Турышева

Красноярск 2021

## РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа по теме «3D печать строительных изделий» содержит 90 страниц текстового документа, 36 иллюстраций, 1 приложение и 26 использованных источников.

3D-ПЕЧАТЬ, ТРЕХМЕРНАЯ ПЕЧАТЬ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ, РАБОЧИЙ ПРОЦЕСС, МОДЕЛИРОВАНИЕ, ДИНАМИКА СЛЕДЯЩИХ ПРИВОДОВ, ДВИГАТЕЛЬ ПОСТОЯННОГО ТОКА, СИНТЕЗ РЕГУЛЯТОРА, ARDUINO, SIMULINK, НЕПРЕРЫВНЫЙ КОНТРОЛЬ ПОДАЧИ БЕТОНА.

Объект исследования – строительный 3D принтер манипуляторного типа

Предмет исследования – механика перемещения, подачи и экструзии раствора принтером манипулятором.

Целью работы является исследование и доработка конструкции принтера, усовершенствование составляющих его частей и механизмов, для повышения эффективности работы и использования устройства в целом, расширение области применения строительной 3D-печати и аддитивных строительных технологий.

В результате были поставлены и решены следующие задачи:

– выполнен анализ научной литературы по теме 3D-печати, аддитивных технологий, разновидностей строительных принтеров, роботизации и автоматизации строительства, перспективных направлений в строительстве с возможностью совершенствования процессов при помощи принтеров, а также моделирования технологий, применяемых в данной отрасли;

– на основании анализа сделан вывод о состоянии вопроса, актуальности и перспективах разработок в этой тематике, определены и сформулированы предмет и задачи исследования;

– рассчитана математическая модель строительного 3D принтера;

– разработана имитационная модель строительного 3D принтера в программном комплексе MATLAB/Simulink;

- подготовлена методика компьютерного моделирования и экспериментального исследования объекта;
- выполнено компьютерное моделирование рабочего процесса и эксперимент с объектом исследования;
- проведен анализ результатов, полученных в магистерской диссертации и предложены варианты совершенствования и модернизации процессов строительной печати.

Научная новизна заключается в подходах к изучению, с использованием актуальных методов и программных комплексов.

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 Состояние вопроса .....	8
1.1 Перспективы трехмерной печати в строительстве и ее преимущества .....	8
1.2 Средства 3D-печати в строительстве .....	15
1.3 Анализ предшествующих исследований .....	20
1.4 Рабочая гипотеза .....	35
2 Моделирование процессов 3D-печати строительных изделий .....	37
2.1 Описание объекта исследования .....	37
2.2 Разработка расчетной схемы.....	42
2.3 Математическое описание модели серводвигателя .....	46
2.4 Создание имитационной модели в программе MATLAB/SIMULINK.....	51
3 Методика эксперимента .....	59
3.1 Разработка экспериментальной базы на платформе Arduino .....	59
3.2 Программирование и проведение натурных исследований .....	64
3.3 Результаты экспериментальных исследований .....	71
3.4 Методы контроля качества 3D печати строительных изделий .....	74
4 Реализация результатов исследований .....	79
4.1 Экономическая эффективность трехмерной печати в строительстве .....	79
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	84
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....	86
ПРИЛОЖЕНИЕ А Фрагмент кода Arduino IDE.....	90
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Публикации.....	91

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность выбранной темы.** Строительство – это древнейшее ремесло, которое шаг в шаг идет рядом с человечеством, развитие одного без другого попросту невозможно. Социализация, индустриализация и даже глобализация, так или иначе, все связаны со строительством, начиная от частного дома для небольшой семьи, заканчивая городами с миллионным населением, последние в свою очередь потрясают инфраструктурой и являются отражением эволюции отрасли строительства. Но при всех новшествах, сама отрасль строительства очень консервативна, некоторые технологии, чуть ли не забытых цивилизаций, используются до сих пор, меняется лишь подход и улучшаются материалы.

Строительная площадка является зоной повышенной опасности, а выполнение работ отличается сложностью и монотонностью, все это служит якорем для всей отрасли. Но что если уже есть технология, которая, если не лишена недостатков, то очень и очень сильно минимизирует их, а ее преимущества уже на порядок выше. В любом строительном проекте успех складывается из всего-то трех факторов, а именно стоимость, сроки и результат качества. 3D-печать в строительстве – это самая недооцененная технология на данный момент, именно в ней складываются эти факторы и растворяются недостатки привычных нам способов строительства.

Роботизация не просто совершенствует строительное производство, это своего рода промышленный переворот. Отчетливо проявляют себя ее достоинства, сроки строительства значительно сокращаются, а человеческий труд не просто уменьшается, вместо ручного труда требуется умственный, а площадка становится существенно безопасней. Роль человека остается лишь в работе с электроникой, алгоритмами работ, исходными данными, результатом и их анализом.

В данной работе исследуются существующие технологии 3D-печати в строительстве, разновидности роботов-принтеров, опыт применения подобных

технологий.

**Степень научной разработанности темы исследования.** Вопрос автоматизации строительных производств остается актуальным еще с прошлого века, к нему приковано внимание ведущих институтов и научно-исследовательских и мировых строительных организаций, среди них такие как Мюнхенский технологический и Колумбийский университеты, ЮРГТУ (НПИ), университет Стенфорда, компания Aris Cor. Внедрение роботизации в строительные операции описываются трудами следующих ученых: Булгаков А.Г., Френкель Г.Ю., Воробьев В.А., Евдокимов В.А., Гудиков Г.Г., Вильман Ю.А., Максимычев О.И. В основы робототехники и мехатроники внесли значительный вклад такие ученые как: Юревич Е.И., Петраков В.А., Подураев Ю.В., Ющенко А.С., Бурдаков С.Ф., Медведев В.С.

Самые новаторские исследования и разработки в технологии строительной 3D-печати подробно описаны в научных публикациях многих авторов, таких как: Лунева Д.А., Иноземцев А.С., Зыонг Тхань Куй, Аржанников А. О., Абрамян С. Г., Davidla Delgado J. M., Андреев Н. Ю., Ajayi A.O., Akinade O.O. Но, до сих пор, при всех научных разработках, практических проектах и исследованиях, уровень автоматизации и масштабного применения остается на низком. Требуется решить задачи подачи смеси 3D-принтером, контроля качества экструзии и состояния конструкции до набора первичной прочности или затвердевания. Необходимо разработать алгоритмы работы техники в случаях непредвиденных, блокировки систем или выполнения установленных действий по ситуации.

Моделирование строительных принтеров и осуществляемых ими процессов совсем не простая задача. Для ее решения требуется составление дифференциальных уравнений, описывающих сам процесс, а также интегрирование. Современные компьютерные комплексы существенно упрощают задачу, среди них MathCAD, MATLAB, Simulink. С их помощью процесс становится гораздо доступней, быстрее и практичней, таким образом разработки в сфере появляются чаще.

Данная работа посвящена исследованию и разработке новейших технологий возведения строительных конструкций аддитивными методами строительного производства. Они подходят под любую сложность обстановки строительной площадки, будь то стесненность или климат.

**Целью** данной работы является моделирование и совершенствование рабочих процессов средств 3D-печати в строительстве.

**Публикации результатов исследования.** Основные положения диссертации опубликованы в 3 научных трудах, в том числе по материалам работы опубликовано 3 научных статьи в издательствах, входящих в перечень ВАК. Один из трудов награжден дипломом первой степени на международной конференции.

## **1 Состояние вопроса**

### **1.1 Перспективы трехмерной печати в строительстве и ее преимущества**

При помощи 3D-принтеров сегодня возможно печатать как жилые, так и нежилые дома, помещения и строения сложных архитектурных форм. Возможности данного комплекса не ограничиваются скромными строениями, а распространяются на многоэтажные конструкции и не ограничивают их сезонной эксплуатацией, такие дома пригодны для жизни круглогодично. Основным материалом таких изделий это армированный бетон, при чем применяют композитные материалы. Несущая способность таких конструкций не уступает обыкновенным, а технические характеристики идентичны привычному жилью. Технология строительной печати позволяет воплощать в жизнь самые невообразимые дизайнерские проекты и возводить необыкновенной формы сооружения. Как показала практика применения строительных принтеров, это в разы менее трудоемко и гораздо дешевле традиционных альтернатив.

Экономически рациональное создание уникальных проектов и обеспечение малоимущих слоев населения это два основных перспективных направления 3D-печати в строительстве. При чем жилье должно быть долговечным, экологичным, комфортным и доступным финансово для реализации. Фактором сдерживания повсеместного применения выступает отсутствие законодательной базы для 3D-печати в строительстве. Тем не менее, применяя исключительно эту технологию возведения, строители с абсолютно разных уголков мира строили объекты, которые уверенно стоят и уже довольно долго эксплуатируются. Примером таких работ будет дом охранников Екатеринбургского цементного завода от компании из города Ярославль в России. Это первый объект недвижимости, напечатанный компанией «АМТ-Спецавиа» в 2015 году, который стал визитной карточкой компании. Дом площадью 165 м<sup>2</sup> изображен на рисунке 1.





Рисунок 1 – Дом Российской компании АМТ «Спецавиа»

Большой интерес проявляют в ОАЭ, там даже существует конкуренция между такими компаниями как Голландская CyBe Construction, Американская Contour Crafting или Итальянская WASP. Так первой из них уже предложили контракт на возведение 20 процентов всех новых зданий Дубая так в 2019 году там с помощью принтера компании APIS COR возвели здание площадью 640 м<sup>2</sup> оно изображено на рисунке 2.



Рисунок 2 – Результат строительной 3D печати в ОАЭ

Но, как и во всем, существуют свои преимущества и также свои недостатки. Основываясь на их анализе и стоит делать вывод о перспективах данной технологии для будущего. Для выявления плюсов и минусов необходимо разобраться с технологией и особенностями строительной печати.

Строительные 3D-принтеры оснащаются печатающими головками, так называемыми экструдерами, через них выдавливается и укладывается бетон послойно формируя конструкции внутренних и внешних стен будущего здания. Предварительно должен быть разработан проект трехмерной модели объекта на компьютере в CAD-программе. Раствор для печати должен иметь четкие характеристики консистенции, для этого применяют пластификаторы и добавки, но в целом процесс смешивания компонентов подобен приготовлению обычного бетона. По готовности раствор нагнетается давлением в шланг, ведущий к головке принтера. Экструзия происходит с фиксированной скоростью на подготовленную площадку. По сути принтер очерчивает периметр проекта послойно нанося материал.

В сравнении с обыкновенным строительным бетоном, раствор для 3D-печати по своим характеристикам больше всего напоминает многокомпонентный высокомарочный раствор с отсутствием крупного заполнителя. Чтобы придать ему дополнительную прочность, в раствор добавляют добавки вроде фиброволокна, а стены постройки армируют стекловолокном прямо во время печати.

3D-печать одинаково удобна для создания как небольших, так и крупноразмерных конструкций. Тем не менее, ее применение крупными городскими застройщиками для серьезных объектов и поточной застройки сильно ограничено, в силу отсутствия регламентирующих баз и законодательства. В таком случае на данный момент она актуальна лишь для среднего и малого предпринимательства.

Типы строительных 3D-принтеров:

- XYZ-принтеры.
- Дельта

- Роботы
- D-Shape

Портальные модели известны всем как XYZ-принтеры. По сути своей это рамы, печатная головка которых перемещается по осям X, Y. Установка головки и ее перемещение обеспечивается направляющими опорами, образующих рамы. Перемещение портала по направляющим различных координат осуществляется высокоточными шаговыми двигателями.

Существуют три способа их эксплуатации:

- При относительно скромных габаритах постройки печать производится целиком.
- Внушительные размеры объекта заставляют печатать его составные части отдельно с последующим монтажом и связкой.
- Так же принтер можно расположить внутри существующих конструкций для печати внутренних стен.

В сравнении с XYZ-устройствами, дельта-принтеры лучше подходят для создания более изощренных конструкций, благодаря своему каркасу они не привязаны к трехмерным направляющим. Толстые, жесткие рамы в этом случае заменены на тонкие рычаги, перемещающиеся по наклонным направляющим, а на рычагах крепят головы печати устройств.

Роботизированные устройства представляют из себя обыкновенные строительные манипуляторы промышленного типа. Для обеспечения подобного рода работ последние оснащают и оборудуют системами смешивания компонентов, подачи раствора, а также системами компьютерного контроля и управления.

Аппараты под названием D-Shape выделяются не с проста, их филамент являет из себя не раствор, а порошковый, сухой материал. Филамент формируют и уплотняют слой за слоем в соответствии с желаемой толщиной, после чего, он пропитывается связующим веществом снова, при помощи принтера. Готовый элемент подвергается финишной обработке для избавления от излишков.

Материальной основой печати является бетон. Основные трудности возникают как в процессе подачи смеси от бункера до экструдера, так и в укладываемости. Так как материал не должен растекаться и наносится равномерно, его состав тщательно проработан и конфигурация соотношения пропорций формирует консистенцию. Важно учесть, что временные рамки схватывания должны соответствовать промежутку между сохранением формы при экструзии и однородном соединении накладываемых слоев в месте соприкосновения, для чего рассчитывается химическая активность. Также, слишком быстрое схватывание может повредить конструкции принтера и заблокировать процесс экструзии. Подвижность раствора обеспечивают добавки в виде пластифицирующих веществ, а соотношение количества воды к цементу уменьшается.

Пора рассмотреть плюсы и минусы технологии строительной трехмерной печати.

Трехмерное аддитивное строительство воплощает в реальность все, физически возможные архитектурные и конструктивные фантазии.

Проекты нехарактерного, сложного дизайна возводятся принтером гораздо дешевле и проще, нежели традиционными методами. Технология предусмотрела это в себе и это преимущество не опровергнуть.

Процессы данного производства налажены и настроены на машинные точность и скорость. Печать объекта производится четко в соответствии с программой проекта и материализуется из модели. Для исключения некачественной продукции проект прорабатывается досконально.

Физический труд человека сходит на нет, вместо него возникает необходимость в высококвалифицированных кадрах, что в свою очередь не совсем лишает человека рабочего места, а дает ему перспективу развития.

В процессе строительства, в связи с его особенностью, остается меньше мусора. Использование компонентов происходит без необходимости в дополнительных процессах, таких как очистка, подготовка, а производство получается почти безотходным.

Благодаря этому процесс строительства несет гораздо меньше рисков и не столь угрожает окружающей среде.

К недостаткам технологии отнесем узкий спектр применяемых высококачественных растворов, что в рамках масштабного использования осложняется дефицитом.

Дефицит квалифицированных кадров для использования и ремонта техники, проектирования конструкций с учетом нюансов и особенностей новой технологии.

Некоторые применяемые технологии стоит исключить за неликвидностью, к примеру сборка готовых, заранее напечатанных компонентов на месте оказывается столь же долгой и трудоемкой как и традиционные методы возведения.

Открыт вопрос нормирования и юридического регулирования применения поточного производства при помощи данных технологий.

Новизну технологии можно отнести к недостаткам только лишь потому, что потребителям необходимо время чтобы привыкнуть к новому, к ее преимуществам и полюбить ее. Выбор жилья очень ответственный и дорогостоящий момент в жизни многих, поэтому нужно дать время технологии оправдать себя.

Лишь благодаря темпам развития и международного повсеместного применения 3D-технологий можно предположить, что существующие минусы технологии преодолеваются в данный момент и вопрос скоро будет закрыт.

Трехмерная печать в строительстве уже давно позволяет возводить потрясающие дома для постоянного, круглогодичного проживания. Габариты объекта не играют никакой роли, будь то помещения минимальной площади либо строения с просторными залами, технология даже дерзит на многоэтажные и многоквартирные дома. По прочности и долговечности такие строения не уступают своим традиционным аналогам, а технологически опережают во всех направлениях.

Мало того, что идет речь о повышении экологичности и

энергоэффективности, так и процесс производства менее трудозатратен, существенно снижен расход материалов, время сокращается в разы и трудозатрат на порядок меньше. Опять же все упирается в вопрос законодательной базы данных технологий.

В виду этого применение ограничено локальными проектами среднего и малого бизнеса. В перспективе у этой технологии огромная задача решения проблемы жилья и жилищных условий миллионов людей по всему миру, без необходимости непомерных, невозвратных инвестиций. К тому же технология позволит каждому проекту подчеркнуть свою индивидуальность.

В сухом остатке, анализ преимуществ и недостатков аддитивных технологий отразил что наиболее востребованные методы производства охотно поддаются корректировке. Архитектурные проекты ограничены лишь физическими возможностями, при этом разработка дизайна и его исполнение остаются на прежнем уровне. Внедрение любых технологических проемов, каналов и отверстий легко адаптируется в конструкцию по мере необходимости, что особо эффективно для промышленных предприятий разнообразных направлений, таких как, авиастроения, медицины и энергетики. Применение в различных областях производства обеспечивается разнообразием процессов, в чем заключается основное преимущество подобных технологий.

В свою очередь экономика на данный момент оказывает сопротивление повсеместному внедрению производства, но, как известно рынок одновременно непредсказуем и цикличен, что полноправно указывает на огромные перспективы в случае высокого качества продукта. Но на данный момент, даже опустив факт международной заинтересованности существует ряд естественных причин, медленного внедрения, среди них и отсутствие маркетинга, общественной осведомленности и интереса к технологии, недостаток кадров сборки, эксплуатации, обслуживания и ремонта техники, отсутствие стандартизации техпроцессов, регламентов, САПР моделей и материалов.

Основные проблемы решаются со временем, специалисты привлекаются

со многих близких отраслей, к примеру машиностроение, заинтересованность приходит по мере внедрения и охвата. Быстро и решительно все это устраняется благодаря господдержке, что так же отразится на приспособлении к изменчивым условиям применения.

## 1.2 Средства 3D-печати в строительстве

3D технологии широко применяются во всех сферах производственной деятельности человека, от микрохирургии для производства сердечных клапанов и даже печати живой ткани на основании генного кода, до менее точного, но куда более объемного строительства, в котором уже давно пора избавиться от неэффективного, по меркам существующих технологий, ручного труда. Строительные принтеры существуют в множестве виде, к примеру принтер портального типа изображен на рисунке 3.

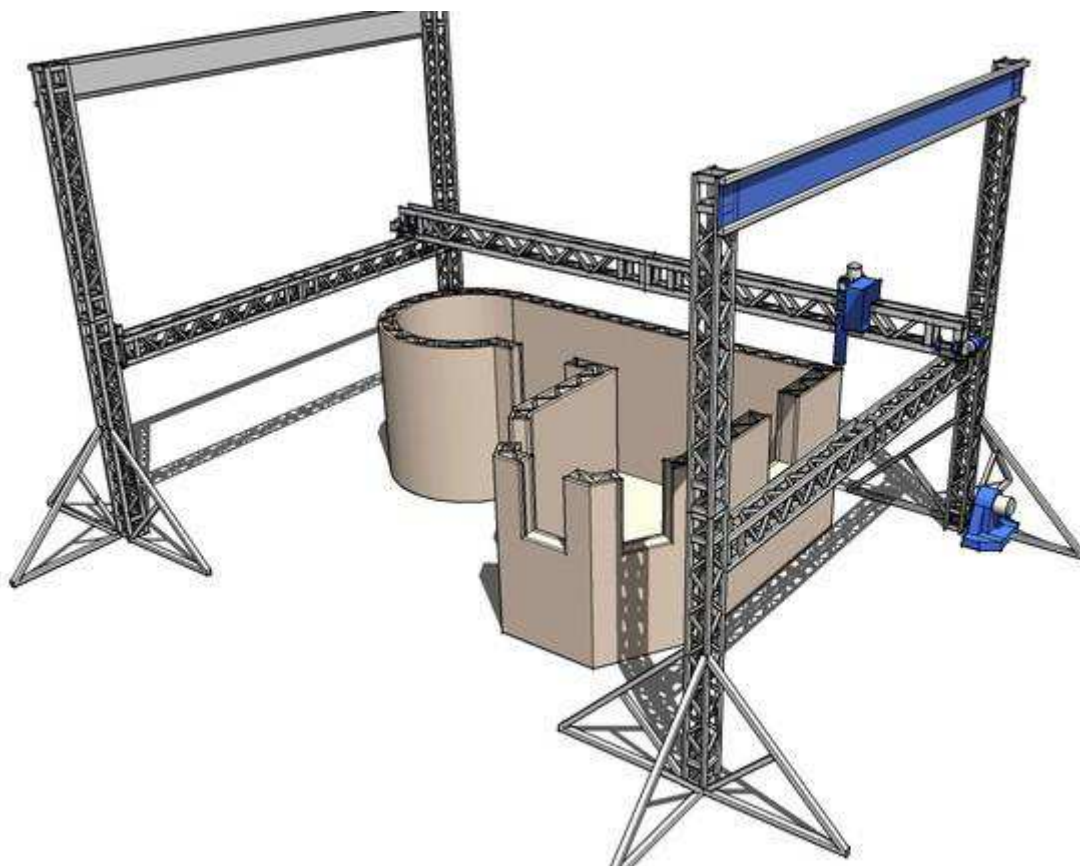


Рисунок 3 – Строительный 3D принтер портального типа



Технология экструзии среди всех строительных принтеров очень похожа, но конструктивные особенности принтера порталного типа, это его основные недостатки перед конкурентом в виде принтера-манипулятора. Даже обыватель увидит, что порталный принтер ограничен в пространстве, сложен сборкой и разборкой всей конструкции, и ее габаритами при транспортировке, а также требует жесткого основания под всем периметром каркаса оборудования.

В условиях современного строительства очень велико влияние экономического фактора, который в свою очередь зависит от сроков строительства и трудоемкости выполняемых работ. Именно на сокращение сроков, трудоемкости работ направлены новейшие исследования строительных технологий. Для сохранения конкурентной способности компании во всем мире применяют всевозможную автоматизацию. Лучшим ее проявлением стали манипуляторы.

Функции таких механизмов не ограничены, основой конечно же является многозадачность манипулятора, путем дооснащения робота и применения необходимого программного обеспечения он выполняет самые непредсказуемые задачи. Таким образом, из робота манипулятора, системы подачи бетона, бункера для бетонной смеси и комплекса автоматизации управления и подачи был сконструирован первый строительный 3D-принтер манипуляторного типа, который изображен на рисунке 4.



Рисунок 4 – Строительный 3D принтер манипуляторного типа компании Apri  
cor.



Такая конструкция робота предоставила технологии 3D печати особые преимущества. Во-первых мобильность в использовании, установке, работе на участке застройки при смене места и конечно же транспортировке. Сама конструкция нуждается в жестком основании небольшого размера, а для устройства в исходное положение не требует сборки, она не органичена в пространственном перемещении, и требует лишь визуального, либо программного контроля.

Метод послойной экструзии – это основной способ, используемый в аддитивных технологиях. Данный метод заключается в том, что при помощи экструдера или рабочего сопла машина выдавливает быстротвердеющую рабочую смесь, в состав которой включены различные добавки, пластификаторы, микрофибры и тому подобное, формирующие необходимую пластичность и констистенцию смеси.

Аддитивными технологиями называют формирование объектов при помощи трехмерной печати. Для автоматической работы принтера требуется создать компьютерную модель будущего объекта. Делается это в, привычных инженерам, трехмерных графических редакторах, таких как REVIT, SolidWorks, 3D StudioMax. Трехмерная модель объекта разбивается на слои и алгоритм их последовательности. Таким образом принтер печатает объект слой за слоем в соответствии с программной моделью, выдавливая каждый уровень в плоскости, а затем перемещаясь по вертикальной оси для печати нового уровня.

Непосредственную печать строительных конструкций 3D принтером можно разделить на следующие этапы:

- 1) В первую очередь подключаются все системы принтера, электропитание, комплексы автоматизации, силос и бункер со смесью, проверяется наличие компонентов, требуется визуальный осмотр подвижных механизмов как самого принтера, так и механизмов, после чего проверяется их функциональность и работоспособность системы в целом.

- 2) Осуществляем подачу всех необходимых компонентов к дозаторам для равномерного распределения состава.

3) Дозирование происходит в бетоносмесительное устройство, в которое подается вода и в течение 10 минут происходит перемешивание.

4) Из бетоносмесительной установки раствор или рабочую смесь подают в бункер шнекового насоса, откуда она поступает на печатающую головку или экструдер. Для обеспечения бесперебойности работы могут использоваться промежуточные бункеры, в каждом обязательно постоянное перемешивание смеси.

5) При помощи компьютера и специального программного комплекса MACH 3 открывается трехмерная модель конструкции.

6) Печатающая головка встает в начальную отметку, согласно программе и модели объекта. Данный комплекс готов к работе.

7) Начало экструзии или печати объекта, смесь равномерно выдавливается на поверхность, а манипулятор передвигает экструдер согласно архитектуре объекта, изображенной в виде 3D модели.

8) Для управления и сопровождения процессов работы достаточно 1-2 человек, оператор-специалист, задача которого следить за корректной работой техники и устанавливать элементы армирования в конструкцию, через определенные уровни.

Строительные 3D принтеры бывают трех видов конструкций, порталного типа, в виде козлового крана, нас же интересует новейший, но самый перспективный из них, 3D принтер манипуляторного типа. Первые два ограничены в рабочем пространстве, осложнены собственным весом, размерами, сборкой, а значит и сроками установки. Манипулятор в свою очередь очень мобилен, для его транспортировки и эксплуатации требуется пара человек. Для его установки нужен небольшой кран, в отличие от целой бригады с крупной техникой для сборки порталного принтера.

Основными средствами автоматизации аддитивных технологий в строительстве были и остаются комплексы и программное обеспечение робота. Каждый механизм должен четко выполнять свои задачи, но, другое дело, это совместная работа всех механизмов, датчиков, реле регулировок и систем

вместе. Их координация и последовательность работы должна быть четко настроена. Во время печати датчики отслеживают не только работу механизмов, но и результативность по возводимому объекту, в случае неисправности системы или конструктивного несоответствия объекта, любой неполадки должен быть запущен алгоритм оповещения оператора, для дальнейшего его вмешательства. Система должна работать корректно в такой ситуации, возможно изменив такт работы, замедлив печать либо ее приостановив до момента вмешательства специалиста.

Но, как и все созданное человеком, конструктив робота манипулятора имеет недостатки, устаревает и требует модернизации, либо доработки на момент проектирования. Принтер-манипулятор включает в себя множество датчиков, систем и механизмов, таких как электро или гидроприводы пространственного перемещения стрелы, бетоновода и систем подачи бетона, экструдера, комплексов хранения, смешивания и распределения раствора. Все они не совершенны и претерпевают изменения как с технической стороны, так и модернизируются программно. Модель экспериментального строительного манипулятора представлена на рисунке 5.



Рисунок 5 – Строительный манипулятор на гусеничном ходу

Благодаря своим характеристикам и особенностям принтер манипулятор может доукомплектовываться почти любым средством автоматизации

процессов в строительстве: системами автономного питания, с внедрением солнечных батарей, системы формирующих раствор изделий, системами обеспечения жесткости и устойчивости манипулятора. Так в качестве эксперимента одну из небольших моделей манипулятора оснастили системой гусеничного хода, благодаря чему он приобрел полную пространственную свободу и габариты возводимой им конструкции абсолютно не ограничены, нужно лишь учитывать свойства самой смеси и более точно прописывать программу печати.

### **1.3 Анализ предшествующих исследований**

В работе [1] рассмотрено " Применение 3D-печати в строительстве и перспективы ее развития". Авторы данной статьи выделяют интенсивное и неотвратимое развитие 3D-технологий, их постоянное внедрение в новые, порой неожиданные сферы деятельности человека, такие как медицина, электроника, а также во многих других отраслях. Преимуществом использования этих технологий является совокупность скорости и точности создания необходимых объектов с существенным сокращением ручного труда. Крайне важно упомянуть что подавляющее большинство самих технологий непосредственно относятся к печати объектов 3D-принтером, при помощи которого реализуется метод послойного возведения физического объекта по его цифровой 3D-модели.

Приоритетным предметом исследования авторов стала сфера строительства, а именно применения в ней технологий 3D-печати. Рассматриваются всевозможные технологии, используемые в 3D-печати, их плюсы и минусы, и конечно же перспективы их применения и совершенствования в строительной сфере, от малых объектов до больших сооружений любых архитектурных форм. Приведено описание устройства и принципа работы 3D-принтера. Определены основные виды применяемых материалов и их комбинаций, а также разновидности армирования

конструкций, применяемые при 3D-печати сооружений и зданий. В статье отражены разработки иностранных компаний, в строительстве домов методом 3D-печати. Выявлены основные трудности применения 3D-печати на практике.

В работе [2] рассмотрен "Анализ существующих технологических решений 3D-печати в строительстве". В данной статье представлены материалы международного опыта использования и реализации технологии 3D-печати в строительстве. Выполнен анализ существующих технологических решений как российских, так и иностранных организаций, таких как ApisCor, CyBe Construction, АМТ-СПЕЦАВИА, Contour Crafting Corp., Loughborough University, WinSun, MIT Media Lab и DUS Architects, Batiprint3D, BetAbram, StroyBot. Отражены преимущества и недостатки всевозможных методов послойного наращивания строительных конструкций.

Предметом исследования данной статьи стал анализ конструкций и изделий из цементобетонной смеси, произведенных методом послойной экструзии.

Целью данных исследований было выявить основные минусы и плюсы аддитивных технологий в строительстве, основываясь на сравнении особенностей печати изделий, конструкций, а также свойств материалов.

Авторами использовался целый комплекс общенаучных логических методов изучения и сравнения, основанных на теоретическом и практическом анализе технологических решений, отраженных в научно-технической литературе, информационных ресурсах и источниках разработчиков, а также средствах массовой информации, в том числе научных отчетах, научных статьях и патентах.

В результате были проанализированы существующие технологические нововведения 3D-печати в строительстве, представлены их преимущества и отражены недостатки, четко сформулированы проблемы развития данных технологий. Установлено, что основным материалом для 3D-печати является тяжелый мелкозернистый цементобетон, в составе которого входят следующие компоненты: заполнитель фракцией не более 4 мм в диаметре, микрофибра,

противоусадочные минеральные добавки, особую роль имеют химические добавки, пластифицирующие смесь, а также регулирование времени схватывания. Среднюю плотность таких бетонов 2100...2200 кг/м<sup>3</sup>, в то время как их прочность при сжатии составляет 25...50 Мпа. Установлено, что необходимо подбирать оптимальные реологические свойства применяемых смесей, а отсутствие способов повышения эксплуатационных свойств цементобетона не позволят расширить функциональное назначение возведенных конструкций или ограждающей несъемной опалубки. Соответственно реализация в полной мере потенциала 3D-печати на данный момент затруднена. В качестве модернизации и оптимизации технологии требуется сформулировать общие требования и нормы, предъявляемые к материалам для осуществления 3D-печати из цементобетона и разработке универсальных рецептурных решений, которые позволят одновременно регулировать вязкость и текучесть смеси в процессе экструзии, а впоследствии также формировать требуемые консистенцию, физико-механические и эксплуатационные свойства.

В работе [3] рассмотрено "Отработка рабочих параметров строительного 3d-принтера". В данной статье проведены исследования и последующая модернизация существующих 3D-технологий, используемых в строительстве. Выделено значение развития аддитивных технологий в строительной промышленности, перспективы их применения, а также влияние растущей тенденции на традиционные способы строительства и возведения конструкций, зданий и сооружений. В статье отражены основные три конструкции 3D принтера, используемого в строительстве: принтер портального типа, кранового типа и манипулятора. Принтеры портального типа маломобильны, тяжелы и громоздки, для их установки помимо квалифицированного персонала требуется достаточно много времени и сил, как физических, так и механических. В этом плане опережает конкурентов принтер манипулятор, компактный и универсальный.

Целью исследования стала отработка рабочих параметров. Путем

математических расчетов, подбором необходимых компонентов, совершенствование их параметров и совокупной работы всех агрегатов, а также, подобрав подходящую компонентную смесь для экструзии, удается привести коэффициент полезного действия агрегата к его максимально возможному максимуму, что в свою очередь приводит к снижению эксплуатационных затрат на возведение удельной единицы готовой продукции. Данные исследования ведут к сокращению стоимости 1 м<sup>3</sup> сооружений и стоимости всей стройки в целом.

В работе [4] рассмотрено "Современные строительные аддитивные технологии". В статье выполнен наглядный обзор существующих строительных 3D-принтеров. Автор предоставил краткое описание отдельных моделей в процессе печати конкретных жилых объектов. Выделяется, что с применением аддитивных технологий индустриализация строительного производства переходит в новую эру. Приведены традиционные характеристики и показатели, которые сравниваются для оценки экологичности и эффективности аддитивных строительных технологий.

Передовые технологии компании WinSun открывают двери в новую эру в области архитектурных проектов, дизайна. Строительная 3D-печать объединяет воедино производство, системы интеллектуального оборудования и электронику, новейшие разработки, позволяет интегрировать приложения в систему инноваций. Конструкции, возводимые 3D-принтером, соответствуют существующим стандартам, при разработке и расчете конструктивной части.

Кроме Китая, возведенные строительными 3D-принтерами объекты широко используются в России, США, ОАЭ, Филиппинах и Нидерландах, а разработкой новейших аддитивных систем заняты в таких мировых державах, как Великобритании, Испании, Франции, Словении и многих других странах.

В России самая первая быстровозводимая строительная система была приведена в действие в городе Ступино под Москвой. Использовался для этих целей 3D-принтер американской компании APIS COR.

При помощи электроники и систем контроля, находясь внутри здания,

принтер напечатал несущие стены и перегородки, после чего был извлечен краном.

В настоящее время с применением аддитивной технологии в основном строятся быстровозводимые системы малой и средней размерности и этажности. Однако, данная технология обладает преимуществом в быстрой адаптации к возведению многоэтажных, высотных, сложных конструкций и зданий.

В работе [5] рассмотрено "Возведение зданий с помощью контурного строительства". В данной статье авторами исследована революционная технология 3D-печати, а именно «Контурное строительство» (англ. ContourCrafting). Технология трехмерной печати по праву является инновационной в строительстве. Технологические, конструктивные и эксплуатационные качества реализуемой продукции сохраняются, позволяя автоматизировать самый трудоемкий этап строительства, а именно возведение ограждающих и несущих конструкций, устройство инженерных сетей и, потенциально, ведение отделочных работ. Упорно развивает эту технологию доктор Бихраз Хошнивес из Университета Северной Калифорнии. Изначально идея Хошнивеса заключалась в быстром и дешевом строительстве жилья в бедных районах, чтобы эти дома заменили стоящие развалины. Скорость возведения дома, причем, без ручного труда, с помощью этой технологии равна 24 часа. По своей идее, данная система работает по принципу масштабного применения сути 3D-принтера.

Разработка Анроко Дано система контурного строительства под названием D-Share стала первой из наиболее успешных. Ключевой особенностью стала возможность возводить здания без участия человека. Материальная часть подверглась существенным изменениям, разработана уникальная технология преобразования песка в минерал, со свойствами, превосходящими портландцемент. Конечный материал приобрел микрокристаллические соединения и связи.

Существует аргументированное мнение что свойства материала обладают



такой прочностью что он не требует армирования. Строительство с применением данной технологии ускоряет процесс в несколько раз по сравнению с распространенными методами.

Но, как и везде, есть и недостатки, которые требуется доработать, в первую очередь это проблема использования данной технологии в многоэтажном высотном строительстве, а именно, армирования стен, а потом уже затруднения в возведении перегородок и кровель на холмистом участке земли.

В работе [6] рассмотрено "Развитие технологии трехмерной печати в области строительства". В данной статье упоминают об относительно новой технологии возведения зданий и сооружений, а именно строительство при помощи трехмерной печати. Целью данной работы стало рассказать о принципах работы существующих 3D-принтеров, о удобстве и возможностях эксплуатации такого рода техники на рабочей площадке, а также о достигнутых вершин в этой области. Приведена информация о наиболее передовых в мире организациях, занимающихся разработками в сфере строительной трехмерной печати. Отражены основные факторы, способствующие и тормозящие инновации в индустрии трехмерной печати. В заключении сделан вывод о перспективах развития данной промышленности в будущем.

Аддитивным называют принцип возведения конструкции, формы или фигуры при помощи послойного наращивания. Перед этим необходимо изобразить объект в виде компьютерной модели. Для проектирования таких объектов существует множество графических редакторов и CAD-систем, к примеру, SolidWorks, 3D StudioMax, также существует прибор для сканирования существующих объектов и автоматического создания проекта. Комплекс программ включает разделение модели на слои и рассчитывает путь принтера для последовательного нанесения слоев и формирования конструкций. После установки принтера на рабочее место, его калибровки и подключения систем снабжения, принтер начинает работу и послойно возводит объект. Он перемещает экструдер в системе горизонтальных координат,

выдавливая слой за слоем в соответствии с моделью. По завершению слоя, система поднимается по вертикальной оси на проектную отметку следующего слоя.

На сегодня отрасль производства имеет наибольшую заинтересованность в подобных технологиях. Повсеместное применение реализовано в изготовлении простых изделий на полимерной основе, например, пластиковой посуды, предметов интерьера, игрушек. Все же, и в строительной сфере в настоящий момент стоит вопрос внедрения трехмерной печати в традиционные технологии возведения зданий и сооружений. Способствуют этому ряд следующих причин:

1) Во-первых, глобальный рост и ускорение всех человеческих сфер жизнедеятельности упреждает строительную отрасль существенно сократить сроки возведения зданий и сооружений;

2) Во-вторых, огромный рост населения земли приводит к постоянной потребности в увеличении количества жилья;

3) В-третьих, существующие технологии строительства по ряду причин требуют больших затрат как денежных, так и ручного труда.

В заключение автор доводит, что 3D печать уже заняла определенную нишу в строительной отрасли. Необходимо отметить, что дальнейшее развитие осложняется целым рядом факторов, основным является несостоятельность 3D-технологии для работы в агрессивной окружающей среде. Эта несостоятельность проявляется в неспособности работать в условиях сильного перепада температур, повышенной влажности или при большой скорости ветра. Также на данный момент, не решенной проблемой стали размеры возможных построек, ограниченных в силу размеров самого принтера. Регулярно многие компании по всему миру ведут работы по решению данных проблем. Возможно, со временем произойдет необходимая трансформация, и традиционные способы отойдут на второй план по сравнению с новым технологичным решением.

В работе [7] рассмотрено "Robotics and automated systems in construction:

Understanding industry-specific challenges for adoption". Авторами данной статьи ставится вопрос трудностей внедрения автоматизированных и роботизированных технологий в строительство.

Строительная отрасль является одной из важнейших отраслей экономики во всем мире. Расходы на строительство составляют от 9% до 15% ВВП в большинстве стран; и до половины национальных инвестиций может быть направлено на строительство окружающей среды. Несмотря на огромное экономическое значение, строительная отрасль страдает от неэффективности. Производительность труда во многих отраслях неуклонно росла в течение последних пяти десятилетий, однако производительность труда в строительной отрасли практически не увеличилась, а может быть, даже снизилась.

Робототехника и автоматизированные системы обладают потенциалом революционизировать и обеспечить множество преимуществ строительной отрасли и области архитектуры, инжиниринга и строительства в целом. Строительство – это трудоемкий сектор. Роботизированные системы и автоматизация оказались очень эффективными в других секторах для снижения затрат на рабочую силу при одновременном повышении производительности и качества. Кроме того, роботизированные системы могут снизить травматизм и освободить работников от выполнения опасных задач. Многие утверждают, что традиционные методы строительства достигли своих пределов и что технологии автоматизации и робототехники обладают потенциалом для решения проблем производительности строительной отрасли.

Это исследование направлено на то, чтобы покрыть этот пробел систематическим исследованием отраслевых проблем внедрения робототехники в строительной отрасли. Целями данного исследования являются:

- 1) Определить, классифицировать и ранжировать наиболее важные проблемы, ограничивающие внедрение робототехники в строительной отрасли.
- 2) Понять ожидания заинтересованных сторон относительно внедрения робототехники в строительную отрасль.

В работе [8] рассмотрена "Аддитивная технология возведения зданий и сооружений с применением строительного 3D-принтера". Постановка задачи. Новые технологии постоянно внедряются буквально в каждую отрасль жизнедеятельности человека, однако отрасль строительного производства, на сегодняшний день отличается высокими материальными затратами и является наименее автоматизированной. «Постепенный отказ от некоторых классических технологий возведения зданий к аддитивным при помощи строительной 3D-печати может решить проблему». В наше время повсеместно строительные 3D-принтеры внедряются в строительное производство среди мировых экономических и промышленных лидеров Китая, Нидерландах, США. «На фоне стремительно развивающихся в этой сфере стран, Россия не отстает и на сегодняшний день имеет целый спектр организаций, разрабатывающих и выпускающих свою продукцию 3D-принтеров». Такие производства как ООО «ApisCor», г. Москва, ООО «СпецАвта», г. Ярославль. Результаты. В статье приводится анализ аддитивной технологии строительства конструкций, сооружений и зданий. Рассмотрены периоды развития, методы 3D-печати и разновидности строительных 3D-принтеров. Дано краткое описание существующих ограждающих конструкций и применяемых материалов. Выводы. «Преимущества для строительной отрасли отражены в анализе достоинств и недостатков аддитивной технологии возведения зданий и сооружений, а также выявление возможностей технологий в будущем».

В работе [9] рассмотрено "Моделирование динамики строительных манипуляторов". Авторы разработали математическую модель динамики строительного робота с прямоугольной системой координат в режиме работы с грузом. Были составлены дифференциальные уравнения, где применили принцип Лагранжа-Даламбера. Путем расчета динамической модели принтера осуществили вычисление усилия, прикладываемого подъемным механизмом, зависимости перемещения, скорости и ускорения элементов конструкции робота ко времени. Все полученные параметры отражены графически. Составлена имитационная модель в программном комплексе

MATLAB/Simulink. Приведены результаты и выводы моделирования динамики для конкретного устройства. Отображена подробная расчетная схема с выделением всех зависимых элементов. Результаты работы являются этапом научных исследований в области автоматизации и роботизации строительных процессов, они позволили механизировать и цифровизировать управление технологическими процессами и машинами в строительстве.

В работе [10] рассмотрена "Технологии будущего в строительстве: 3D-печать". Авторы статьи выделяют что в настоящее время актуальной темой является применение в строительстве современных технологий, с возможностью энергосбережения, повышенной надежностью, экономически выгодных. В строительстве они открывают возможность обеспечивать все современные требования. Одна из новоиспеченных и недооцененных в настоящее время технологий - это 3D-печать.

Современные технологии в сфере строительства активно растут. Коллаборация строительной промышленности с компьютерными технологиями формируется довольно давно и очень тесно. Польза от нее очевидна для специалистов всевозможных областей. Во всем мире давно применяются комплексы средств виртуального моделирования и проектирования объектов, при помощи которых представляется возможным с высочайшей точностью разрабатывать архитектурные проекты и дизайнерские любой сложности. Возможности новых технологий на этом не останавливаются.

Даже при очевидных недостатках этой технологии строительства, опытные специалисты отмечают потенциал этого направления. Как правило, при сравнении с традиционной ручной силой, возможности такого оборудования оказываются на порядок лучше. Огромное количество положительных качеств предлагает эта технология своему обладателю. А благодаря технической составляющей появляется огромное поле для исследований по доработке. Таким образом, экономичность, экологическая составляющая, итоговая скорость построения объектов, надежность и долговечность, а также многие другие факторы, закладывающие качество

недвижимости, реализуемой при помощи 3D-печати, играют в пользу дальнейшего развития данного технологического новшества в сфере строительства.

В работе [11] рассмотрено "Целесообразность 3D печати в малоэтажном строительстве". Автор данной статьи ставит вопрос разнообразия способов построения малоэтажных зданий, эффективности применения строительного принтера с экономической точки зрения, проводит сравнение и анализ упомянутой и близких к ней технологий для подведения итогов, касательных рациональности использования. Для наглядного сравнения была рассчитана стоимость трех способов строительства. Сравнивались монолитное возведение, заливка несъемной опалубки фирмы «Velox» и интересующий нас метод применение несъемной опалубки с использованием строительного и интересующий нас метод применение несъемной опалубки с использованием строительного 3D принтера. Для достоверности итогов ко всем технологиям применялись равные требования и заданы одинаковые параметры. Сравнение производилось по выходным данным трудозатрат и общей стоимости возведения. В статье использованы аналитические расчеты с учетом необходимых коэффициентов и графические материалы обработанных данных, в конце с помощью таблицы отображены результаты сравнительного анализа. Исходя из сравнения объема трудозатрат и стоимости лидером по рациональности использования, эффективности и экономичности стала технология 3D-печати, на втором месте уверенно держится монолитное строительство, а технология возведения зданий с применением несъемной опалубки от одноименной фирмы, в рамках данного строительства, стала самой не эффективный и экономически не выгодной, при наибольшей величине трудозатрат.

В работе [12] рассмотрено "Совершенствование 3D принтера для производства строительных конструкций". Долгожданные инновации в области технологии строительного производства уже ждут своего применения, а на практике могут кардинально изменить взгляды специалистов на традиционные

методы строительства конструкций и зданий. Применение данных технологий избавляет от множества проблем в строительном производстве. Использование 3D-технологии на основе 3D-принтера лидирует на рынке среди подобных технологий. Самыми эффективными являются устройства манипуляторного типа, благодаря своей мобильности и компактности, соответственно они гораздо более универсальны. Печатать внутри и снаружи объекта не сыграет существенно разницы, стоит лишь учитывать параметры и условия работы. Аппараты способны составлять комбинации и работать совместно в виде бригад по захваткам. В процессе исследования авторы использовали динамическую модель 3D принтера для моделирования процессов виброформования строительных изделий, а сами процессы описали системой дифференциальных уравнений. Обработаны данные моделирования процесса по достижению смеси максимальной плотности. Совершенствование системы бункера заключалось в минимизации колебаний, уменьшение амплитуды колебаний системы при помощи демпфирующих и амортизирующих элементов, также путем регулировки всех возможных параметров, влияющих на динамическую нагруженность, таких как массы, частоты, жесткость, время работы.

По итогам работ моделирования виброформовочных процессов амплитуда колебаний существенно снизилась до величин в пределах от 0,9 до 3,0 мм, а плотность смеси стабилизировалась до значений от 1800 до 3000 кг/м<sup>3</sup> и вязкости смеси 200 Па/с. В результате не выявлены значимые отличия величины амплитуды колебаний в вертикальной и горизонтальной плоскостях нет. Ускорение элементов системы происходит в диапазоне от 0,2 до 3,0 м/с<sup>2</sup>. Ускорения в вертикальной плоскости превышают ускорения, действующие в горизонтальной.

В работе [13] рассмотрено "Моделирование конструкции для печати на строительном 3D принтере". В данной статье рассматривается ИТ-составляющая аддитивных технологий в строительстве. За последние несколько лет аддитивная технология вырвалась в лидеры среди самых стремительно

развивающихся отраслей. Уникальность ее состоит в том, что использование 3D принтера позволяет печатать объект почти что любого размера во многих отраслях промышленности. Вне зависимости от возраста и зрелости данной технологии, становится всё больше желающих применить столь современную технологию в строительстве. В конечном итоге 3D печать создает готовые изделия различных геометрических форм с минимальными материальными и временными затратами. Даже сейчас 3D моделирование уже актуальной является новинкой, которая с каждым днем набирает популярность в различных сферах деятельности. В настоящий момент ставят задачи подбора подходящих по свойствам составов для строительной 3D печати при использовании техногенного сырья и осуществления контроля качества во время строительства зданий, сооружений и крупных транспортных коммуникаций. Моделирование конструкции для дальнейшей печати на строительном 3D принтере заключается в отображении правильной трехмерной модели в подходящей графической системе, к примеру Компас 3D и сохранить его в специальном файле формата STL. Данная система обеспечена достаточным функционалом для выполнения работ любой сложности в абсолютно различных направлениях. Для наглядности стоит рассмотреть 3D принтер строительных изделий S-6045. Данный агрегат обеспечивает возможностями для развития множества актуальных направлений в технологии стройматериалов, архитектуре конструкций. Трехмерная печать предоставляет возможности создавать изделия, которые ранее считались чрезмерно трудными с экономической точки зрения, попросту нерентабельными. Принтер позволяет варьировать по составу бетон, в том числе используются стандартные составы, в основе которых самый обычный цемент марки 500, такой есть в свободном доступе любого строительного магазина, а также использовать минеральные добавки и возможное армирующее волокно. Вывод здесь лишь один, несмотря на все множественные преимущества у аддитивных технологий имеются существенные недоработки, которые возможно устранить со временем проведения дополнительных исследований, внедрением доработок на



основании испытаний, для массового использования аддитивных технологий в строительстве.

В работе [14] рассмотрено "Эффективность 3D принтеров в строительстве". В настоящее время строительство является единственной полностью неавтоматизированной отраслью. Вовлеченность человека очень велика во всех этапах строительного процесса, это приводит к низкому показателю производительности труда, увеличению возможных ошибок, трудозатрат, стоимости строительства проекта и вероятных рисков. 3D-печать можно отнести к лидерам наиболее развивающихся и перспективных технологий на сегодняшний день. Она недавно начала использоваться для печати строительных конструкций, квартир и домов. Актуальность данного исследования заключается в том, что использование данной технологии позволит обеспечить высокую оптимизацию рабочих процессов, снизить себестоимость строительства и риски, связанные с производственным травматизмом.

Основными преимуществами являются сокращение сроков строительства и более высокий уровень оптимизации работ. С другой стороны, невозможность использования вертикальных арматурных стержней, может рассматриваться как недостаток, так как это приводит к снижению прочности таких конструкций. 3D-принтеры требуют специальной бетонной смеси, пригодной для послойного нанесения, разработки нормативной документации и решения проблем с армированием конструкций.

Выгода во времени и затратах, без учета стоимости аренды или оборудования для строительства может составлять не более 25%. Если же рассчитывать только фундамент, то это будет около 20%. Производители принтеров заявляют об экономии общей себестоимости до 15% за счет фундаментных работ. По расчетам, экономия от этого вида работ составила 5%. Наибольшая экономия достигается при возведении стен - 18% от общей стоимости дома, в то время как производители инновационного принтера Apis-Cor утверждают, что на каркасной конструкции можно сэкономить до 25%.

Если рассматривать отдельно экономию на конкретных этапах строительства, то на фундаментных работах экономия составляет до 50% по стоимости и до 40% по срокам. Печать стен на 3D - принтере экономит до 80% затрат на этот вид работ, при этом выполняя их в три раза быстрее. В то же время создатели 3D-принтеров разрабатывают свои технологии и строительные конструкции, максимально приближенные к существующим стандартам на железобетонные изделия с точки зрения прочности, устойчивости и качества.

Судя по предлагаемым ценам на рынке строительной техники, средняя стоимость 3D-принтера может составить около двух миллионов рублей. В случае его приобретения строительной компанией для строительства коттеджного поселка или частного малоэтажного дома, то учитывая экономию на каждом объекте, принтер окупает себя в срок от 6 до 8 объектов.

В работе [15] рассмотрено "Автоматизация строительства с помощью 3D технологии". В данной статье рассматриваются способы автоматизации строительства при помощи 3D-печати. К современной индустриализации в первую очередь ведет автоматизация производства. Пожалуй, строительство, в настоящий момент времени – это самое не автоматизированное производство. Одним из самых действенных способов решить эту задачу – чаще внедрять 3D-печать в строительство. Однако на этом пути стоят множество сложных вопросов, связанных с самой технологией возведения зданий. Основными трудностями являются применение в ней арматуры и оборудование инженерными системами. Даже сам состав рабочей смеси неоднозначен и постоянно терпит изменения. В работе отобран крупный объем данных о применяемых составах в 3D-печати строительных конструкций. Произведен состав на основе гипсоцементно-пуццоланового вяжущего, который уникален по своим свойствам водоотталкивающего материала. Огромное количество испытаний проведены по приобретению строительной смеси необходимых ей свойств для удобства печати. Результатами проведенных исследований стало то, что при добавке в строительную смесь водоредуцирующего состава и так называемого редуцируемого полимерного порошка, конечная прочность

бетона превосходит стандартную на 20%. Пористость строительной смеси сокращается вдвое, увеличение таких показателей как коррозионная стойкость и водостойкость порядка 10%, а морозостойкость около 60%. Изначально водоудерживающая добавка применялась для регулирования пластичности и вязкости смеси, что необходимо ей для достижения требуемой удобоукладываемости при печати на принтере. В условиях схожих наращиваний темпов развития аддитивных технологий, по самым дерзким заявкам 3D-принтеры очень скоро, в ближайшем будущем будут использоваться уже для возведения многоэтажек, крупных объектов и небоскребов, а подобная автоматизация процессов в строительстве сократит пропорционально и трудозатраты, и расходы.

#### **1.4 Рабочая гипотеза**

Анализ преимуществ и недостатков методов аддитивных технологий выявил наиболее востребованные направления исследований. Объектом исследования принят строительный принтер манипуляторного типа, который изображен на рисунке 6.

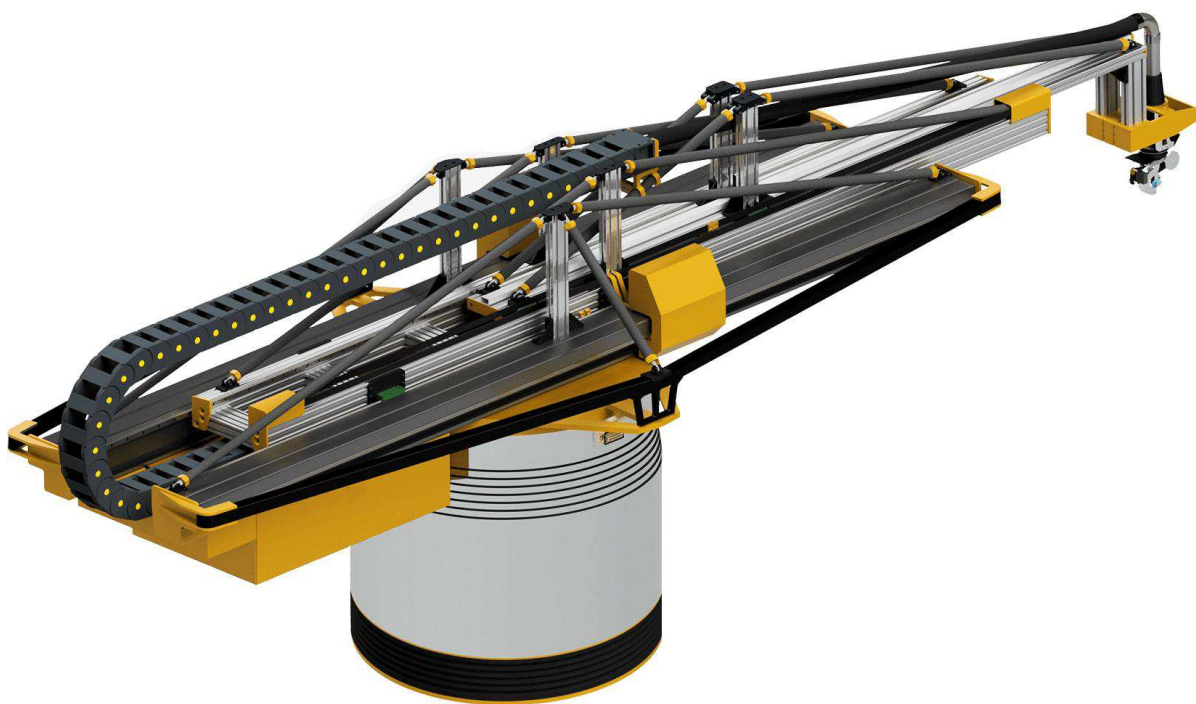


Рисунок 6 – Строительный 3D принтер манипуляторного типа

Научная гипотеза заключается в том, что совершенствование конструкции строительного принтера путем внедрения модернизированных приводов, моделирования совместной работы всех систем, а также расширение рабочих параметров экструзии, таких как скорость печати, размерность сечения слоя приведут к уменьшению удельного объема дефектов конструкций, сокращению сроков возведения объектов, увеличению экономической выгоды и общей эффективности применения аддитивной технологии в строительстве.

На основании изученного теоретического и практического материала была сформулирована цель диссертационного исследования – разработка научно-обоснованных конструктивно-технологических решений строительного принтера манипуляторного типа.

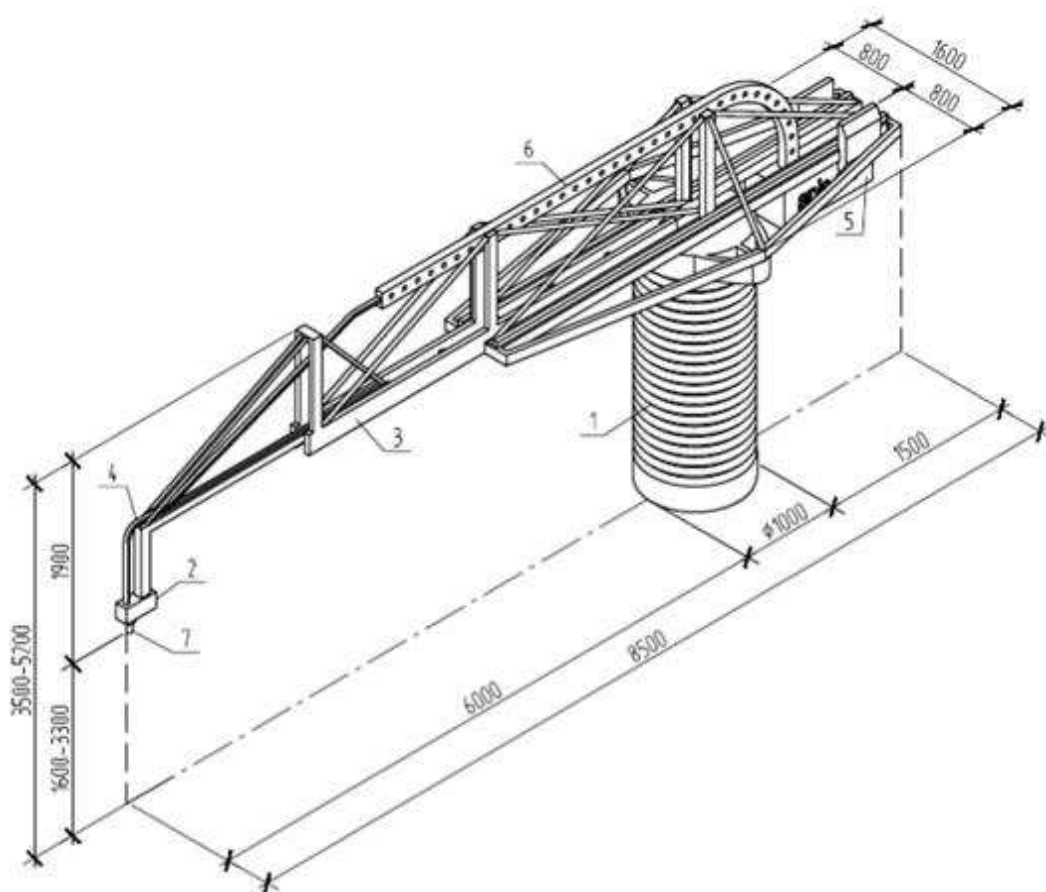
Для достижения поставленной цели сформулированы следующие задачи:

- 1) Проанализировать конструкции существующих комплексов трехмерной печати в строительстве и научные работы по теме, обоснованно выбрать предмет исследования;
- 2) Разработать математическую модель механизмов исследуемого комплекса;
- 3) Создать имитационную модель манипулятора в программной среде MATLAB/Simulink;
- 4) Разработать методику компьютерного моделирования и проведения эксперимента над объектом исследования;
- 5) Обосновать предложенные варианты совершенствования конструкции принтера и экономическую эффективность его применения.

## 2 Моделирование процессов 3D-печати строительных изделий

### 2.1 Описание объекта исследования

Мобильный 3D-принтер – самостоятельная «рабочая» единица. Умная машина, не только с удовольствием отправит на выходной целую бригаду рабочих, но и поможет вам сэкономить средства, время на уборку строительного мусора, пропадет необходимость закупки большого количества инструментов и отделки. При этом качество выполненной работы будет устраивать вас на 100 %, создатели APIS COR приложили максимум усилий, чтобы свести человеческий фактор и погрешности, которые он за собой влечет, к минимуму. Детализированная схема 3D принтера манипуляторного типа изображена на рисунке 7.



1 – подъемно-поворотная опорная часть; 2 – экструдер; 3 – маневровая стрела; 4 – бетоновод; 5 – противовес; 6 – защитный кожух бетоновода; 7 – система ультразвукового контроля раствора

Рисунок 7 – Детализированная схема 3D принтера манипуляторного типа

Конструкция строительного принтера такого типа, являет собой механическую выдвижную стрелу на поворотном механизме, закрепленную на опоре с функцией подъема. Для реализации строительной 3D печати на конце стрелы расположен экструдер с ультразвуковым датчиком. При совместной работе поворотной части и механизмов выдвижения стрелы обеспечивается перемещение печатающей головки в направлениях по, параллельным горизонту, осям X и Y. В свою очередь, после завершения цикла на одной высотной отметке, подъемно-опорная часть поднимает конструкцию на следующую, вдоль вертикальной оси Z.

В таблице 1 представлены технические характеристики строительного принтера манипуляторного типа.

Таблица 1 – Технические характеристики

Рабочая зона МАХ, м <sup>2</sup>	132
Рабочая скорость движения, м/мин	1–11
Высота подъема МАХ с одной точки, мм	3100
Точность позиционирования, мм	±0,5
Производительность, м <sup>2</sup> полезной площади в сутки	100
Скорость холостого хода X/ Y, мм/мин	19.000
Точность по оси Z, мм	0,1-0,2
Точность второстепенного позиционирования, мм	0,1–0,2
Привод по осям X / Y / Z	Сервопривод
Реверсные выключатели	Бесконтактные на всех осях
Линейные направляющие в осях X / Y	Прецизионные профильные
Автоматическая горизонтальная стабилизация	Высокоточный инклинометр с погрешностью 0.001 градус
Координаты положения печатающей головки в пространстве	Гироскоп, лазерный дальномер
Стабилизация в пространстве	ПИД регулятор

Структурно механизм разделён на несколько частей:

- 1) дорожка оси X;
- 2) дорожка оси Z;
- 3) печатающая головка;

- 4) система верхней стабилизации;
- 5) автобетононасос.

В связи с особенностью своей конструкции и механизма поворота, стрела перемещается радиально. Выдвижение стрелы и подъем конструкции осуществляется строго прямолинейно вдоль осей X и Z соответственно. Линейное перемещение печатающей головки вдоль оси Y осуществляется совместной работой механизмов выдвижения стрелы и поворота. Точность положения экструдера определяют гироскоп и лазерный дальномер. Благодаря этому возводимые конструкции могут иметь как круглые и овальные, так и прямоугольные формы.

Важным фактором является положение датчика контроля раствора. Он должен быть расположен в непосредственной близости к экструдированному соплу и, вне зависимости от движений манипулятора, находиться в следящем положении. Для этого он закреплен к соплу через подшипник, а считываемые параметры могут передаваться дистанционно через компактную плату ардуино на главный пункт управления.

Процесс печати строительных конструкций таким устройством изображен на рисунке 8.

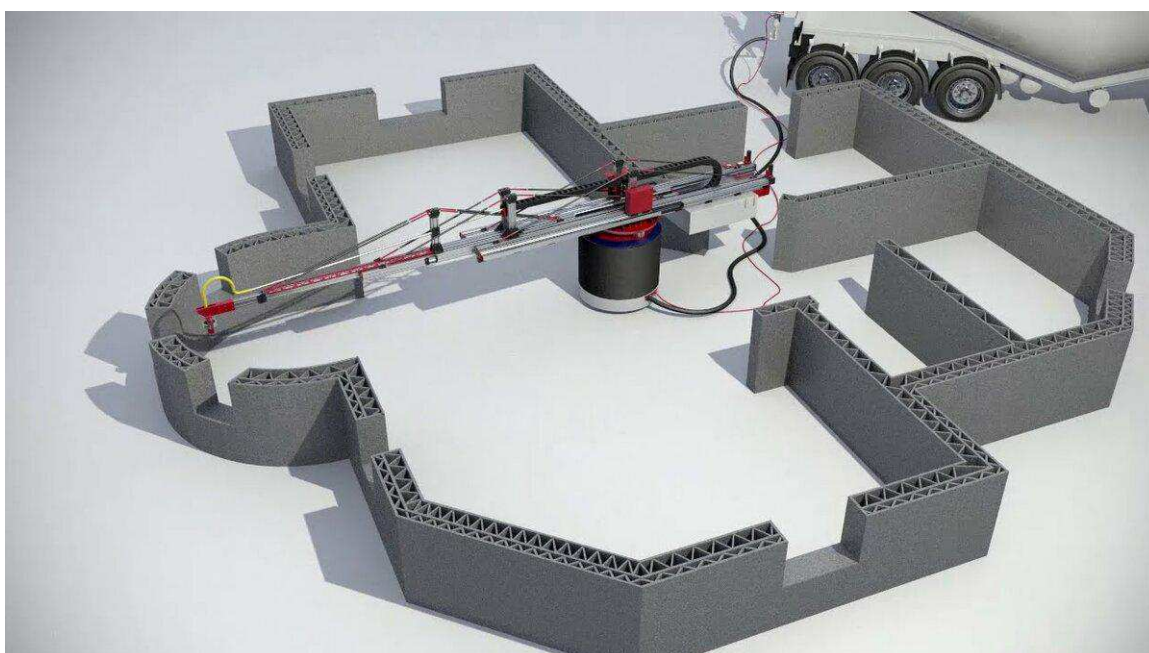


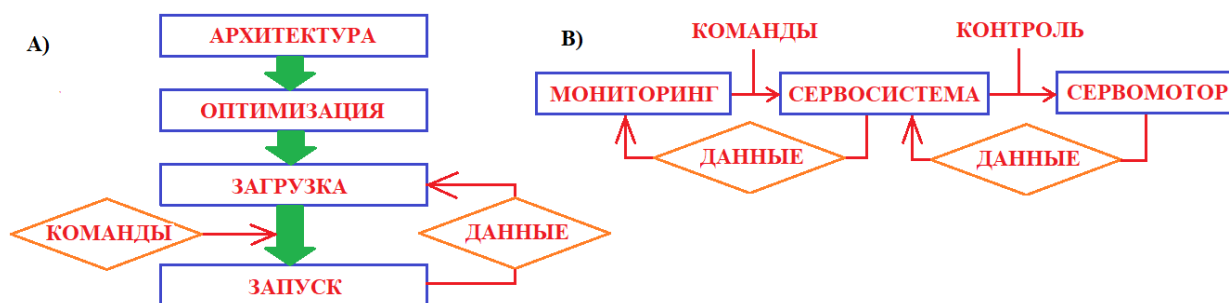
Рисунок 8 – Строительная 3D печать

Устройство строительной трёхмерной печати имеет выдвижную стрелу общей длиной 8,5 метров и вылетом 6 метров от опоры. При установке противовеса стрела выдвигается на дополнительные 2,5 метра, что увеличивает максимальную рабочую зону до 227 м². Стоит учитывать, что рабочая зона имеет форму окружности и проектируемые конструкции должны быть вписаны в эту окружность. Максимальная высота подъема опорной платформы составляет 3,1 м. Для продолжения возведения конструкций для принтера устраивается любое жесткое основание, подходит как жестко закрепленный каркас, так и конструкции перекрытия.

Таким образом, строительный трехмерный принтер-манипулятор является простым в установке устройством, способным создавать бетонные конструкции неограниченной высоты при учете их несущей способности. Независимые работа и приведение в движение строительной печатающей головки и рычага автобетононасоса.

Все механизмы оснащены датчиками положений, которые определяют взаимное расположение головки и рычага. Пока в бункере система автоматически регулирует позиционирование и подачу, бетонная смесь непрерывно поступает по системе подачи к экструдеру.

Алгоритмы процесса запуска программной системы принтера и система обратной связи сервопривода, адаптированной к программному управлению, рассмотрены пунктами А и В соответственно, на рисунке 9.



А) процесс запуска; В) обратная связь

Рисунок 9 – Алгоритмы процесса



Алгоритм процесса запуска, включает разработку архитектурного проекта, после чего компьютер послойно нарезает, а также оптимизирует путь, загружает файл в систему контроля, затем идет промежуточный этап создания команд, запуск трехмерной печати и обратной связи в режиме реального времени.

Система обратной связи, состоит из компьютерного мониторинга, системы контроля сервоприводов и непосредственно самих сервоприводов, а также цикла обмена данных и промежуточных этапов создания команд и контроля

Данная программная система имеет следующие характеристики:

1) С поступлением информации о координатах, в режиме реального времени, обратная связь устраняет явление отключения, чем помогает всей системе работать точно. Такое явление вызвано остановкой двигателя и частым высокоскоростным пуском.

2) Данные таких параметров, как скорость печати, температура двигателя, нагрузка двигателя отслеживаются благодаря системе обратной связи. Как только система обнаруживает угрозу перегрузки двигателя либо увеличивается температура, выявляется вероятность короткого замыкания, система останавливает печать немедленно. Обязательно отключается источник питания для обеспечения безопасности.

3) Вручную устанавливаются такие параметры работы строительной печати как ускорение, скорость печатающей головки, максимальная скорость работы и так далее. Максимальная возможная скорость системы составляет около 0,5 м / с, а оптимальный диапазон ускорения находится в пределах 0,05 — 0,2 м / с.

Обязательно сохраняются координаты крайнего положения в момент остановки. В случае возникновения непредвиденной ситуации, к примеру, сбоя питания, системой контроля сервоприводов немедленно сохраняется текущие координаты положения. После устранения любых неполадок техника сама выставит положение экструдера для продолжения печати.

Конфигурация рабочих органов на электронной панели управления для работы с описываемой строительной установкой трехмерной печати бетоном представлена на рисунке 10.

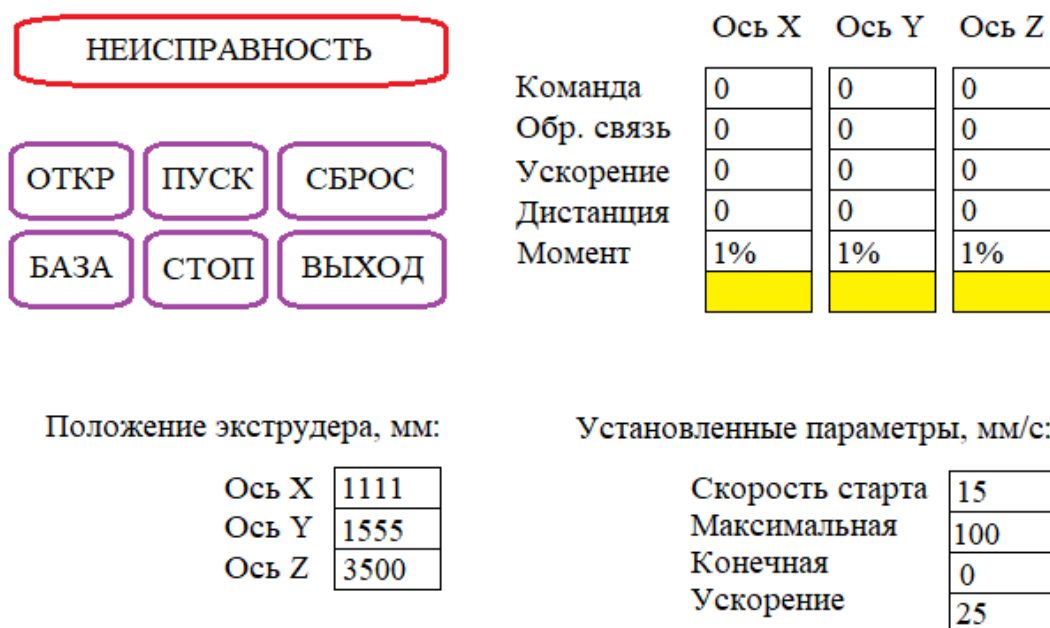


Рисунок 10 – Конфигурация рабочих органов на электронной панели управления

## 2.2 Разработка расчетной схемы

Для разработки модели 3D строительного принтера требуется проведение теоретических исследований на основе математических моделей.

Моделирование – это процесс исследования свойств объекта путем построения его модели и ее исследования. В случае математического моделирования анализ реальных процессов проводят математическими расчетами и методами. Для этого необходимо формализовать математический процесс, а значит заменить реальный объект или процесс, подлежащий исследованию его формальным описанием, в данном случае математически.

Математическая модель в конечном итоге должна представлять из себя алгебраическое выражение, а составные компоненты системы в нем выражены переменными с поведением, аналогичным реальному.

Модель может представлять собой математическое выражение, содержащее переменные, поведение которых аналогично поведению реальной системы. Под моделью понимается физический или абстрактный объект, свойства которого в определенном смысле сходны со свойствами исследуемого объекта. «При имитационном моделировании реализующий модель алгоритм воспроизводит процесс функционирования системы во времени. Имитируются элементарные явления, составляющие процесс, с сохранением их логической структуры и последовательности протекания во времени.» [20]

Требования к составлению моделей зависят от определения целей, задач исследования и применяемых средств, но существуют и общие требования, предъявляемые к моделям, такие как:

- Адекватность – визуализация свойств объекта с высокой точностью;
- Полнота – содержание достоверных составляющих в полном объеме;
- Гибкость, она должна обеспечивать возможность работы в различных ситуациях, при изменении условия и параметров в заданном диапазоне;
- Трудоемкость разработки должна быть обеспечена эффективностью, существенным результатом, а также временем и программными средствами.

Математическое моделирование выявляет закономерности поведения всевозможных явлений, процессов работы устройств и систем, при помощи алгебраического описания этих процессов и моделирования, избавляясь от нужды в натурных исследованиях. Математические законы и положения описывают модулируемые явления либо процессы устройств и систем на своего рода идеализирующем уровне.

«Основным преимуществом имитационных моделей по сравнению с аналитическими является возможность решения более сложных задач.»

Реализация дальнейшего моделирования осуществляется в программной среде MATLAB-Simulink с помощью блоков различных библиотек.

MATLAB – это интерактивная среда для программирования на высокоуровневом языке, визуализация результатов и проведения численных

расчетов. При помощи MATLAB последовательно анализируют данные, разрабатывают алгоритмы, а затем создают модели и приложения.

Среда MATLAB включает интерпретатор команд на языке высокого уровня, графическую систему, пакеты расширений и реализована на языке С.

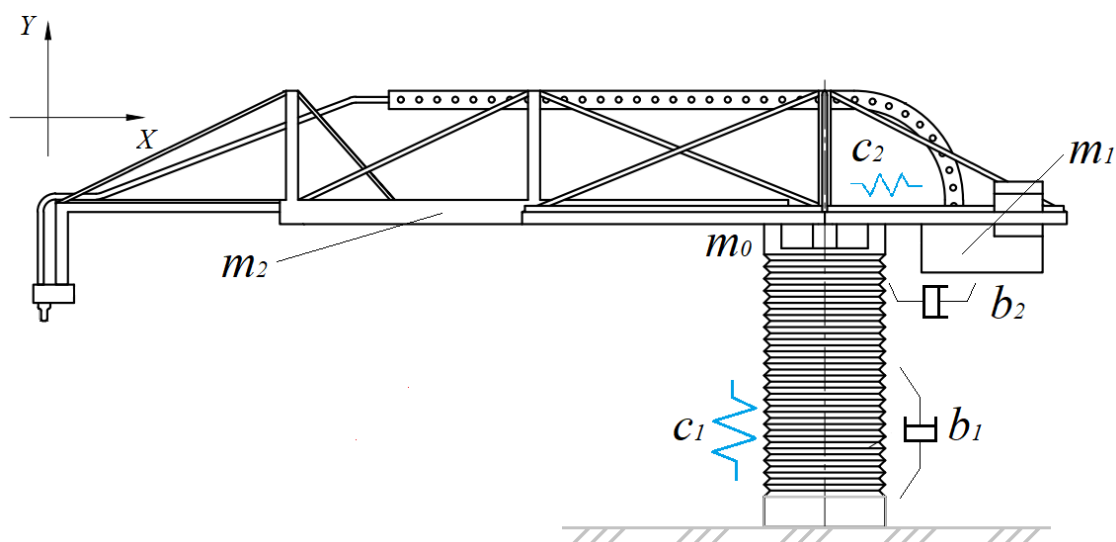
Такие инструменты среды, как язык, внедренные в систему математические функции проводят исследования и решают задачи быстрее по сравнению с разработкой электронных таблиц или же программирования на традиционных языках

Кроме всех вышеперечисленных плюсов программной среды MATLAB, пожалуй, главным является комплекс визуального программного моделирования Simulink. С его помощью моделирование реализуется наглядно, в большинстве случаев это свидетельствует о большей эффективности.

Пакет программы Simulink производит моделирование во времени, исследует поведение нелинейных динамических систем, характеристики исследуемых систем вводят в режиме диалогового окна, путем построения графической схемы соединенных элементарных, пользовательских или стандартных звеньев. Результатом соединений таких элементов в единую рабочую систему становится исследуемая модель.

Для исследования влияния основных параметров на сервопривод трехмерного строительного принтера, с учетом воздействия вибрационных нагрузок используем расчетную модель конструкции 3D принтера, которая представлена на рисунке 11 в виде отдельных блоков и связей.

Исследуемая система представляет собой раму, на которой размещены экструдер; стальной трапециевидный бункер; мотор – который приводит в движение подвижные органы оборудования, фиксаторы – датчики положения, перемещения, температуры и давления; передвижное устройство и сама система управления 3D принтером. Наиболее важными элементами принтера являются экструдер и бункер. Экструдер 3D принтера – это узел, который обеспечивает подачу рабочей смеси из бункера в рабочую зону аппарата.



$m_0$  – масса системы;  $m_1$  – масса полного бункера;  $m_2$  – масса рамы 3D принтера;  $y, x$  – перемещение системы;  $c_2$  – жесткость бункера;  $c_1$  – жесткость амортизирующей опоры;  $b_1, b_2$  – демпферы приводов

Рисунок 11 – Динамическая модель подвески строительного 3D принтера

Главное преимущество 3D-принтера заключается в его маневренности. Машина такого рода перемещает экструдер по картезианские координатам осей  $X$ ,  $Y$  и  $Z$ . Для этого конструкцию машины оснащают высокоточными электрическими приводами, которые быстро двигают печатающую головку согласно программе. Управление подобными устройствами осуществляют при помощи контроллера. Благодаря этому, во всех автоматизированных системах обеспечивается перемещение экструдера, а конструкции наращиваются слой за слоем. Ограничения движений обеспечены оптическим, либо механическим фиксаторами. Это так называемые ограничительные датчики, которые по достижению им края рабочей поверхности подают сигнал, тем самым предотвращая выход за пределы, предусмотренные проектом. Создается диапазон движения приводов. При помощи этих же приспособлений осуществляется настройки и калибровка положения принтера и его рабочих органов непосредственно перед процессом печати, таким способом достигается точность и аккуратность.

### 2.3 Математическое описание модели серводвигателя

В приводных системах роботов, достаточно распространены как магнитоэлектрические двигатели, так и модели постоянного тока с независимым возбуждением. Управление данными двигателями реализовано при помощи якорной цепи. Описываются электромеханические и электромагнитные процессы в двигателе постоянного тока с независимым возбуждением следующими уравнениями:

(1)

$$u_{я} = R_{я} \left( T_{я} \frac{di_{я}}{dt} + i_{я} \right) + e_{я},$$

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = M - M_h, \quad (2)$$

$$\omega_m = \frac{d\theta_m}{dt}, \quad (3)$$

$$e_{я} = k_E \omega_m, \quad (4)$$

$$M = k_M i_{я} \quad (5)$$

где  $u_{я}, i_{я}, e_{я}$  – напряжение, ток и противо-ЭДС якоря;

$L_{я}, R_{я}, T_{я} = \frac{L_{я}}{R_{я}}$  – индуктивность, сопротивление и электромагнитная

постоянная времени якоря;

$\omega_m, M, M_h, \theta_m$  – механическая угловая скорость, электромагнитный момент, момент нагрузки и механический угол поворота вала;

$J$  – момент инерции ротора;

коэффициенты  $k_E, k_M$  являются конструктивными постоянными.

На основе паспортных и технических данных из справочной документации рассчитываются, входящие в уравнения, параметры двигателя.

Параметры двигателей постоянного тока, малоинерционных с электромагнитным возбуждением, разработанных специально для

робототехнических комплексов приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Параметры малоинерционных двигателей постоянного тока с электромагнитным возбуждением

$P_H, кВт$	$U_{я} = U_B, В$	$n_H, 1/мин$	$I_{я}, А$	$R_{я}, Ом$	$R_B, Ом$	$J, кгм^2$
0.12	110	3000	1.53	1.48	642	0.06
0.20	110	3000	2.46	0.762	560	0.08
0.25	110	3000	3.05	0.945	827	0.14
0.37	110	3000	4.40	0.546	934	0.16
0.45	110	3000	5.60	0.585	400	0.36
1.00	110	3000	9.96	0.561	500	0.80

В таблице 2 использованы следующие обозначения:

$P_H, кВт$  – номинальная мощность двигателя, кВт;

$U_{я}, В$  – номинальное напряжение питания якоря, В;

$U_B, В$  – номинальное напряжение возбуждения, В;

$n_H, 1/мин$  – номинальная скорость вращения якоря, 1/мин;

$I_{я}, А$  – номинальный ток якоря, А;

$R_{я}, Ом$  – сопротивление обмотки якоря, Ом;

$R_B, Ом$  – сопротивление обмотки возбуждения, Ом.

Из следующих уравнений рассчитываем индуктивность якоря, конструктивные постоянные номинальный ток возбуждения и номинальный момент двигателя.

$$M_H = \frac{P_H}{\omega_H} = \frac{30P_H}{\pi n_H}, \quad (6)$$

$$I_B = \frac{U_B}{R_B}, \quad (7)$$

$$k_M = \frac{M_H}{I_{я}}, \quad (8)$$

$$k_E = \frac{30(U_{Я} - R_{Я}I_{Я})}{\pi n_H}, \quad (9)$$

$$L_{Я} \approx \frac{30}{\pi} \times \frac{U_{Я} c_X}{n_H I_{Я}} \quad (10)$$

где  $c_X = 0,3 \sim 0,4$  – эмпирический коэффициент.

Из полученных значений скоростной части ДПТ выражаем передаточные функции по управляющему и возмущающему воздействиям:

$$W(s) = \frac{\omega_m(s)}{u_{Я}(s)} = \frac{1/k_E}{\frac{T_{Я}}{K_1 K_2 k_E} s^2 + \frac{1}{K_1 K_2 k_E} s + 1}, \quad (11)$$

$$W(s) = \frac{\omega_m(s)}{M_H(s)} = \frac{\frac{(T_{Я} s + 1)}{k_E}}{\frac{T_{Я}}{K_1 K_2 k_E} s^2 + \frac{1}{K_1 K_2 k_E} s + 1}. \quad (12)$$

В выражениях (11), (12) введены обозначения:

$$K_1 = \frac{1}{R_{Я}}, K_2 = \frac{k_M}{J}. \quad (13)$$

Корни характеристического уравнения определяются выражением:

$$s_{1,2} = -\frac{1}{2T_{Я}} \pm \frac{1}{2T_{Я}} \sqrt{1 - 4T_{Я} K_1 K_2 k_E}. \quad (14)$$

Корни характеристического уравнения могут быть либо комплексно-сопряженными, либо вещественными, в зависимости от соотношения параметров  $T_{Я} K_1 K_2$  и  $k_E$ . Корни характеристического уравнения являются вещественными при выполнении условия  $4T_{Я} K_1 K_2 k_E \leq 1$ , в таком случае



передаточная эквивалентная функция двигателя постоянного тока по управляющему воздействию представляется в виде двух, последовательно включенных аperiodических звеньев первого порядка с коэффициентом передачи  $1/k_E$  и постоянными  $T_1 T_2$ .

$$W(s) = \frac{x(s)}{u_{\text{я}}(s)} = \frac{1/k_E}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)}, \quad (15)$$

где  $T_1 = -1/s_1, T_2 = -1/s_2$ .

Для определения исходных данных, к рассмотрению принят двигатель с мощностью 0,45 кВт. В таблице 3 по выражения выше рассчитаны параметры структурной схемы.

Таблица 3 – Параметры системы электрического привода робота

$K_1, 1/\text{Ом}$	$K_2, 1/\text{Амс}^2$	$k_M, \text{Нм}/\text{А}$	$k_E, \text{Вс}$	$T_{\text{я}}, \text{с}$	$T_1, \text{с}$	$T_2, \text{с}$
1.72	0.72	0.26	0.34	0.043	0.044	2.15

С применением программы Simulink получена имитационная модель электрического двигателя, рисунок 12.

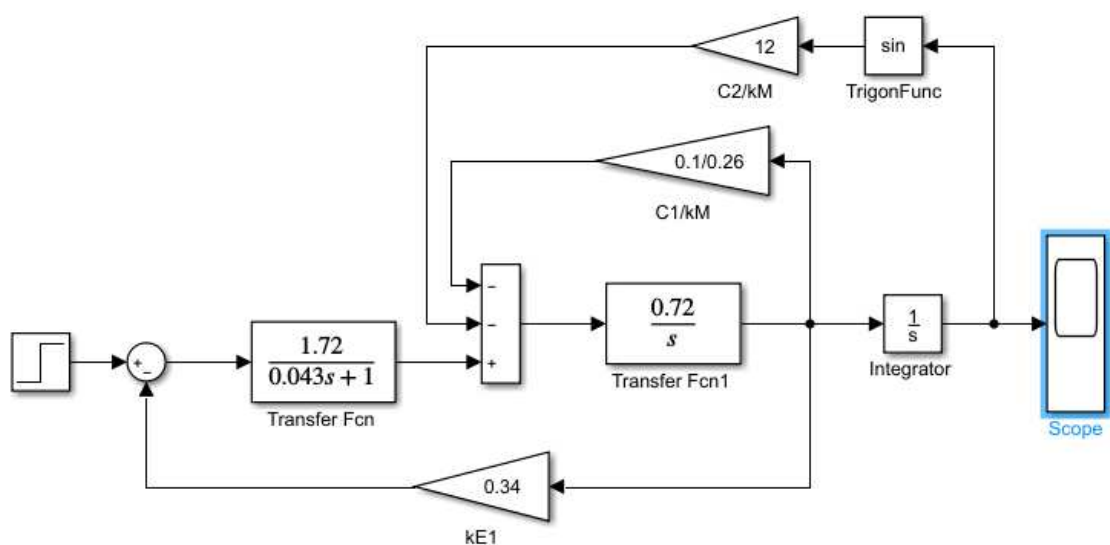


Рисунок 12 – Имитационная модель электрического двигателя

На рисунке 13 приведен график осциллографа имитационной модели электрического двигателя.

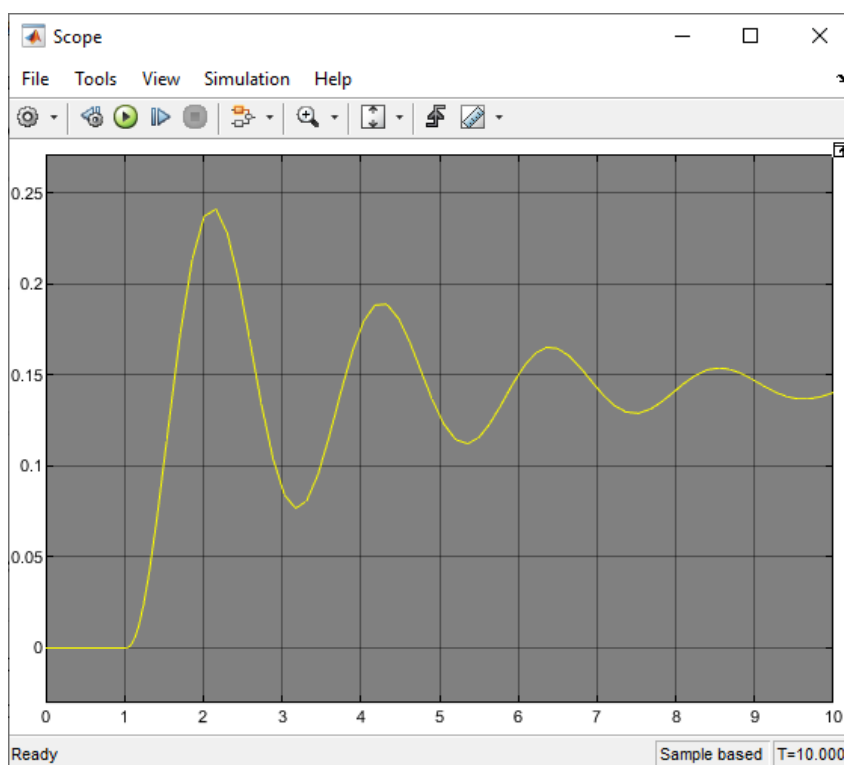


Рисунок 13 – Осциллограмма Simulink модели двигателя

Пакет расширения Control System программы Simulink применялся для получения динамических характеристик. Динамика по управлению изображена на рисунке 14.

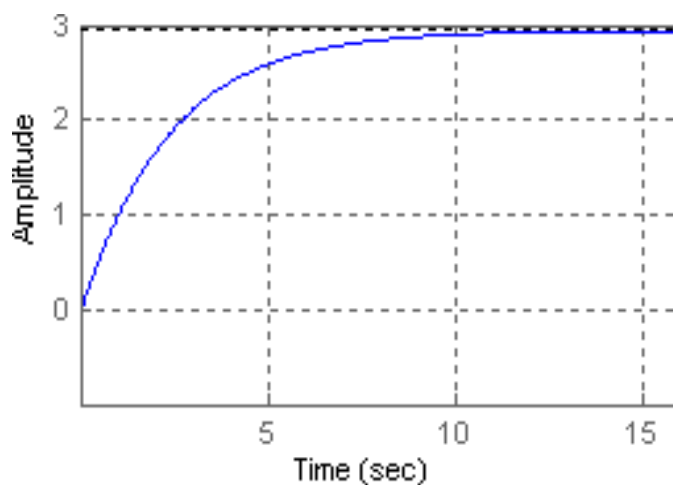


Рисунок 14 – Динамическая характеристика ДПТ по управлению

Задающим входным сигналом стало напряжение 1В, что является эталонным. На рисунке 15 изображена динамическая характеристика по возмущению.

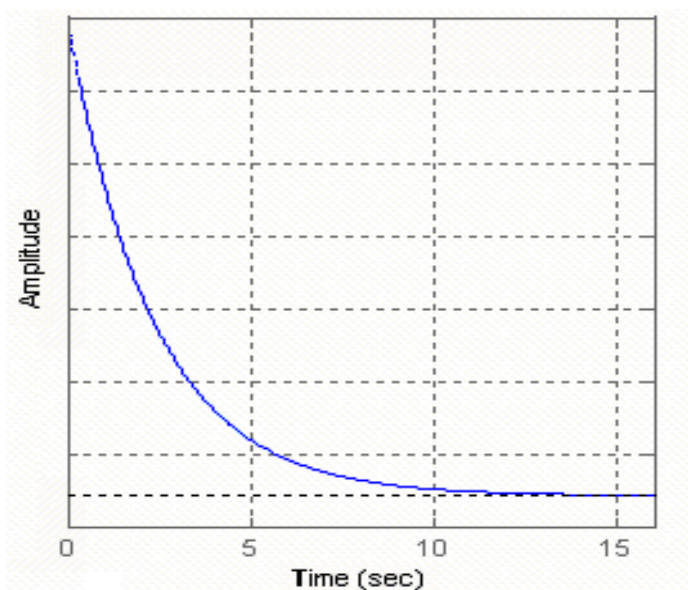


Рисунок 15 – Динамическая характеристика ДПТ по возмущению

Данными графиками наглядно отражается, что по управлению и возмущению ДПТ с данными параметрами системы представляет собой апериодическое звено. Коэффициент передачи по управлению меньше, более чем в 2 раза, по сравнению с возмущением.

Для обеспечения системы требуемыми свойствами необходимо спроектировать внедрение или синтезировать регулятор в динамическую систему. Структура регулятора зависит от требований к контуру скорости и параметров двигателя постоянного тока.

## 2.4 Создание имитационной модели в программе MATLAB/SIMULINK

Simulink-модель поведения подвески привода 3D строительного принтера при воздействии вибрационных нагрузок его программная реализация выполнена в среде MATLAB&Simulink с помощью блоков стандартной библиотеки и библиотек SimMechanics, Simulink 3D-Animation. Связь

имитационной и виртуальной моделей, а также оживление виртуальной модели реализуется с помощью блоков библиотеки Simulink 3D-Animation, что отображено на рисунке 16. Принятые обозначения соответствуют переменным, используемым для описания математической модели 3D принтера.

Сначала сформируем подсистемы определения индивидуальных свойств оборудования и рабочей смеси. Подсистема для определения OutZ1:

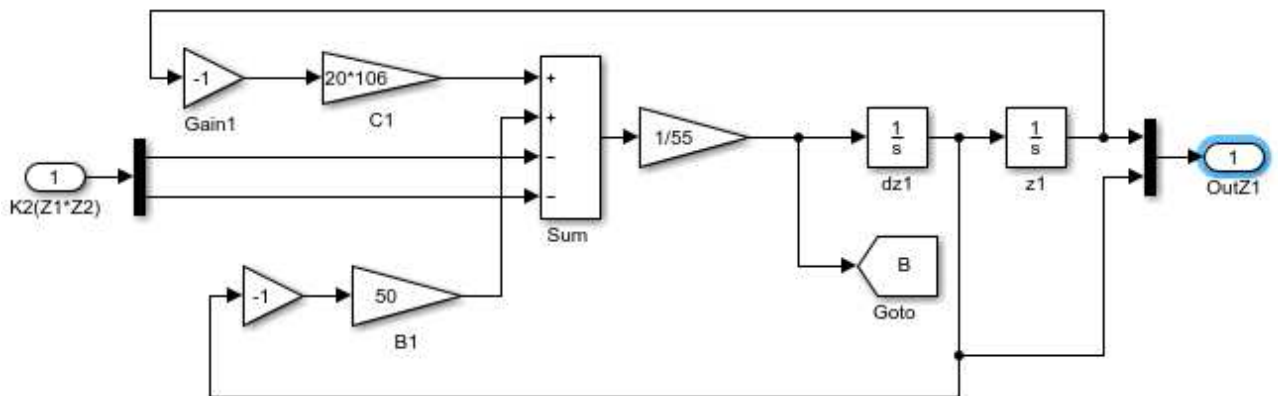


Рисунок 16 – Подсистема, описывающая колебания рабочей смеси в бункере

OutZ1 имеет один вход, один выход и содержит следующие блоки:

1) 5 блоков Gain. Gain – это блок усилителя, который умножает постоянный коэффициент на входной сигнал. Способ выполнения операции определяется параметрами блоков, значение параметра выбирается из предложенного списка, в нашем случае это поэлементный Element-wise  $K*u$ . Масса рабочей смеси (B1) составляет 50 Нс/м. Коэффициент жесткости смеси (C1) составляет  $20*10^6$  н/м и  $60*10^6$  Н/м для каждой смеси соответственно.

2) 1 блок Sum. Sum – блок сумматора, вычисляющий алгебраические суммы текущих значений входных сигналов. Блок имеет 4 входа и один выход, который суммирует входные значения жесткости и демпфирования рабочей смеси.

3) 2 блока Integrator. Integrator – предназначен для интегрирования входного сигнала. Для блоков были выбраны следующие параметры:

- внешний сброс не выполняется;

- источник начального значения выходного сигнала внутренних.

4) 1 блок Outport. Outport – выходной порт, который создает порт для подсистемы.

5) 1 блок Import. Import – входной порт, создает вход для подсистемы.

6) 1 блок Mux. Mux – мультиплексор, объединяет входные сигналы в вектор.

7) 1 блок Demux. Demux – демультимплексор, позволяет «разбить» векторный сигнал на несколько скалярных, в параметрах задаем число выходов равное 1.

Соответствующее значение функции  $Z1$  является выходом подсистемы OutZ1.

Подсистема для определения  $K2(Z1*Z2)$  и OutZ2 представлена на рисунке 19.

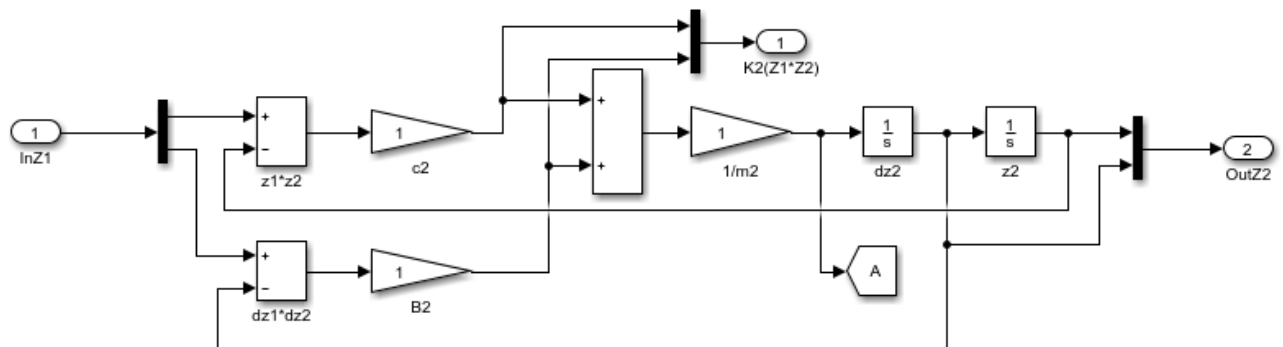


Рисунок 19 – Подсистема, описывающая колебания рамы 3D принтера

Подсистема имеет один вход, два выхода и содержит следующие блоки:

1) 3 блока Gain. В параметрах блоков определен способ выполнения операции, значение параметра которого выбрано из предложенного списка: Element-wise  $K*u$  – поэлементный. Масса принтера ( $m2$ ) составляет 300кг. Демпфирование оборудования ( $B2$ ) составляет 90 Нс/м. Коэффициент жесткости подвески ( $C2$ ) составляет 200 Н/м.

2) 3 блока Sum. Каждый блок имеет по 2 входа и по одному выходу.

3) 2 блока integrator. Блоков были выбраны следующие параметры:

- внешний сброс не выполняется;

- источник начального значения выходного сигнала внутренний

4) 2 блока Output.

5) 1 блок Import.

6) 1 блок Mux.

7) 2 блока Demux.

Соответствующее значение функции  $Z1$  является выходом  $OutZ2$ .

Сформируем окончательный вид модели поведения привода трехмерного строительного принтера, во время воздействия вибрационных нагрузок. Simulink-модель 3D строительного принтера представлена на рисунке 17.

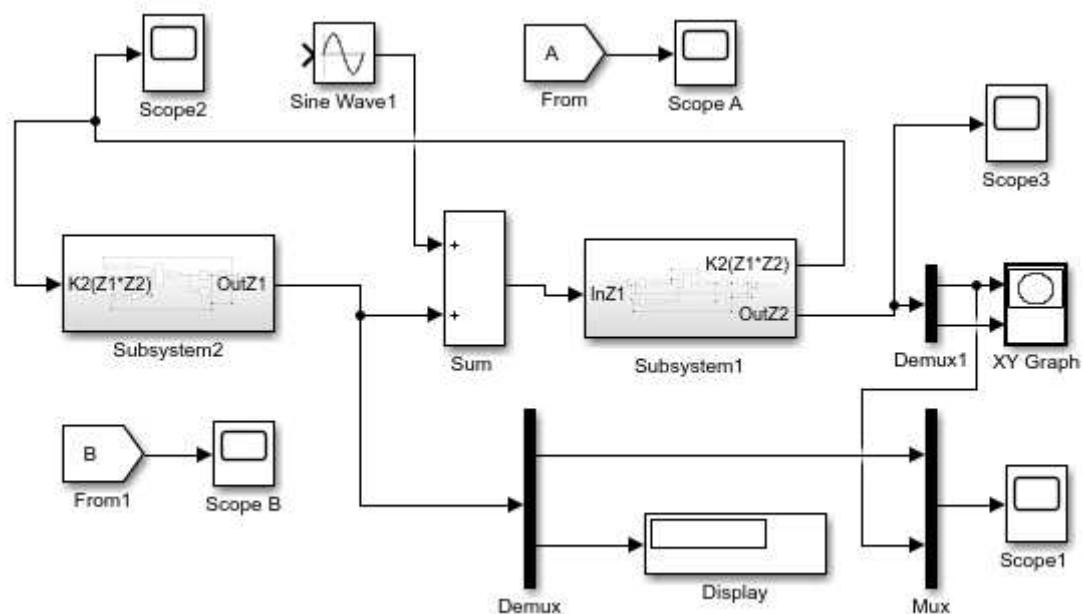


Рисунок 17 – Simulink-модель 3D строительного принтера

Система состоит из следующих блоков:

1) 2 блока подсистем. Subsystem – это фрагмент Simulink-модели, который оформляется в отдельный блок. Подсистемы необходимы и используются для решения следующих задач:

- облегчает восприятие модели, уменьшая количество одновременно отображаемых на экране блоков;

- с их помощью крупные, отдельные фрагменты модели оформляются в

единый блок, что повышает эффективность работы с моделью;

- возможность создания собственных библиотек и архивов;
- синхронизация параллельно работающих подсистем;
- включение в модель собственных справочных средств;
- обеспечение связи подсистемы и М-файла, таким образом запуск этого

файла происходит при открытии подсистемы.

Subsystem1 – подсистема OutZ1, Subsystem2 – подсистема OutZ2.

2) 1 блок Sine Wave. Им формируется синусоидальный сигнал заданной амплитуды, частоты, смещения и фазы, связан с сумматором и стандартным блоком выхода Scope, на который он подает вектор выходных величин. Амплитуда задана формулой  $m_0 \cdot r_0 \cdot (2 \cdot \pi \cdot f_0)^2$ , а частота воздействия (рад/сек) задана выражением  $2 \cdot \pi \cdot f_0$ . Способ формирования сигнала выбран по текущему времени.

3) 1 блок Mux. Объединяет в вектор выходные значения подсистем и подает на блок выхода Scope.

4) 2 блока Demux.

5) 1 блок Display. На цифровом дисплее отображается сигнал в виде числового значения. Отображения данных принимает многозначный формат, включая десятичную точку. Для создания XYplot были заданы значения диапазонов  $x_{min}=0$ ,  $x_{max}=0,1$ ,  $y_{min}=-0,5$ ,  $y_{max}=0,5$ . Время обработки задано 0,01.

6) 5 стандартных блоков Scope. Scope – блок осциллографа. Строит графики исследуемых сигналов как функций времени. Каждая из построенных характеристик полностью и однозначно определяет рассматриваемую систему.

Ни одна реальная система автоматического управления не является строго линейной, а линейные уравнения САУ получают на основании специальной процедуры – линеаризации.

Графики с осциллографов 1, 2, 3, А и В изображены на рисунках 18-22 соответственно.

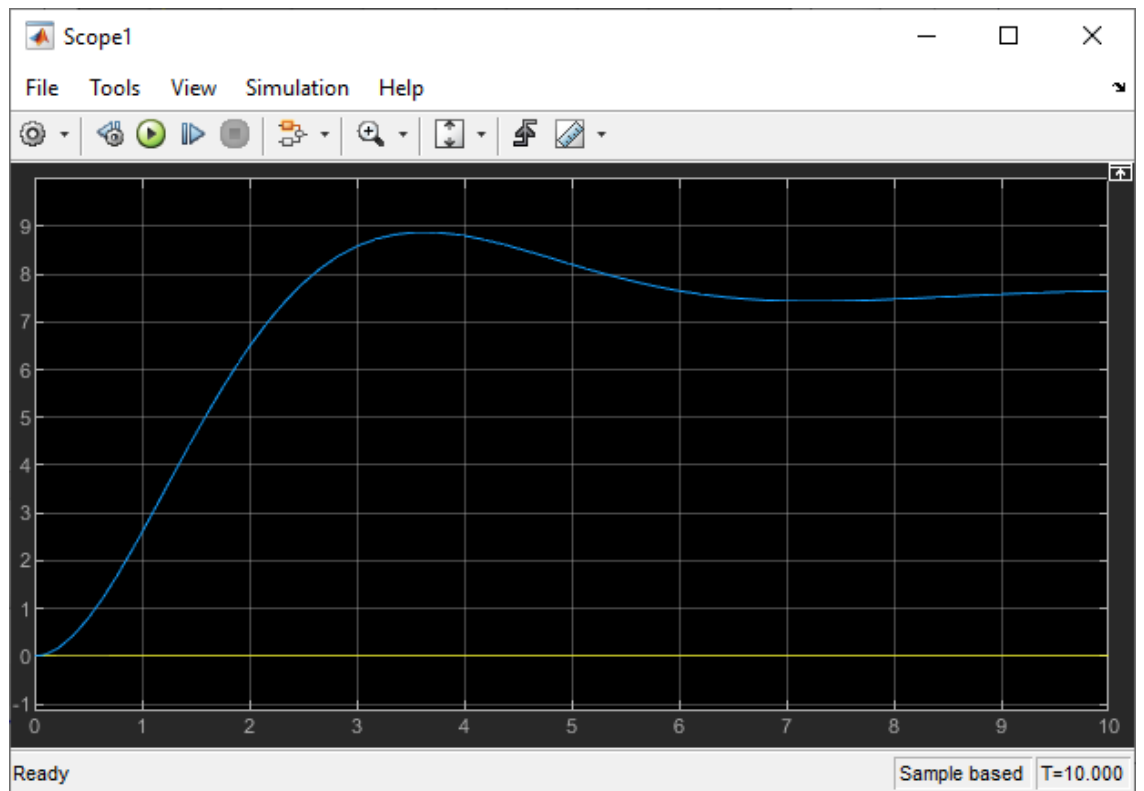


Рисунок 18 – График функции Scope1

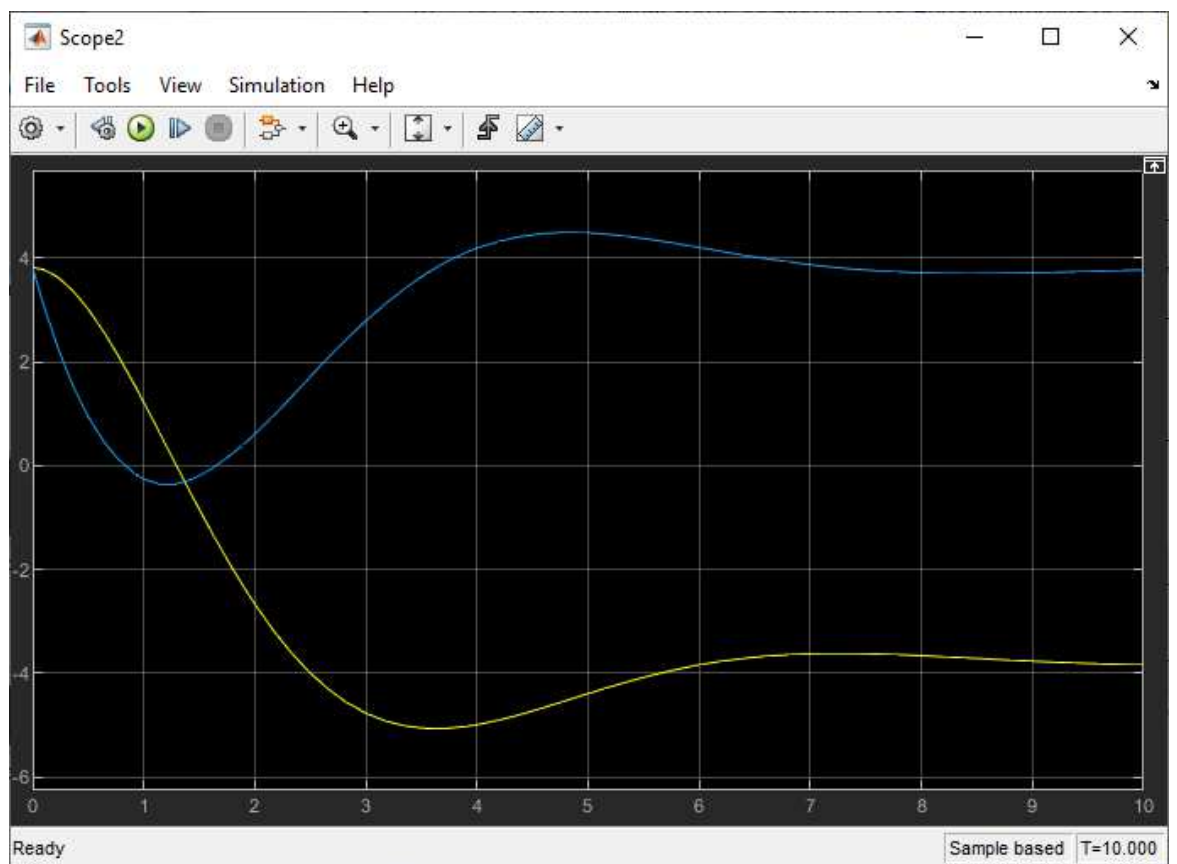


Рисунок 19 – График функции Scope2



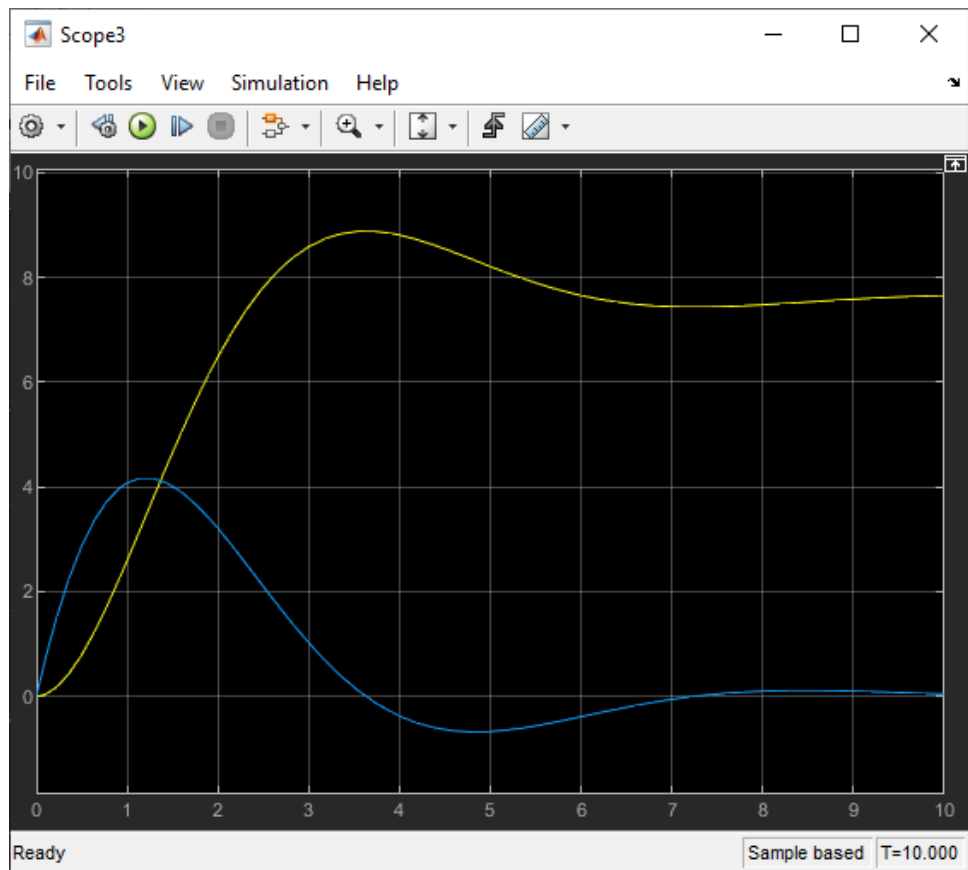


Рисунок 20 – График функции Scope3

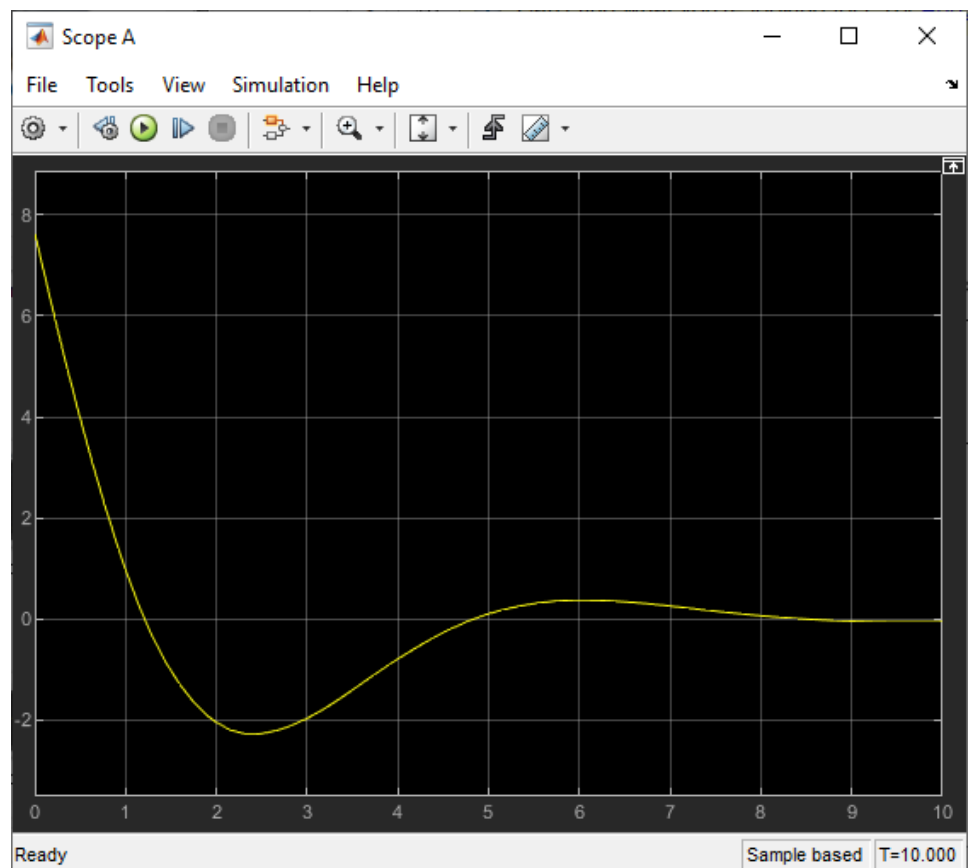


Рисунок 21 – График функции Score A

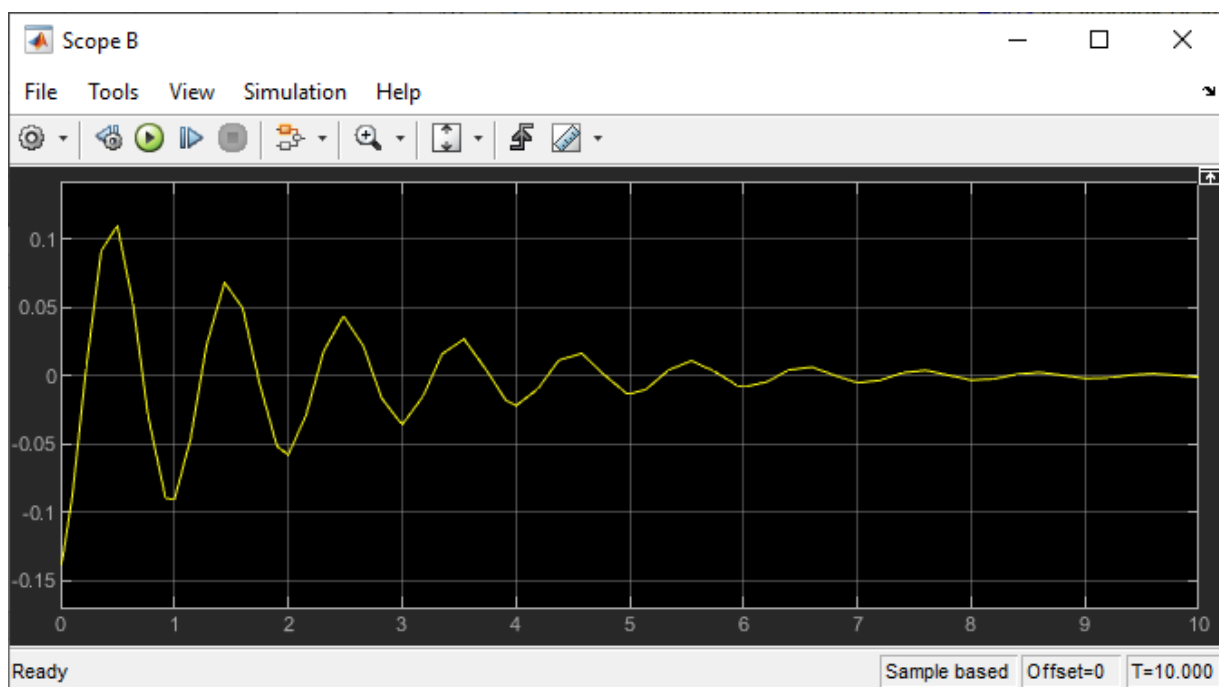


Рисунок 22 – График функции Score B

Графики с осциллографов системы наглядно демонстрируют ее устойчивость. Понятие устойчивости системы управления связано со способностью системы возвращаться в состояние равновесия после исчезновения внешних сил, которые вывели её из этого состояния. Компьютерным моделированием системы получены графики переходных процессов. Так как процессы колебательные, затухающие, то система устойчива.

### 3 Методика эксперимента

#### 3.1 Разработка экспериментальной базы на платформе Arduino

Рассматривается реализация системы управления приводами устройства на базе аппаратно-программного комплекса Arduino.

В состав экспериментального стенда входят:

- устройство, рисунок 23;
- серводвигатель, рисунок 24;
- контроллер Arduino Uno.

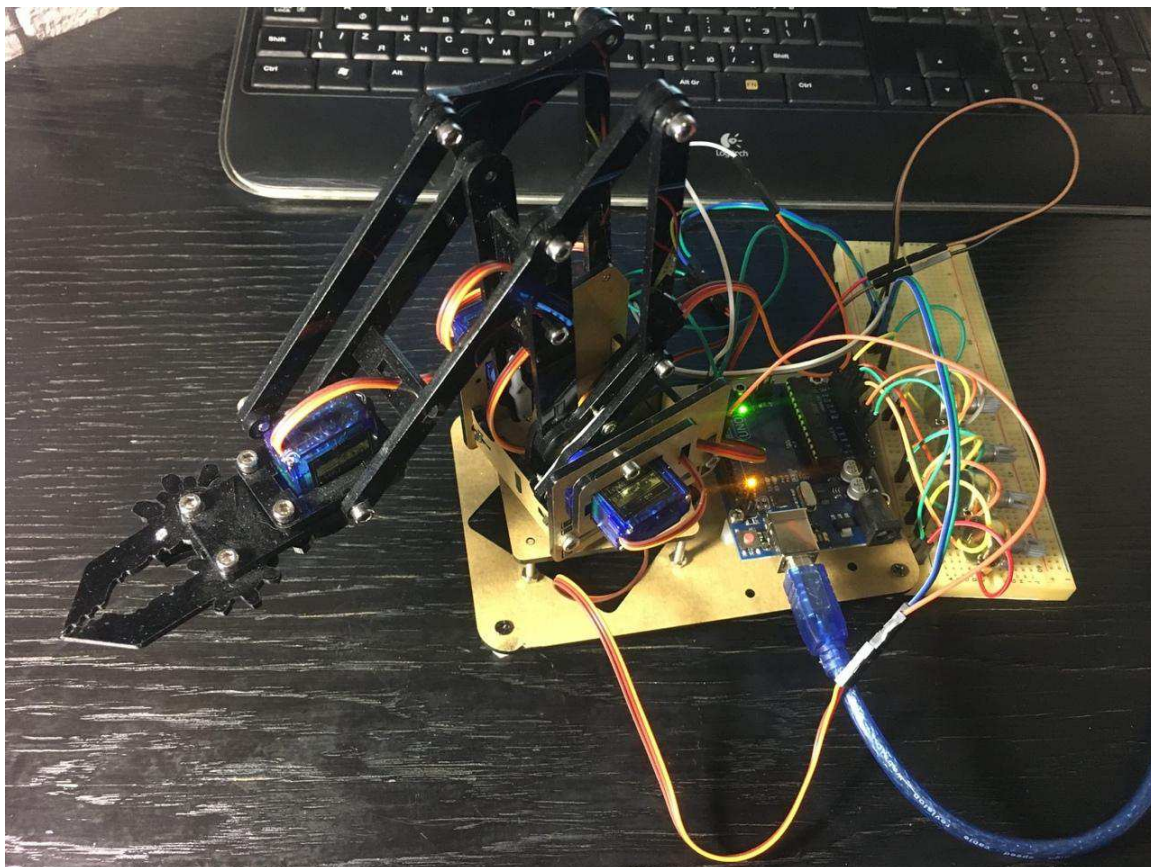


Рисунок 23 – Модель устройства с 4 серводвигателями



Рисунок 24 – Модель используемого серводвигателя SG90

На рисунке 25 изображена схема подключения сервопривода и элемента управления к контроллеру ардуино через макетную плату.

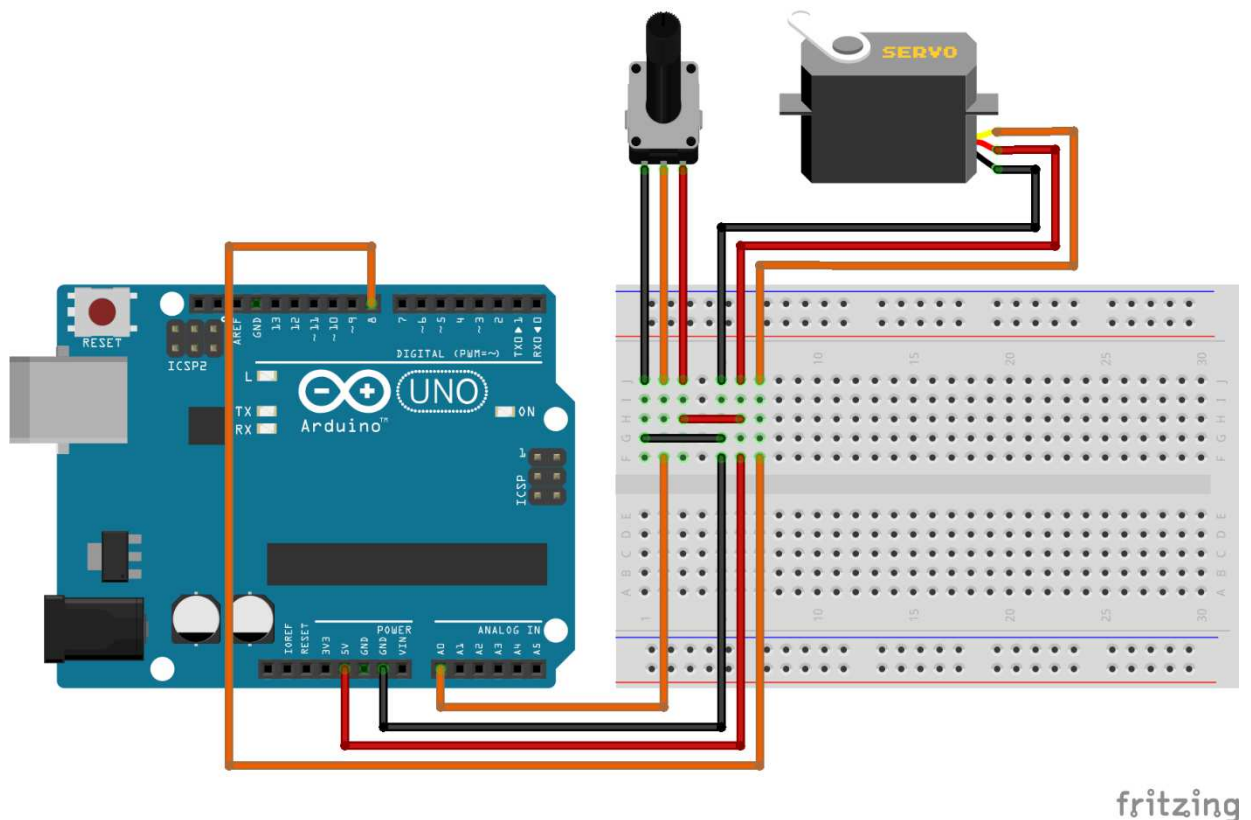


Рисунок 25 – Схема подключения привода к Ардуино

Сервопривод Arduino это двигатель с электромотором, вал которого поворачивается в соответствии с определенным или заданным углом, кроме того он поддерживает непрерывное вращение с точным периодом, либо же фиксируется в отметке.

Благодаря своим свойствам сервомоторы Arduino являются устройствами, которые могут применяться в различных технических устройствах. Массово применяются в робототехнике. Существуют сервоприводы непрерывного вращения, а также с фиксированной величиной градуса поворота. Отличие в них лишь в элементах блокировки движения, чтобы избежать прокручивания.

Конструкция серводвигателя представлена на рисунке 26.

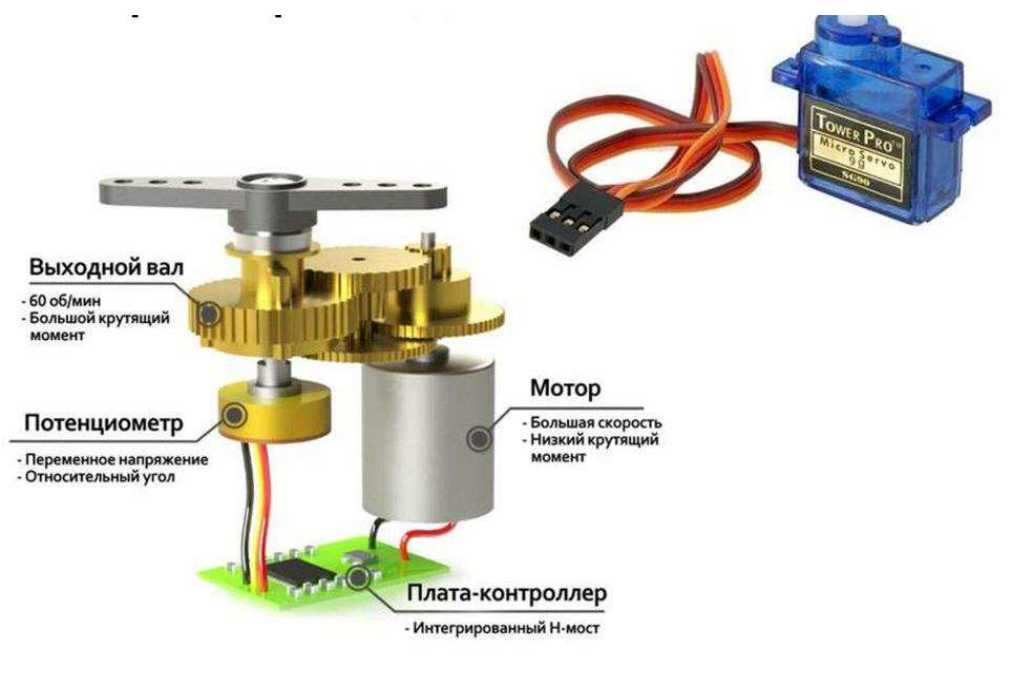


Рисунок 26 – Устройство сервопривода

Сервопривод состоит из электронной схемы, механической системы, блока управления приводом и датчика скорости либо положения, а в нашем случае угла поворота. Шестерни, редукторы и основные механизмы могут быть выполнены из пластика, карбона или металла. Потенциометр соединяют с выходным валом и встраивают в Сервомотор. Значение напряжения на потенциометре изменяется с поворотом вала. Сравнивая напряжение на

потенциометре и напряжение входного сигнала, плата анализирует разницу и, исходя из полученного значения, мотор поворачивает в положение, в котором выравниваются оба напряжения на выходе и на потенциометре.

Сервоприводы Arduino можно назвать мехатронными устройствами. При помощи микроконтроллера и одного входного пина, они получают значения для позиционирования и осуществляют поворот в это положение. На рисунке 26 изображен сервопривод с электрическим двигателем и цепью обратной связи, которая обеспечивает контроль положения вала сервопривода.

На вход серводвигателя приходит сигнал в виде прямоугольной волны. Сигнал делится на циклы с длительностью 25 мс, проводя большую часть времени в значении LOW. В начале каждого цикла на временной промежуток от 1 до 2 мс значение сигнала становится HIGH. При 0,5 мс составляет 0 градусов, а при 2,5 мс – 180 градусов, а в промежутке значение от 0 до 180.

График соответствия длины сигнала и угла поворота привода изображен на рисунке 27.

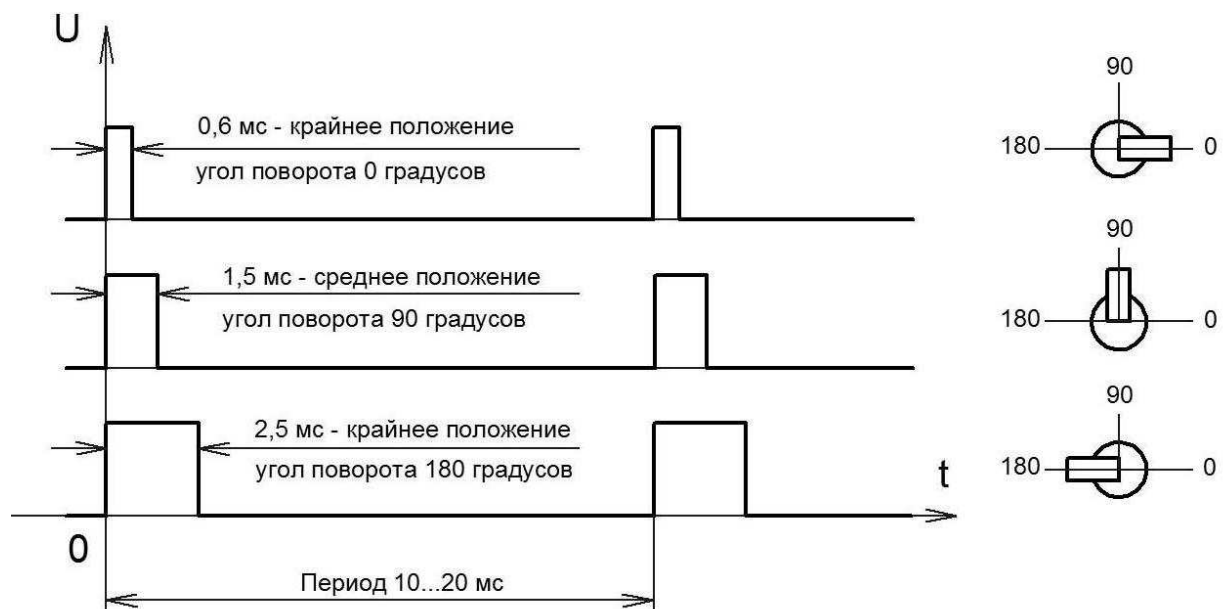


Рисунок 27 – Управляющие импульсы сервопривода

Arduino – это марка аппаратно-программных решений и средств для

построения несложных систем автоматического управления и робототехники. В работе используется модель современной платы Arduino UNO R3, выполненная на базе микроконтроллера ATmega328. Внешний вид контроллера приведен на рисунке 25.

Кроме этой платы Arduino выпускает несколько разновидностей плат для конкретных проектов автоматизации. Выбор конкретной модели контроллера выполняется с учетом решаемых задач, доступности, стоимости. На основании этих и других критериев, выбрана плата Arduino UNO R3 превосходящая все остальные варианты.

Контроллер Arduino Uno разработан на основе ATmega328. Платформа имеет кварцевый генератор частотой 16 МГц, 6 аналоговых входов, 14 цифровых вход/выходов, включая 6, которые могут использоваться как выходы ШИМ, разъем USB, разъем ICSP, силовой порт и кнопку перезагрузки. Для использования платформы она подключается к компьютеру с помощью кабеля USB, а также подается питание от батареи, либо при помощи адаптера AC/DC. Общие характеристики контроллера собраны в таблице 4.

Таблица 4 – Характеристики Arduino Uno

Показатель	Характеристика
Наименование микроконтроллер, В	ATmega328
Напряжение рабочее	5
Рекомендуемое входное напряжение, В	7-12
Предельное входное напряжение, В	6-20
Цифровые Входы/Выходы	14 (включая 6 ШИМ выходов)
Аналоговые входы	6
Постоянный ток на входе/выходе, мА	40
Постоянный ток для вывода 3.3, мА	50
Флеш-память, включая память для загрузчика, Кб	32
ОЗУ, Кб	2
EEPROM, Кб	1
Частота Тактов, МГц	16



Питание устройства и выбор источника происходит автоматически при подключении внешнего источника, аккумулятора, либо другого устройства при помощи порта USB. В случае подключения внешнего питания системы либо аккумуляторной батареи, делать это стоит через преобразователь. Для подключения преобразователя в плате предусмотрен разъем 2.1 мм с центральным положительным полюсом. Батарею можно подключить к выводам Gnd и Vin разъема питания.

Нормальная работа платформы обеспечивается при значениях напряжения от 6 до 20 В. При меньших значениях, вывод 5V выдает менее 5 В, при этом в работе платформы могут быть затруднения. В случае превышения напряжением отметки в 12 В появляется риск перегрева регулятора напряжения и повреждения платы. Рекомендуемый диапазон составляет от 7 до 12 В.

В случае если от разъема USB или любого другого регулируемого источника питания напряжение составляет менее 5 В применяют вход VIN используется для подачи питающего напряжения от внешнего источника. Питание с данного входа подается через регулятор напряжения.

В плате предусмотрен вывод 3V3 с напряжением 3.3 В, GND выводы заземления. Максимальное потребление тока 50 мА.

В микроконтроллере ATmega328 флэш память составляет 32 кБ, из которых 0,5 кБ отведены для хранения загрузчика, а также 2 кБ оперативно записывающего устройства SRAM и 1 кБ EEPROM.

### **3.2 Программирование и проведение натуральных исследований**

Управление платформой осуществляется посредством программирования ПО Arduino. В микроконтроллер уже установлен загрузчик, позволяющих записывать новые программы без применения внешних программаторов. Связь между блоками предусмотрена оригинальным протоколом STK500.

Основой программирования проектов Arduino стал язык C++, это один из самых известных и широко применяемых языков программирования. Он



поддерживает любой уровень команд, как низкой сложности, так и построение сложных объектов. Контроллеры Arduino программируются в специальной среде Arduino IDE. Что очень удобно, поскольку туда уже включен основной функционал для работы с контроллерами.

До начала работы на компьютер необходимо установить программу Arduino IDE с официального сайта. Установка программы осуществляется стандартно и схоже с любой другой, нужно лишь открыть доступ программе к административным полномочиям, и выбрать вариант установки среди предложенных. Затем необходимо подтвердить загрузку драйверов порта после успешной загрузки можно переходить к работе в программе [22]. Рабочее окно программы изображено на рисунке 28.

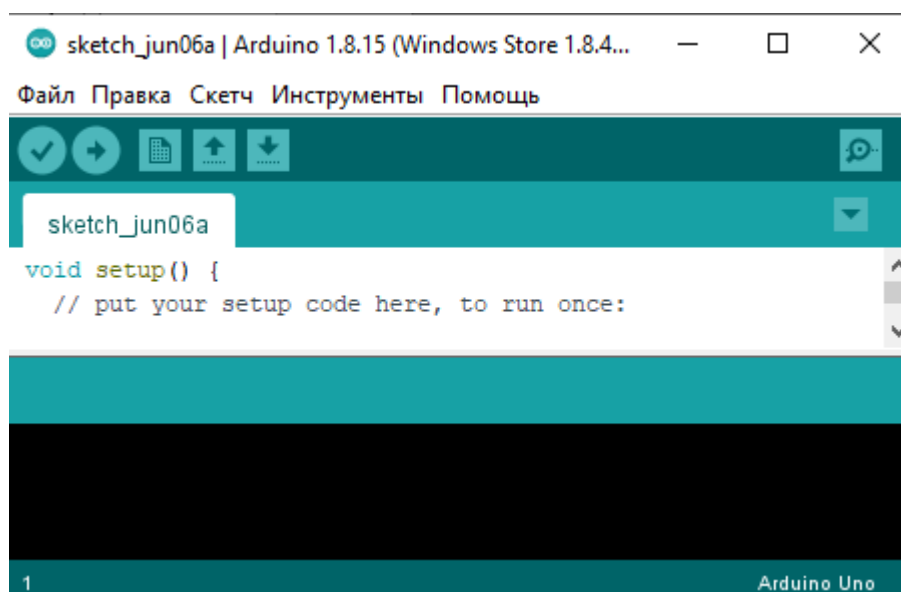


Рисунок 28 – Окно Arduino IDE

Среда разработки достаточно интуитивна и обладает понятным русскоязычным интерфейсом. При запуске программы Arduino IDE должно открыться окно, в котором уже находится шаблон программы, в соответствии с рисунком 28. Шаблон предлагает две функции: `setup` и `loop`. Функция `setup` содержит команды, выполняемые единожды при включении платформы, это может быть установка различных номеров порта ввода/вывода при управлении на мониторах, либо фиксация скорости обмена данными между компьютером и

Arduino. Функция loop выполняется непрерывно до отключения питания.

Контроллер Arduino UNO подключается к компьютеру при помощи порта USB, после чего программа IDE самостоятельно устанавливает связь между ними. Для этого, в программе указывается номер порта подключения контроллера COM1 как на рисунке 29.

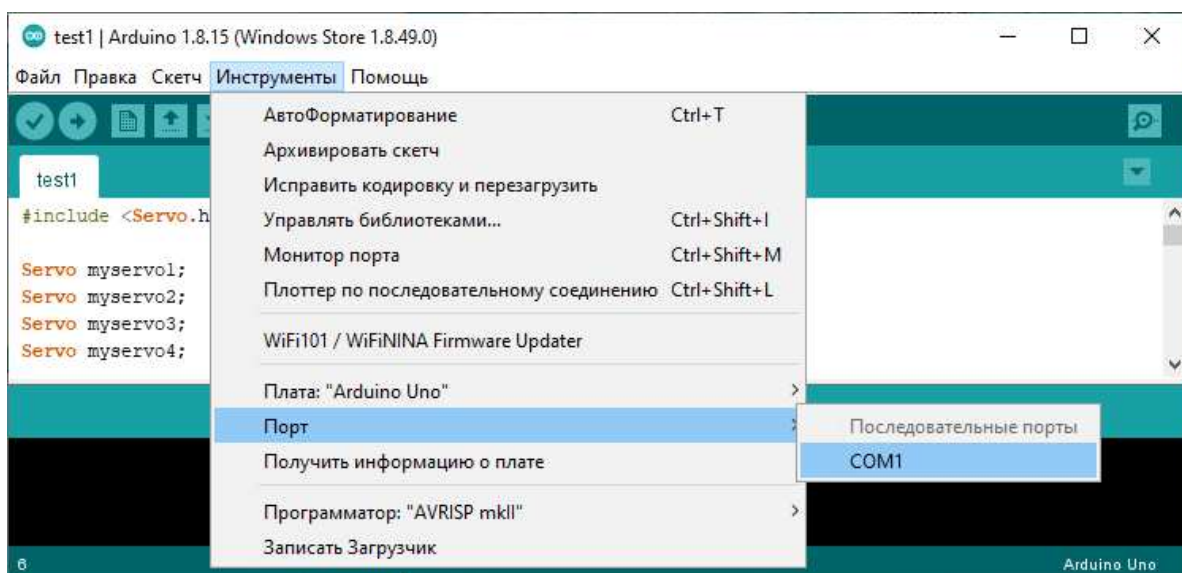


Рисунок 29 – Выбор нужного порта

Затем выбирают тип контроллера Arduino. На рисунке 30 показан выбор Arduino/Genuino Uno.

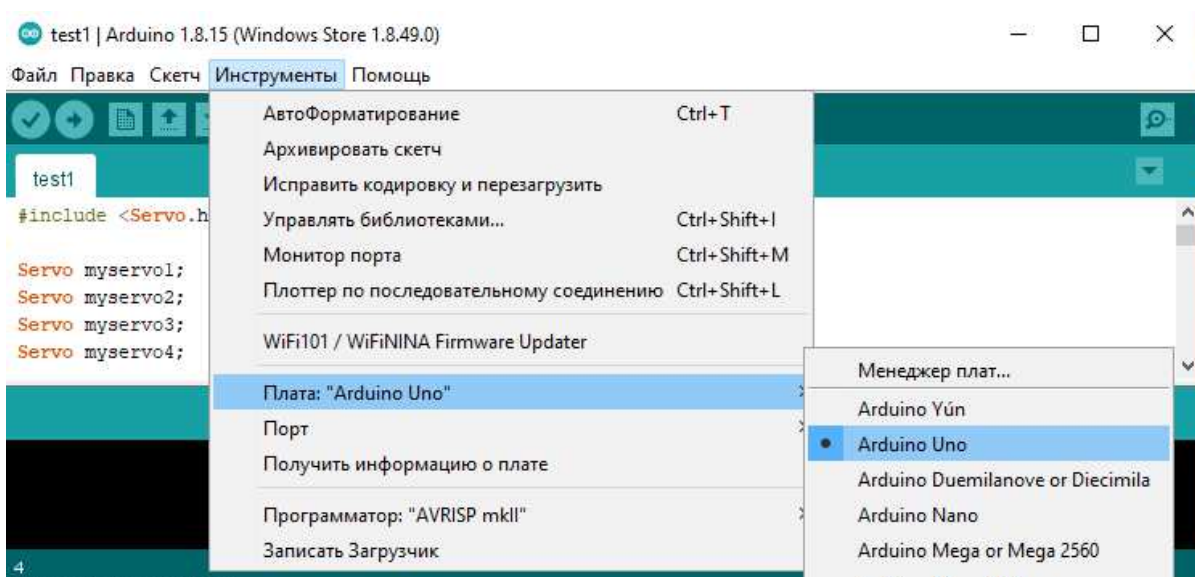


Рисунок 30 – Выбор типа контроллера Arduino

Программная среда позволяет в зависимости от типа контроллера Arduino использовать разные USB-кабели. В случае автоматического выбора контроллера системой, необходимо проверить выбор программы, так как некоторые контроллеры подразумевают выбор подвида микроконтроллеров, на которых реализована сама плата.

После написания, программный код загружают в контроллер. Система IDE проводит проверку на ошибки в программе после чего производит ее перевод в двоичный код. Завершающим этапом станет запись кода в плату Arduino, теперь контроллеру понятны команды.

В случае успешной загрузки программы в плату на Arduino замигают светодиоды TX и RX сразу же.

Каждая функция несет в себе блок кодов программы, каждый из которых имеет наименование и ряд. Вызов функции можно осуществить из любого места программы. Они подразделяются на предустановленные, которые уже существуют в стандартной библиотеке и созданные в рамках открытой программы. Безусловно можно найти уже готовые библиотеки скетчей, они без затруднений подключаются к текущей программе и реализуют свои функции, в зависимости от того, для каких устройств и датчиков они были написаны.

Серводвигатель подключается программно.

Вначале загружается библиотека (`#include <Servo.h>`), после создаем объект `servomtr`.

Серводвигатель можно подключить непосредственно к плате, или через макетную плату для управления с помощью потенциометров как на рисунке 31.

Контакт серводвигатель должен быть физически подключен к порту Arduino UNO R3, и на мотор подано электропитание.

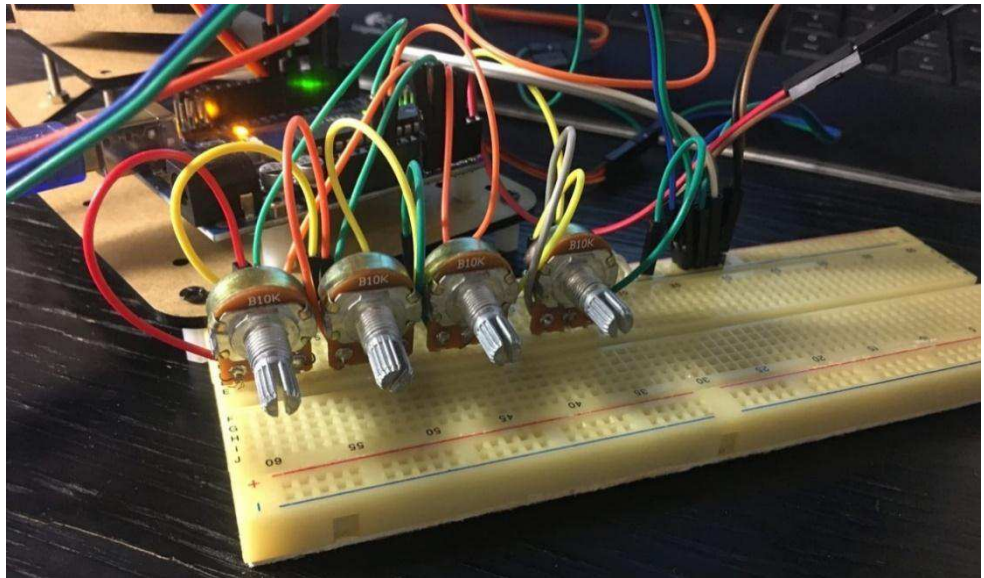


Рисунок 31 – Подключение серводвигателя к контроллеру Arduino через макетную плату

План физического эксперимента с сервоприводом и программная реализация – вариант 1:

```
#include <Servo.h> // Подключаем дополнительную библиотеку Servo servo1; //  
Объект управления сервоприводом  
void setup()  
{  
servo1.attach(9); // Назначается пин 9 для подключения серводвигателя  
}  
void loop()  
{  
int position;  
servo1.write(90); // Команда серве повернуться на позицию 90 градусов  
delay(1000); // Пауза 1 мкс, чтобы дать время повернуться servo1.write(180); //  
Команда серве повернуться на позицию 180 градусов delay(1000); // Пауза 1 мкс  
servo1.write(0); // Команда серве повернуться на позицию 0 градусов  
delay(1000); // Пауза 1 мкс  
// Формируется команда сервоприводу повернуться на позицию 180 градусов,  
// с шагом в два градуса:  
for(position = 0; position < 180; position += 2)
```

```

{
servo1.write(position); // Команда перемещения на следующую позицию
delay(20);           // Короткая пауза
}
// Формируется команда сервоприводу повернуться на позицию 0 градусов,
// с шагом в 1 градус:
for(position = 180; position >= 0; position -= 1)
{
servo1.write(position); // Команда сервоприводу переместиться на
// следующую позицию
delay(20);           // Короткая пауза
}

```

План физического эксперимента с сервоприводом и программная реализация – вариант 2:

```

int servopin=9;// select digital pin 9 for servomotor signal line
int myangle;// initialize angle variable int pulsewidth;// initialize width variable int
val;
void servopulse(int servopin,int myangle)// define a servo pulse function
{
pulsewidth=(myangle*11)+500;// convert angle to 500-2480 pulse width
digitalWrite(servopin,HIGH);// set the level of servo pin as "high"
delayMicroseconds(pulsewidth);// delay microsecond of pulse width
digitalWrite(servopin,LOW);// set the level of servo pin as "low" delay(20-
pulsewidth/1000);
}
void setup()
{
pinMode(servopin,OUTPUT);// set servo pin as "output" Serial.begin(9600);//
connect to serial port, set baud rate at "9600" Serial.println("servo=o_seral_simple
ready" );
}

```

```

}
void loop()// convert number 0 to 9 to corresponding 0-180 degree angle, LED blinks
corresponding number of time
{
val=Serial.read();// read serial port value if(val>='0'&&val<='9')
{
val=val-'0';// convert characteristic quantity to numerical variable val=val*(180/9);//
convert number to angle
Serial.print("moving servo to "); Serial.print(val,DEC); Serial.println();
for(int i=0;i<=50;i++) // giving the servo time to rotate to commanded position
{
servopulse(servopin,val);// use the pulse function
}
}
}
}

```

Результаты отработки рабочего процесса программного управления сервоприводом показан на рисунке 32.

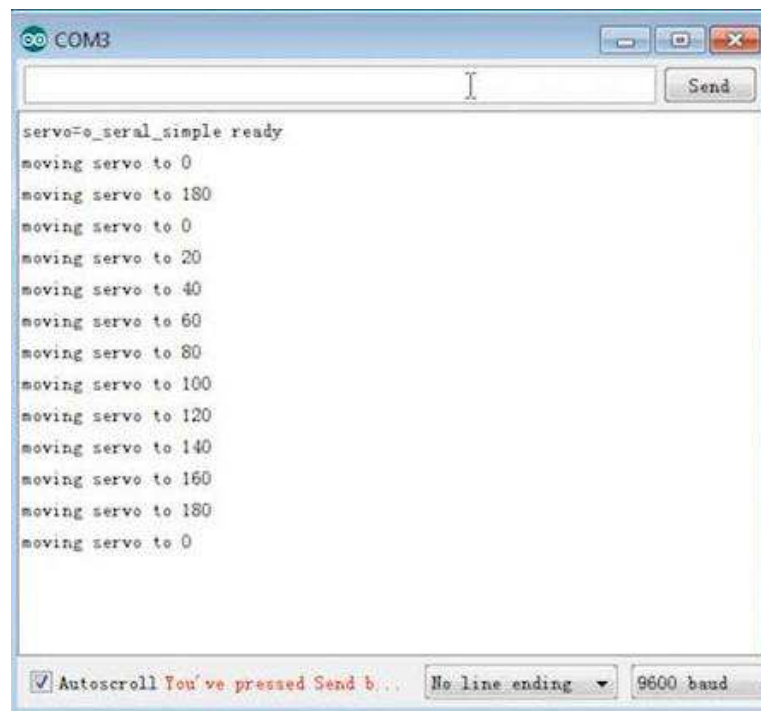


Рисунок 32 – Результаты рабочего процесса программного управления сервоприводом

### 3.3 Результаты экспериментальных исследований

Исследования проводились с целью определения динамических характеристик принтера и силового взаимодействия электрических приводов во время колебательного процесса. Определение данных параметров осуществлялось при варьировании величин внешней и внутренней нагрузки, а также конструктивная взаимосвязь узлов агрегата на экспериментальном макете строительной 3D-печати, который имитировал процесс работы во время воздействия динамических и вибрационных нагрузок.

В ходе исследования макета применено следующее оборудование: датчики вибрации DFR0052 пьезоэлектрические, датчик тока ACS712, ПИД регулятор (DAMP/ GAIN) с драйвером щеточного серводвигателя ЩСД PLD2080s. Определение вибрационных нагрузок производилось с целью изучения их доли влияния на параметры и точность позиционирования. Измерения проводились с работой установки на холостом ходу, а также в режиме печати. Датчик вибрации закреплялся на корпусе макета.

Исследования динамических процессов формирования стеклофибробетонных конструкций проводились при наполнении бункера стеклофибробетонной смесью и процесс движения с одновременным вибрированием стенок бункера и скользящей опалубки.

При проведении экспериментов определялись динамические характеристики процессов виброформования:

- 1) – Прочность на сжатие и частота колебаний стенок вибробункера и скользящей опалубки;
- 2) – амплитуда и частота колебаний стеклофибробетонной смеси.

Главным критерием работоспособности в режиме воздействия на 3D принтер динамических нагрузок является амплитуда колебаний бункера и ее вторая производная ускорения. В числе других параметров, влияющих на величину динамической нагруженности являются: масса колебательной системы, масса дебаланса вибратора, радиус эксцентриситета, частота

вращения дебаланса, угол сдвига фаз, объем бетонной смеси [21].

Параметры, определяемые в процессе экспериментов, приведены в таблице 5.

Таблица 5 – Исходные параметры

Параметр	Аппаратный состав	Объект определенных параметров
Амплитуда и частота колебаний на стенках бункера, Гц	Analog Devices, USB	отбойный брус, диск
Плотность смеси, кг/м <sup>3</sup>	ВА - 2	+
Общий вес компонентов смеси, кг	Дозатор	+
Прочность на сжатие, МПа	Шкала величин	Пресс

На рисунке 33 приведена виброграмма конструкции трехмерного принтера.

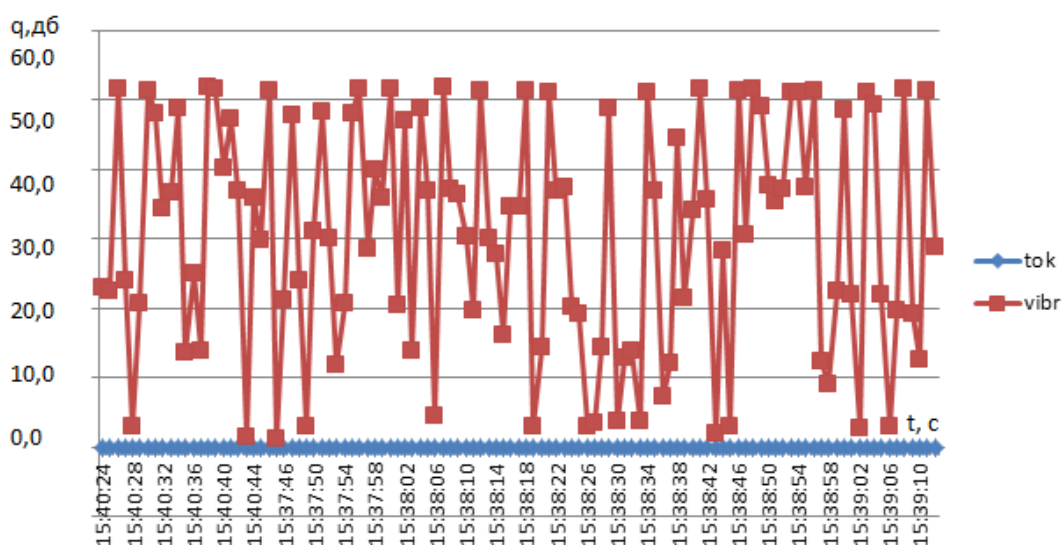


Рисунок 33 – Виброграмма устройства

На рисунке 34 приведен график зависимости тока электропривода от времени.



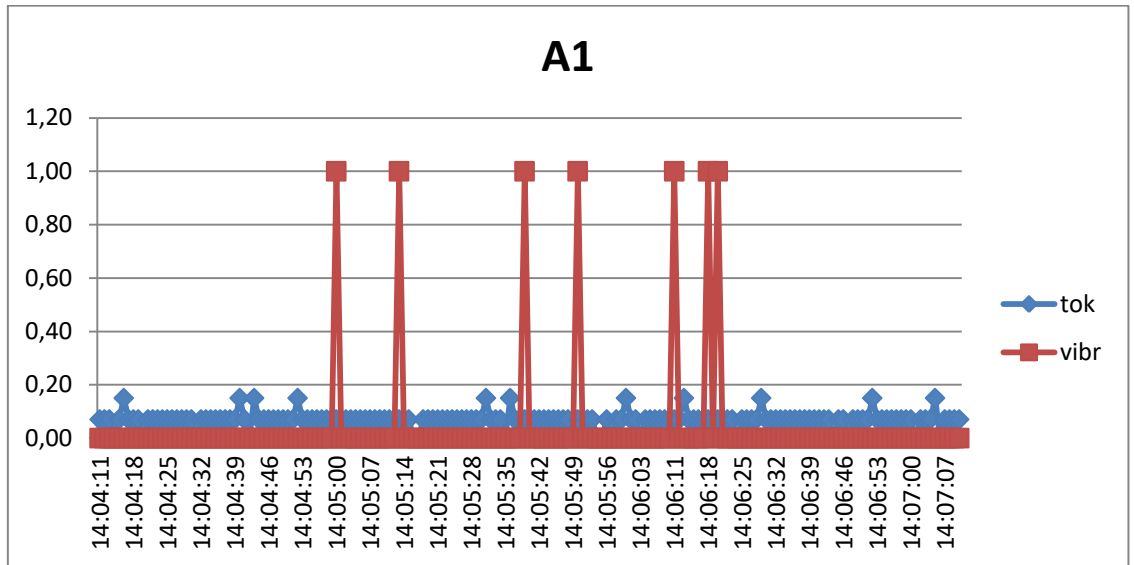


Рисунок 34 – График исследований тока электропривода

Как видно из приведенных графиков максимальное значение амплитуды колебаний ходовой тележки не превышает 0,8 мм, максимальное значение тока в пусковом режиме составляет 8,0 А. Определены основные закономерности изменения силы тока шагового двигателя, параметров колебательного процесса, напольного принтера для различных ситуаций.

На рисунке 35 приведен график ускорения рамы принтера в зависимости от коэффициента упругости смеси.

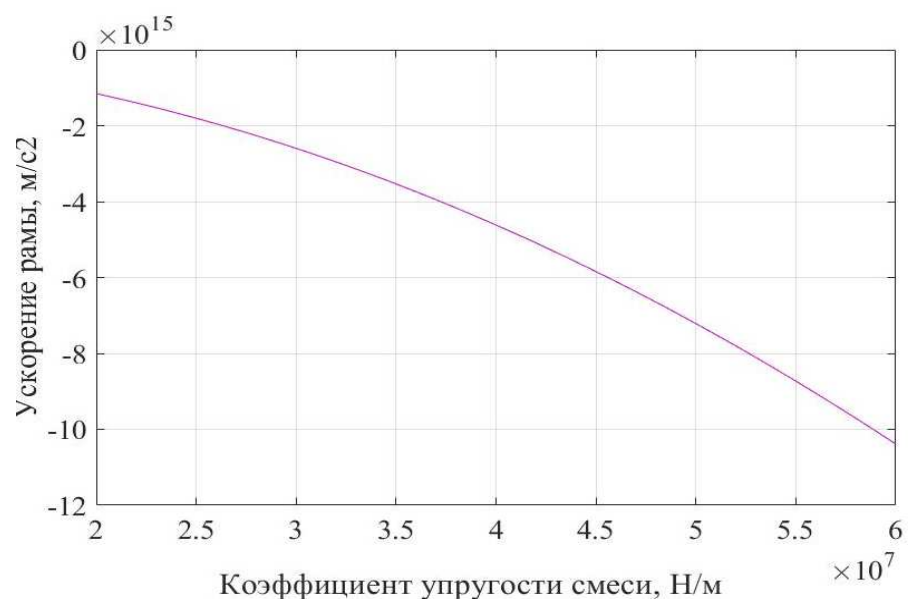


Рисунок 35 – График ускорения рамы принтера в зависимости от коэффициента упругости смеси

### 3.4 Методы контроля качества 3D печати строительных изделий

Для обеспечения контроля качества производства строительных изделий при помощи 3D принтера необходимо выбрать измеряемую величину, которая определяла бы параметры качественных свойств итогового продукта. Исходя из объекта контроля, т.е. раствора, а также применяемых в процессе экструзии механизмов, а именно печатающей головки принтера, возможным и единственно правильным способом контроля качества является отслеживание растекаемости экструдированного состава. Раствор должен наноситься в соответствии с 3D моделью объекта послойно, достигая проектного положения, оставаться и схватываться до необходимого набора прочности.

В зависимости от своей консистенции, раствор может быть пластичен, малоподвижен. При чрезмерном водонасыщении или же недостатке компонентов в смеси, может быть недостаточно прочен для экструзии, раствор будет попросту растекаться и не позволит корректно наращивать объект печати. Данное изменение в качестве раствора ведет к браку всего изделия.

Для интеграции в системную плату ардуино используем датчик HC SR04, рисунок 36.



Рисунок 36 – Ультразвуковой датчик расстояния HC SR04

Так как 3D принтер наращивает объект послойно, печатающая головка

следует соответственно программе, раствор во время экструзии должен сразу занимать свое проектное положение. Отклонение от допустимых параметров можно измерить при помощи ультразвукового датчика. Им будем осуществлять измерение расстояния до поверхности выдавливаемого слоя.

Ультразвуковые дальномеры Ардуино относительно просты, достаточной точны и доступны, благодаря чему довольно востребованы в различных робототехнических проектах. Их применение не ограничивается экспериментами, а широко используются как приборы выявления и контроля препятствий, определения размеров предметов, они могут смоделировать карту пространства и сигнализировать о сближении или удалении от объектов. Самым распространенным вариантом такого датчика расстояния ультразвуковой дальномер HC SR04. Он отличается простотой принципа действия датчика расстояния, множеством вариантов подключения к платам Arduino и схемам взаимодействия.

Принцип работы устройства схож с сонаром. Излучая ультразвуковые импульсы определенной периодичности, он принимает отраженный сигнал с задержкой временного интервала, таким образом определяется расстояние до окружающих объектов. Конструктивно он состоит из генератора импульсов и приёмника.

Ультразвуковой дальномер HC SR04 имеет такие технические параметры:

- 1) Напряжение питания – 5В;
- 2) Сила тока в рабочем состоянии – 15 мА;
- 3) Сила тока при пассивной работе < 2 мА;
- 4) Угол обзора – 15°;
- 5) Разрешение сенсора – 0,3 см;
- 6) Угол измерений – 30°;
- 7) Ширина импульса –  $10^{-6}$  с.

Являясь прибором бесконтактного типа, датчик расстояния Arduino обеспечивает высокую точность измерений и стабильность работы. Это устройство использует ультразвуковые волны для измерения расстояния до

объекта. Ультразвуковые датчики, представляющие собой тандемы микрофона и динамика, посылают и принимают сверхвысокочастотные звуковые волны для определения расстояния до объекта или насколько он близко. Сверхвысокочастотные звуковые волны отражаются от объекта. На рисунке 37 изображено отражение сверхвысокочастотных звуковых волн от поверхности объекта.

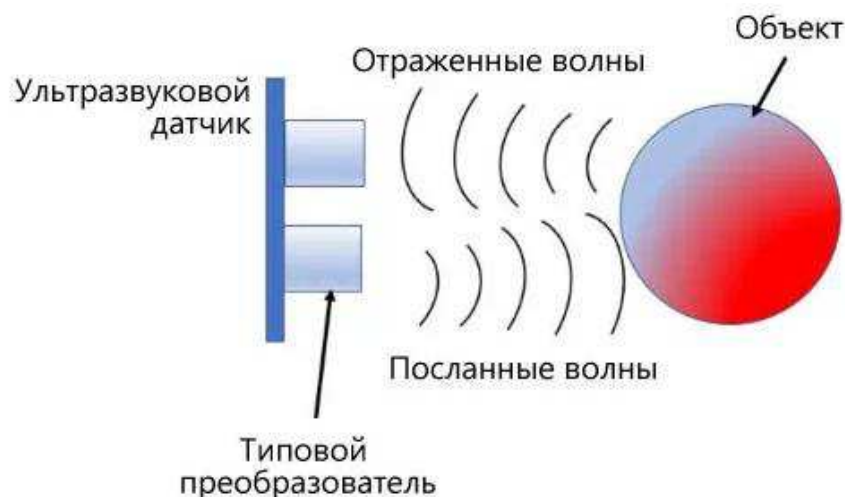


Рисунок 37 – Отражение сверхвысокочастотных звуковых волн

Для подключения датчика рекомендуется пользоваться онлайн-симулятором схем, который позволяет моделировать различные электрические и электронные схемы, прежде чем соединять их на реальной макетной плате. Виртуальную функциональную схему строим с помощью TinkerCad Circuits. В этой программе мы можем протестировать свои виртуальные проекты для обеспечения их правильной функциональности, перед созданием физической модели. На рисунке 38 показан проект функционального ультразвукового датчика Arduino, построенного с помощью TinkerCad Circuits.

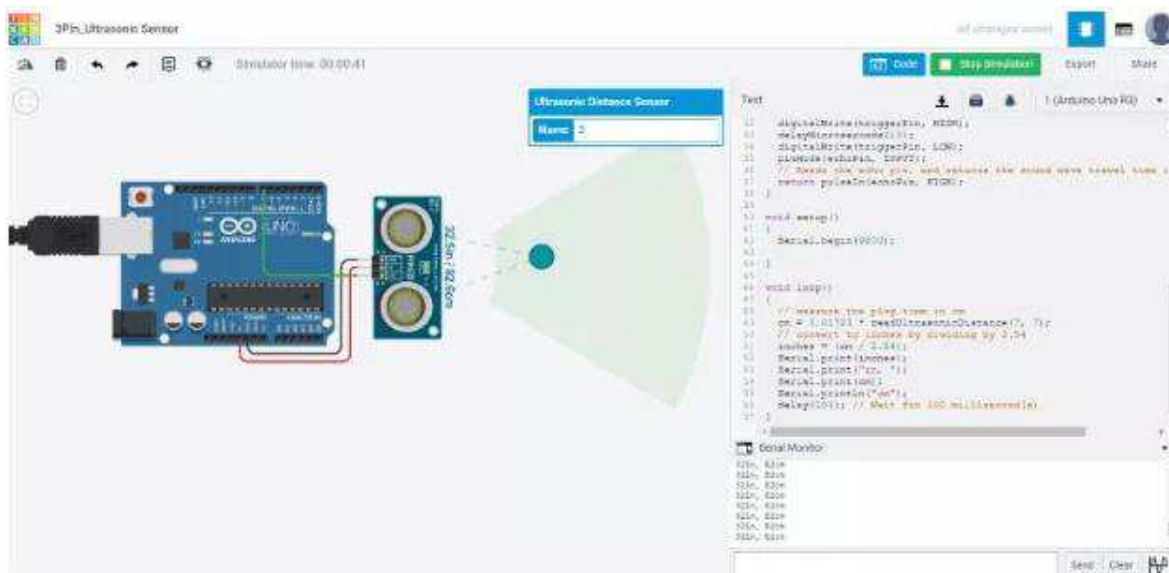
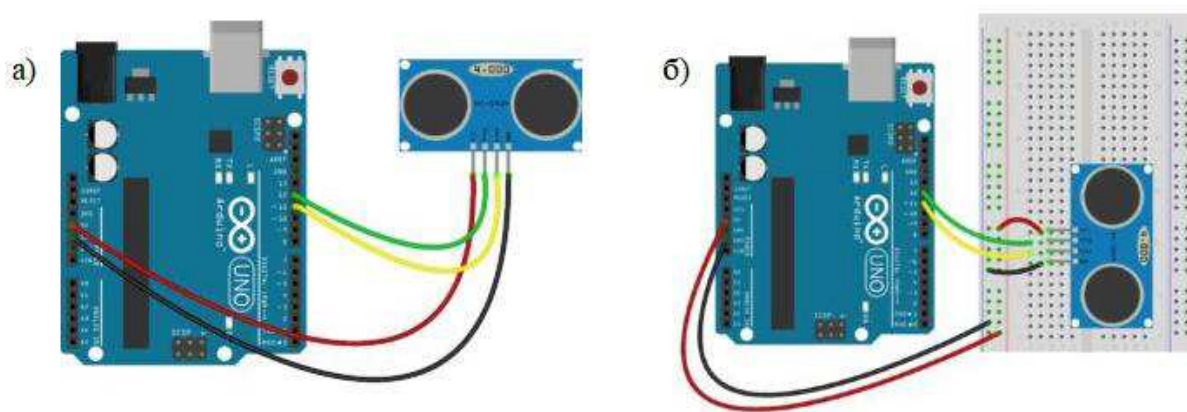


Рисунок 38 – Подключение датчика к плате Arduino с помощью TinkerCad

После успешного подключения виртуальной модели выполняем физическое подключение датчика к плате. На плате Arduino к выводу GND подключаем контакт земли, выход питания соединяем с разъемом 5V. Цифровые пины Arduino присоединяются к выводам Echo и Trig. Схемы подключения напрямую и при помощи макетной платы просты и показаны на рисунке 39.



а) напрямую к плате Arduino; б) при помощи макетной платы

Рисунок 39 – Схема подключения ультразвукового датчика

Для обеспечения совместной работы в плату необходимо запрограммировать. В приложении А приведен фрагмент кода Arduino IDE для определения датчиком расстояния до объекта.

В программном коде настраиваются необходимые величины и параметры, к примеру, единицы измерения расстояния до объекта, частоту измерений, а также производят калибровку и определение погрешности прибора.

На рисунке 40 показан пример изменения данных о расстоянии в IDE.



Рисунок 40 – Данные расстояния до объекта в IDE

После того, как датчик подключен, настроен и готов к применению его необходимо установить в следящем за печатающей головкой положении. В случае, если раствор будет растекаться, расстояние будет изменяться. С помощью программного обеспечения необходимо выставить допустимые параметры, определяемые датчиком. В случае превышения нормируемых величин система будет автоматически остановлена и предупредит оператора о наличии и причине неисправности.

Такое устройство поможет исключить брак, предотвратить некорректную печать, сократить время на устранение неисправности, так как выявлена она будет моментально. Для данной системы можно разработать программное обеспечение, позволяющее, на основании величины отклонения от допустимого, корректировать работу систем соединения компонентов смеси, изготовления и подачи раствора. В таком случае будет обеспечена полная автономность комплекса даже в случае неисправности.

## 4 Реализация результатов исследований

### 4.1 Экономическая эффективность трехмерной печати в строительстве

Важнейшим вопросом внедрения метода в реальную практику является экономическая обусловленность. Если данный метод попросту не рентабелен, исследования себя не оправдывают. Для этого предлагается сметное сравнение производства работ данным методом и методом более традиционным, самым типичным и широко распространенным. Стоит отметить что для чистоты и прозрачности сравнения четко проработаны объемы конструкций, их назначение, итоговые характеристики, возможные осложнения и неучтенные затраты при внедрении новой, непривычной технологии.

В таблице 6 введены объемно-планировочные показатели возводимого сооружения для сравнения стоимости строительства разными методами.

Таблица 6 – Объемно-планировочные показатели

Наименование показателей	Единицы измерения	Значение
1. Объемно-планировочные показатели		
Несущий каркас		Стены бетонные самонесущие
Этажность	эт.	1
Высота бетонных конструкций	м	4,5
Горизонтальные размеры стен	м	10x10
Толщина несущих стен	мм	350
Объем несущих конструкций с учетом проемов	м <sup>3</sup>	60
Площадь застройки	м <sup>2</sup>	100
Полезная площадь	м <sup>2</sup>	86

Принимаем к расчету возведение бетонных несущих стен прямоугольной формы высотой 4,5 метра, длиной и шириной 10 метров. В конструкциях предусматриваем проем входной двери и три оконных проема стандартных размеров общей площадью 8,75 квадратных метра. При толщине несущих стен 0,35 метра, объем дверных и оконных проемов составил 3 кубических метра. Общий объем бетонных конструкций за вычетом проемов составит 60 м<sup>3</sup>.

В связи с тем, что строительная 3D печать на данный момент не имеет нормативной базы, стандартов и ее ценовая политика не регламентируется, расчеты традиционного метода проводим без учета незначительных коэффициентов менее 3 процентов от стоимости, таких как коэффициент непредвиденных расходов, зимнего удорожания. Они будут применимы в обоих случаях, и никак не повлияют на общую процентную разницу между стоимостями двух методов.

На основании Федерального сборника сметных цен и Федеральных единичных расценок рассчитываем объемы трудозатрат и стоимость возведения конструкций, данные приведены в таблице 7.

Таблица 7 – Подсчет объема трудоемкости и цен на основании ФЕР и ФССЦ

Шифр	Наименование	Единицы измерения	Удельная расценка, руб.	Трудозатраты, чел-ч.	Кол-во	Стоимость, руб.
КЖ 1. Несущие стены						
ФЕР 06-01-097-01	Установка арматуры	1 тонна	6000,62	29,78	1,8	10 801
ФЕР 06-01-087-01	Монтаж и демонтаж: крупнощитовой опалубки стен,	10 м <sup>2</sup>	682,53	16,61	36	24 571
ФЕР 06-06-001-10	Устройство железобетонных стен и перегородок высотой до 6м, толщиной до 500 мм	100 м <sup>3</sup>	20 594,79	738	0,6	12 356
ФССЦ 401-0007	Бетон В20 (М250)	1 м <sup>3</sup>	665	–	60	39 900



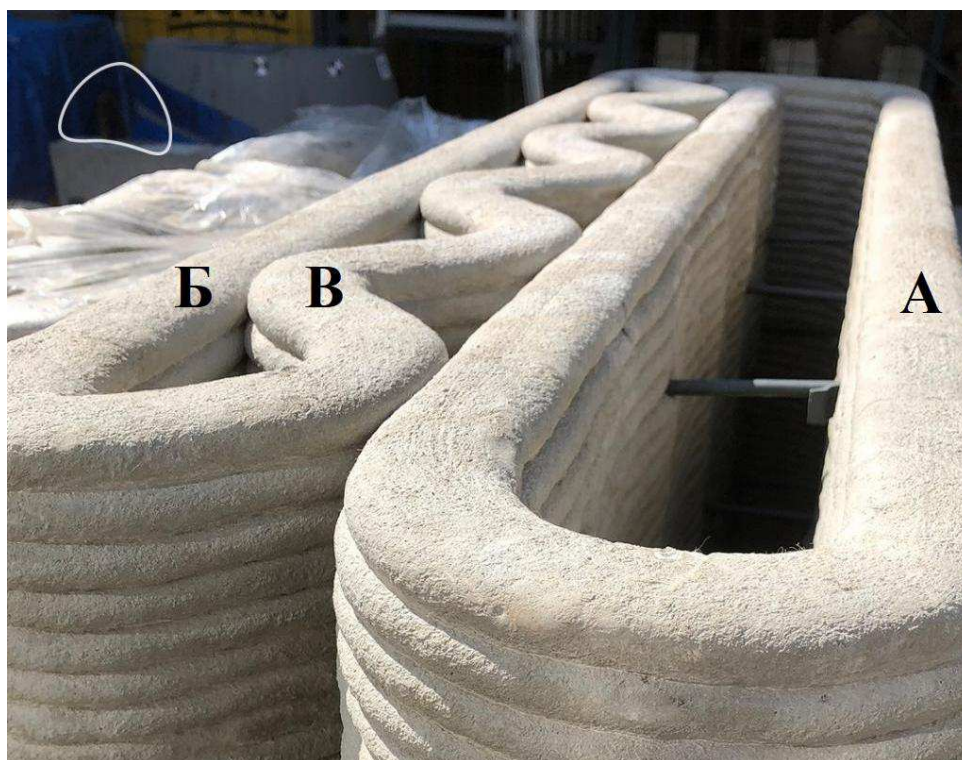
## Окончание таблицы 7

ФССП 204-0020	Арматура А-III, диаметром 8мм	1 тонна	8 102,64	–	1,8	14 584,75
Объем трудозатрат: 1094,22 чел-ч.						
Общая стоимость по расценкам на 2001 год: 102 212, 75 рублей						
Общая стоимость с учетом индексации цен для II квартала 2021 года: 844 277,32 рублей						

Так как единичные расценки приведены для 2001 года применяем индексацию. На основании письма министерства строительства № 9351-ИФ-09 от 11.03.2021 в Красноярском крае для монолитного жилого строительства индекс составляет 8,26. Стоимость с учетом индексации составила 844 тысячи рублей, с учетом НДС сумма увеличивается на 20 процентов и составляет 1 миллион 13 тысяч рублей.

В случае с аддитивной технологией требуется рассчитать необходимое время работы принтера для печати данной конструкции. Для начала необходимо разбить конструкцию на горизонтальные слои. Оптимальные параметры слоя ширина 8 см, высота слоя 2,5 см. При такой высоте слоя, их количество в конструкции высотой 4,5 метра составит 180 штук. Особенность печати предусматривает усадку раствора по любым причинам максимальной величиной 2% от высоты конструкции. С учетом усадки, для достижения высотной проектной отметки принтеру может понадобится еще 4 таких слоя, общее их количество составит 184.

Длина слоя напрямую зависит от формы сооружения и его габаритов. В нашем случае длина складывается из длин внутренних и внешних стен, а также промежуточного усиления. Пример такой стеновой конструкции изображен на рисунке 36.



А – внешняя стена, Б – внутренняя стена, В – усиление

Рисунок 41 – Пример стеновой конструкции

Усиление необходимо для увеличения несущей способности конструкции, от его длины изменяется площадь несущей поверхности. Длина определяется произведением внешней длины на коэффициент изменения, для нашей конструкции одноэтажного дома он составит 1,4. Общая длина слоя составила 133,2 метра.

Нормальная скорость реальной печати принимается в промежутке от 100 до 250 мм/с. Принимаем скорость 150 мм/с, такая величина позволяет отразить среднюю скорость печати конструкций с момента запуска, до момента завершения, с учетом всех технологических пауз, непредвиденных остановок и возможных неисправностей систем.

На возведение конструкций, при заданных параметрах, принтеру необходимо 46 часов. Для его эксплуатации необходим 1 инженер для контроля печати и систем автоматики, а также квалифицированный бетонщик, для пополнения бункеров и своевременным устройством композитной арматуры и

закладных деталей. Для перевозки и установки требуются полуприцеп и небольшой кран. Время монтажа и подготовки к работе составит не более 1 смены. Общая трудоемкость составила около 110 чел-ч. Такой метод позволит возвести конструкцию за неделю при работе в две смены и за 5 суток при непрерывной работе.

Основная стоимость таких работ будет складываться из стоимости материалов, заработной платы рабочих, электроэнергии для работы принтера и транспортировки оборудования. Итоговая стоимость производства работ составит 756 тысяч с учетом НДС.

Экономическая эффективность определяется процентной величиной разницы двух методов. Разница между стоимостью традиционного возведения и печатью конструкций составила 257 тысяч рублей. Применение принтера оказалось экономически эффективнее на 34%.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований решены задачи, поставленные перед данной работой, а именно:

- 1) Выполнен анализ предшествующих исследований, на основании которых выявлены проблемы данной тематики, определены направление и цель исследования.
- 2) Разработана расчетная схема конструкции принтера
- 3) Произведен расчет математической модели комплекса строительной трехмерной печати;
- 4) Создана имитационная модель манипулятора в программной среде MATLAB/Simulink;
- 5) Разработана методика компьютерного моделирования и проведен эксперимент над имитирующим принтер-манипулятор устройством;
- 6) Предложены, обоснованы и экспериментально внедрены варианты совершенствования рабочих процессов строительного принтера;
- 7) Разработана теоретическая база системы контроля 3D печати в строительстве;
- 8) Произведен сравнительный сметный расчет стоимости работ по возведению бетонных конструкций традиционным методом и при помощи аддитивных технологий в строительстве, с внедрением разработок данного исследования, чем и доказана экономическая эффективность исследования, которая составила 34%.

На основании результатов исследования можно утверждать, что цель работы достигнута, все поставленные задачи выполнены, эффективность применения моделей и других результатов на практике рассчитана и доказана экспериментально.

## СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

- $m_0$  – масса колебательной системы;
- $m_1$  – масса смеси в бункере;
- $m_2$  – масса рамы 3D принтера;
- $y, x$  – перемещение системы;
- $c_2$  – жесткость бункера;
- $c_1$  – жесткость амортизатора подвески;
- $b_1, b_2$  – демпфирование смеси и привода;
- $u_{я}$  – напряжение якоря;
- $I_{я}$  – ток якоря;
- $e_{я}$  – противо-ЭДС якоря;
- $L_{я}$  – индуктивность якоря;
- $R_{я}$  – сопротивление якоря;
- $T_{я}$  – электромагнитная постоянная времени якоря;
- $\omega_m$  – механическая угловая скорость;
- $M$  – электромагнитный момент;
- $M_H$  – момент нагрузки;
- $\Theta_m$  – механический угол поворота вала;
- $J$  – момент инерции ротора;
- $k_E, k_M$  – конструктивные постоянные;
- $P_H, кВт$  – номинальная мощность двигателя;
- $U_{я}, В$  – номинальное напряжение питания якоря;
- $U_B, В$  – номинальное напряжение возбуждения;
- $n_H, 1/мин$  – номинальная скорость вращения якоря;
- $I_{я}, А$  – номинальный ток якоря;
- $R_{я}, Ом$  – сопротивление обмотки якоря;
- $R_B, Ом$  – сопротивление обмотки возбуждения;
- $c_x = 0,3 \sim 0,4$  – эмпирический коэффициент;

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Лунева Д.А., Кожевникова Е.О., Калошина С.В. Применение 3D-печати в строительстве и перспективы ее развития // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. 2017. Т. 8, № 1. С. 90-101. DOI: 10.15593/2224-9826/2017.1.08
- 2 Иноземцев А.С., Королев Е.В., Зыюнг Тхань Куй. Анализ существующих технологических решений 3D-печати в строительстве // Вестник МГСУ. 2018. Т. 13. Вып. 7 (118). С. 863-876. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.7.863-876
- 3 Аржанников А. О., Емельянов Р. Т., Турышева Е. С. Отработка рабочих параметров строительного 3d-принтера // Молодой ученый. 2018. № 22 (208). С. 105-108
- 4 Абрамян С. Г., Илиев А. Б. Современные строительные аддитивные технологии. Часть 1. // Инженерный вестник Дона. 2018. № 1. URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2018/4755>
- 5 Калугина Ю. Е., Золотарев А. Д. Возведение зданий с помощью контурного строительства // Современные инновации. 2018. № 2(30). DOI: 10.24411/2412-8244-2019-10201
- 6 Серков А.И. Развитие технологии трехмерной печати в области строительства // Региональное развитие: электронный научно-практический журнал. 2017. № 2(20). URL: <https://regrazvitie.ru/razvitie-tehnologii-trehmemoj-pechati-v-o+blasti-stroitelstva/>
- 7 Davidla Delgado J. M., Oyedele, L.O., Ajayi A.O., Akanbi L.A., Akinade O.O., Bilal M., A.O., Owolabi H.A. Robotics and automated systems in construction: Understanding industry-specific challenges for adoption // Journal of Building Engineering. 2019. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.100868>

- 8 Мухаметрахимов Р. Х., Вахитов И. М. Аддитивная технология возведения зданий и сооружений с применением строительного 3D-принтера // Известия КГАСУ. 2017. №4(42) С.350-359
- 9 Андреев Н. Ю., Прокопьев А. П. Моделирование динамики строительных манипуляторов // Математические методы в технике и технологиях - ММТТ. 2019. Т. 8. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2019. – С. 132- 135
- 10 Володченко В. С., Ланцова Д. С., Ивлев О. Ю., Метельницкая Т. А., Бышок К. А., Романов Э. В. Технологии будущего в строительстве: 3D-печать // Вопросы науки и образования. 2018.
- 11 Шувалов Н.Е. Целесообразность 3D печати в малоэтажном строительстве // Современные научные исследования и инновации. 2016. № 11 [Электронный ресурс]. URL: <http://web.snauka.ru/issues/2016/11/73646>
- 12 Аржанников А. О., Тимошенко Д. О., Игнатьев Г. В. Совершенствование 3D принтера для производства строительных конструкций // Материалы II Всероссийской межвузовской конференции: в 2 частях. 2017.
- 13 Руденко О.В, Есполова З.А. Моделирование конструкции для печати на строительном 3D принтере // Вестник Восточного Казахстанского Государственного Технического университета им. Д. Серикбаева, 2015. С. 31-42.
- 14 Шаторная А.М., Числова М.М., Дроздецкая М.А., Птухина И.С. Эффективность 3D принтеров в строительстве // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2017. № 9(60). С. 22–30. DOI: 10.18720/CUBS.60.2
- 15 Торшин А.О., Зырянов М.С., Манушина А.С. Автоматизация строительства с помощью 3D – технологии. //Наука вчера, сегодня, завтра: Сб. статей студентов, аспирантов, мол. ученых и преподавателей. Уфа: РИО МЦИИ «ОМЕГА САЙНС», 2015, Т. 3. – С. 36-38.
- 16 Тухарели А. В., Чередниченко Т. Ф., Снегирев Д. П. Прогрессивные строительные технологии в стесненных условиях городских территорий // Инженерный вестник Дона, №1 (2018).

17 Голушко А. Д., Александрова Е. В., Метод «Стена в грунте» // Молодой ученый. — 2017. — № 15 (149). — С. 18-23.

18 Емельянова И.А., Бугаевский С.А. Оборудование для возведения монолитных железобетонных конструкций системы «монофант» способом торкретирования // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного. 2016. Выпуск 72. С 107-117.

19 Емельянова И.А., Анищенко А.И., Меленцов Н.А., Гордиенко А.Т. Малогабаритное оборудование для транспортирования бетонных смесей и выполнения торкрет-работ // Вестник МГСУ. 2013. № 5. С. 87-95.

20 Основы математического моделирования технических систем: пособие [электронный ресурс] / В.И. Аверченков, В.П. Федоров, М.Л. Хейфец. – 3-е изд., стереотип. – М.: ФЛИНТА, 2016. – 271 с.

21 Клиндух Н.Ю., Турышева Е.С., Амузин И.К., Дремин Е.С., Булес Е.Д., Воробьева Е.А. Строительный 3Dпринтер манипуляторного типа // Интернет-журнал «Транспортные сооружения», 2019 №4, <https://t-s.today/PDF/14SATS419.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/14SATS419.

22 Момот М.В. Мобильные роботы на базе Arduino. — СПб.: БХВ-Петербург, 2017. — 288 с.: ил. ISBN 978-5-9775-3741-4.

23 Красильникьянц, Е.В. Применение контроллеров движения для систем управления электромеханическими объектами/ Е.В. Красильникьянц, А.П. Бурков, В.А. Иванков // Мехатроника. Автоматизация. Управление. — 2008. — Вып. №2. — С. 45-50.

24 Тютиков, В. В. Система управления манипуляционным роботом с компенсацией динамических моментов/ В. В Тютиков., Е. В. Красильникьянц, А. А. Варков// Автоматизация в промышленности – 2015. – С. 58-63.

25 Тютиков, В. В. Система управления манипуляционным роботом с компенсацией динамических моментов/ В. В Тютиков., Е. В. Красильникьянц, А. А. Варков// Автоматизация в промышленности – 2015. – С. 58-63.



26    СТО 4.2–07–2014 Система менеджмента качества. Общие требования к построению, изложению и оформлению документов учебной деятельности. – Введ. 07.2014. – Красноярск: СФУ, 2014. – 60 с.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

### Фрагмент кода Arduino IDE

```
const int pingPin = 7;

void setup() {
  Serial.begin(9600);
}

void loop()
{
  long duration, inches, cm;

  pinMode(pingPin, OUTPUT);
  digitalWrite(pingPin, LOW);
  delayMicroseconds(2);
  digitalWrite(pingPin, HIGH);
  delayMicroseconds(2);

  digitalWrite(pingPin, LOW);

  pinMode(pingPin, INPUT);
  duration = pulseIn(pingPin, HIGH);

  inches = microsecondsToInches(duration);
  inches = inches +2; // Ultrasonic Calibration factor
  cm = microsecondsToCentimeters(duration);
  cm = cm +2; // Ultrasonic Calibration factor

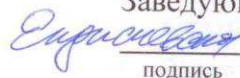
  Serial.print(inches);
  Serial.print("in, ");
  Serial.print(cm);
  Serial.print("cm");
  Serial.println();
}
```

```
    delay(1000);  
}  
  
long microsecondsToInches(long microseconds)  
{  
    return microseconds / 74 / 2;  
}  
  
long microsecondsToCentimeters(long microseconds)  
{  
    return microseconds / 29 / 2;  
}
```

Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение  
высшего образования  
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
Инженерно-строительный институт  
Кафедра строительных материалов и технологии строительства

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

 И.Г. Енджиевская

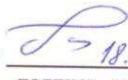


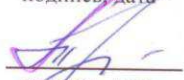
подпись

«21» 06 2021г.

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

**3D печать строительных изделий**

тема

Направление Магистерская программа	08.04.01 Строительство 08.04.01.07 Комплексная механизация и автоматизация строительства		
Научный руководитель	 подпись, дата	доц., канд. техн. наук	Н.Ю. Клиндух
Выпускник	 подпись, дата	ст. гр. СФ19-07М	И.К. Амузин
Рецензент	 подпись, дата	проф., д-р. техн. наук	В.И. Иванчура
Нормоконтролер	 подпись, дата	доц., канд. техн. наук	Е.С. Турышева

Красноярск 2021