

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

« _____ » _____ 2020г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Совершенствование оборудования для 3D печати в строительстве

08.04.01 "Строительство"

08.04.01.007 "Комплексная механизация и автоматизация строительства"

Научный руководитель _____ канд. техн. наук, доцент Е.С. Турышева

Выпускник _____ А.А. Греб

Рецензент _____ д-р техн. наук, профессор В.И. Иванчура

Нормоконтролер _____ доц., канд. техн. наук Т.С. Турышева

Красноярск 2020

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа по теме «Совершенствование оборудования для 3D печати в строительстве» содержит 00 страниц текстового документа, 00 иллюстраций, 00 формул, 0 приложения, 00 использованных источника.

СТРОИТЕЛЬСТВО; АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ; 3D ПРИНТЕР; ПОДВЕСКА ПРИВОДА; МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ; ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ; МОДЕЛИРОВАНИЕ; ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СХЕМА.

Цель работы – совершенствование оборудования для 3D печати на основе цифровых информационных технологий.

Объект исследования – процесс печати строительных конструкций.

Предмет исследования – зависимости показателей ускорения и скорости рамы от коэффициента упругости и массы используемой смеси.

Задачи работы:

- анализ рабочего процесса производства изделий при помощи 3D строительного принтера;
- теоретическое и математическое описание процесса 3D печати;
- разработка имитационной модели 3D строительного принтера в среде MATLAB&Simulink;
- компьютерный эксперимент и анализ полученных данных;

Актуальность и необходимость совершенствования оборудования для 3D печати на основе цифровых информационных технологий определяется тем, что использование 3D-печати позволит воплотить в жизнь архитектурные проекты любой сложности, уменьшить количество производственных отходов, снизить материальные, энергетические и трудовые затраты на строительство.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
Глава 1 Состояние вопроса	7
1.1 Анализ технологических процессов печати строительных конструкций	7
1.2 Анализ 3D принтеров для печати строительных конструкций	8
1.3 Анализ литературных источников, научных публикаций и патентов	17
Выводы	
Глава 2 Математическое моделирование 3D печати строительных конструкций	36
2.1 Выбор среды моделирования	36
2.2 Исходные данные	37
2.3 Математическая модель поведения подвески привода 3D принтера при воздействии вибрационных нагрузок	38
2.4 Компьютерный эксперимент	45
2.5 Обработка результатов компьютерного эксперимента	46
Глава 3 Экспериментальные исследования процессов 3D печати строительных конструкций	59
3.1 Методика проведения измерений	59
3.2 Разработка системы измерений	66
3.3 Результаты исследования процессов 3D печати строительных конструкций	79

	Выводы	
4	Реализация результатов исследований	90
4.1	Технологические преимущества использования 3D принтеров в строительстве	90
4.2	Экономические преимущества и недостатки использования 3D принтеров	91
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	96
	СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	97

ВВЕДЕНИЕ

Существенное повышение эффективности строительного производства обеспечивается путем постоянного совершенствования технологии, организации, управления и используемого оборудования. Одновременно основное значение в указанных видах работ приобретает не только механизация, но и автоматизация и роботизация строительного производства.

Механизация и автоматизация строительного производства также постоянно совершенствуются, так как дают возможность увеличивать темпы строительства, снижать трудоемкость и стоимость работ, повышать их качество, улучшать и облегчать условия труда обслуживающего персонала, обеспечивать безопасность выполняемых работ, перейти к завершению полной механизации тяжелых и трудоемких процессов и от механизации отдельных простых процессов строительства к комплексной их механизации и автоматизации.

Строительство всегда считалось перспективным и выгодным делом. Однако выгоду можно получить только в том случае, если использовать современные разработки стройиндустрии. На сегодняшний день строительные технологии непрерывно развиваются, происходит доработка и усовершенствование старых, либо изобретение новых методик и принципов строительного дела. Возведение зданий и сооружений трудно представить без применения различных механизмов, машин и приспособлений, облегчающих ведение строительного-монтажных работ.

В настоящий момент активно развивается технология 3D-печати. За последние несколько лет аддитивная технология стала примером самых стремительно развивающихся отраслей. Уникальность аддитивных технологий заключается в том, что использование 3D принтера позволяет распечатать объект практически любого размера в различных отраслях промышленности.

Широкое использование потенциала трехмерной печати позволит экономить средства и время, а также повысить производительность. Таким

образом применение 3D принтеров позволит создавать сложные трехмерные проекционные модели зданий с точностью передачи в 100 микрон.

3D принтер представляет собой автоматизированное устройство для строительства зданий и сооружений, изготовления отдельных конструкций и изделий методом трехмерной печати из мелкозернистого фибробетона со специальными добавками, пескобетона, геополлимерного бетона и др.

Главные плюсы 3D-печати в производстве - экономия времени и денежных средств, простота в использовании. 3D-принтеры дают возможность исключить ручной труд и безошибочно изготовить объект или конструкции за несколько часов. Они используются для изготовления прототипов и дают ряд преимуществ - это возможность оценки безопасности и удобства, сборки и функциональности, отсутствие ошибок перед отправлением изделия в серийное производство. Помимо прототипов, 3D-печать позволяет изготавливать готовые объекты в целом. Такое оборудование позволит избежать выполнения человеком опасных и сложных работ, позволит создать все условия для обеспечения безопасности окружающей среды.

С помощью 3D строительного принтера можно печатать не только здания в целом, но и изготавливать в заводских условиях мелкоштучные изделия, такие как стеновые и фундаментные блоки, бордюрные камни, малые архитектурные формы для городского дизайна и пр. Исходя из этого можно сделать вывод что аддитивные технологии являются перспективной и постоянно развивающейся отраслью строительства, которая сможет постепенно вытеснить традиционное строительство в возведении малоэтажных зданий и значительно увеличить темпы роста доступного жилья на строительном рынке.

Глава 1 Состояние вопроса

1.1 Анализ технологических процессов печати строительных конструкций

В настоящее время идет интенсивное развитие аддитивных технологий в строительстве. На мировом инвестиционно-строительном рынке происходят значительные инновационные и технологические изменения в направлении аддитивных технологий. Интенсивное развитие аддитивных технологий существенно меняет соотношение экономических факторов в строительстве. Применение 3D принтеров объемной печати для создания зданий и сооружений открывает новые возможности, ведь на сегодняшний день единственной полностью не автоматизированной отраслью производства является именно строительство. Поэтому большую актуальность приобрели вопросы, связанные с механизацией строительного производства, упрощением технологических цепочек в строительной отрасли, уменьшением стоимости готовой продукции, сокращением сроков строительства и снижением доли ручного труда.

Метод послойного экструдирования выступает основным способом аддитивных технологий. Суть данного метода заключается в том, что 3D-машина имеет рабочее «сопло» или экструдер, выдавливающий быстротвердеющую бетонную смесь, в которую включаются различные добавки, улучшающие тем или иным способом характеристики будущей конструкции.

Принцип формирования фигуры с трехмерной печати называют аддитивным (от слова Add (англ.) — добавлять). Для начала создается компьютерная модель будущего объекта. Это можно сделать либо с помощью трехмерного графического редактора CAD-системы (3D StudioMax, SolidWorks, AutoCAD). Затем, с помощью специального программного продукта принтер разбивает просканированный объект на слои и происходит генерация набора команд, определяющая последовательность, в которой будут наноситься слои

материала при печати. Далее, 3D-принтер послойно формирует объект, нанося постепенно порции материала. Располагая печатающую головку в системе двух координат X и Y, принтер наносит материал слой за слоем по смоделированной электронной схеме. При перемещении платформы на шаг вдоль оси Z начинается построение нового уровня объекта.

Печать строительных конструкций с помощью напольного 3D строительного принтера в заводских условиях (рисунок 10) состоит из следующих основных этапов:

1) Подключается комплекс оборудования и управления, устанавливается и настраивается программное обеспечение, проверяется функциональность 3D строительного принтера.

2) Производится подача всех составляющих стекофибробетонной смеси из хранилища к дозирующим приборам.

3) Производится дозирование всех компонентов рабочей смеси.

4) Производится подача всех дозирующих компонентов смеси в бетоносмесительную установку.

5) Происходит подача стеклофиброволокна и воды (от автономного резервуара или централизованно от водопровода) в бетоносмеситель.

6) Происходит смешивание всех компонентов в бетоносмесителе. Перемешивание происходит приблизительно в течении 10 минут.

7) Далее происходит выгрузка рабочей смеси в бункер шнекового насоса.

8) Включается 3D принтер и загружается модель будущей конструкции с помощью программного комплекса Mach 3 (установленного на компьютере).

9) Производится выведение экструдера 3D принтера на угловую метку с помощью программного обеспечения (отметить её как начальную). Затем можно приступить к самой печати, на этой стадии всё готово для начала работы.

10) Производится подача рабочей смеси в экструдерный бункер строительного 3D принтера. Во время печати смесь в экструдерном бункере постоянно перемешивается.

11) Далее происходит сама печать строительных конструкций.

12) Управление и дальнейшее сопровождение работы оборудования проводят 2 человека - оператор и специалист, сопровождающий процесс печати. По ходу печати конструкции при необходимости (в зависимости от изделия и предъявляемых требований к ним) оператором устанавливается через каждые 600 мм горизонтальная горячекатаная или композитная арматура.

1.2 Анализ 3D оборудования для строительства

В настоящее время разрабатываются различные программы по автоматизации и ускорению строительных процессов при помощи 3D-принтеров. Конструкция принтера может быть представлена в любом исполнении: в виде мостового, козлового крана или стрелы-манипулятора. На данный момент существует достаточное количество компаний, производящих 3D-принтеры.

Главное отличие 3D-принтера от любого другого промышленного робота заключается в способе создания продукции. Так, сначала готовится раствор, в составе которого присутствуют цемент, стекловолокно, иногда могут добавляться керамзит и другие материалы. Затем принтер этот вязкий бетон выдавливает через специальные сопла при одновременной трассировке вдоль распечатанной схемы стен и наносит на основание слой за слоем. Постепенно выстраиваются слои, которые уплотняют нижние, вследствие чего помогают им выдерживать увеличивающийся вес.

Применение строительного 3D-принтера имеет широкий диапазон: от создания небольших конструкций вроде строительных блоков, вазонов до крупных конструкций или даже целых домов. 3Dпечать зданий незаменима для строительства в местностях, пострадавших от стихийных бедствий, в бедных развивающихся странах и во всех других случаях, когда требуется за короткое время обеспечить жильём большое количество людей. Трёхмерная печать позволяет получать изделия различных сложных форм с минимальными временными и материальными затратами. Использование 3D-принтеров в

строительстве позволит отойти от традиционных форм зданий и создавать дома неправильной формы, с изогнутыми контурами и линиями. Автоматизация ручного труда позволит сократить численность строительных рабочих и минимизировать риск производственных травм. Сейчас уже начинается переход строительной 3D-печати от экспериментальных машин к серийному производству и массовому строительству.

3D принтеры создают реальные объекты на основе компьютерной объемной модели, используя метод печати по слоям.

Одним из основателей современных технологий строительной 3D-печати считается профессор Берох Хошневис. Уроженец Ирана, в настоящее время входит в деканат Университета Южной Калифорнии (USC), а также тесно сотрудничает с NASA. Профессору Кошневису принадлежит авторство технологии Contour Crafting, так или иначе послужившей основой для альтернативных разработок: строительная смесь наносится с помощью экструдера, установленного на подвижной порталной конструкции.

Contour Crafting – одна из аддитивных строительных технологий, способная применяться в строительстве крупномасштабных объектов. Как утверждает Берох Хошневис, Contour Crafting (рисунок 1) может позволить печатать несколько зданий за прогон.



Рисунок 1 - 3D строительный принтер Contour Crafting

В качестве материалов могут быть использованы: полимеры, керамический шликер и бетон. В процессе экструзии материала за счет шпателей, установленных на подающем сопле, образуется ровная поверхность. Высота слоя ограничивается размерами мастерков, кроме того она должна быть подобрана таким образом, чтобы при укладке верхних слоев предыдущие слои начинали схватываться и имели достаточную несущую способность. В технологии Contour Crafting предусматривается возможность проектирования инженерных коммуникаций в полостях стен, а также при использовании специального оборудования, закрепленного на раме, можно автоматизировать работы по их прокладке.

Самое известное отраслевое предприятие – китайская компания WinSun. Ее разработка представляет собой порталную конструкцию с габаритами 36х12х6м, а в качестве расходных материалов используются строительные смеси с наполнителями из переработанных от-ходов, вероятнее всего стеклопластика.

В 2014 году шанхайское предприятие прославилось на весь мир возведением десяти 3D-печатных зданий всего за одни сутки. В действительности небольшие «коробочки» были напечатаны блок за блоком в цехе, а затем собраны на строительной площадке без арматуры или коммуникаций, но с остеклением. Тем не менее начало было положено. Менее чем через год китайские строители отличились уже самым масштабным проектом на текущий день, а точнее сразу двумя – они возвели пятиэтажное здание и красивый особняк площадью 1100 кв. метров посредством 3D-печати. 3D принтер производства компании WinSun представлена рисунке 5.



Рисунок 5 - 3D строительный принтер производства компании WinSun

Разработкой поделилась и команда исследователей из Массачусетского технологического института (MIT). Чтобы доказать, что их прототип мобильного 3D-принтера Digital Construction Platform (DCP) эффективно работает, команда построила с его помощью круглую стену высотой 3,6 метра и диаметром 15 метров. DCP (рисунок 8) представляет собой большой гидравлический кран с на гусеничном ходу. Кран обладает четырьмя степенями свободы. На его конце находится однопальцевый манипулятор с шестью степенями свободы, который при необходимости может быть заменен на ряд различных инструментов, включая пенопластовые и термопластичные экструдеры, сварочный аппарат, водяной шланг или ковш. DCP может работать с бетоном, льдом, грунтом и пенополиуретаном.

Устройство работает в комбинации с некоторыми другими программами 3D-печати MIT, например, с программным обеспечением Foundry и с сохраняющими свою форму материалами. Разработчики утверждают, что для печати можно будет использовать также разнообразные биоматериалы — например, сено. Однако, DCP еще не готов работать на реальных строительных площадках. Команда хочет прежде оборудовать свою систему датчиками

ДОБАВИТЬ ?????????????????????????????????

1.5 Рабочая гипотеза

Для исследования и совершенствования рабочего процесса был принят напольный 3D принтер производства Сибирского федерального университета, Инженерно-строительного института ИСИ, который представлен на рисунке 10.

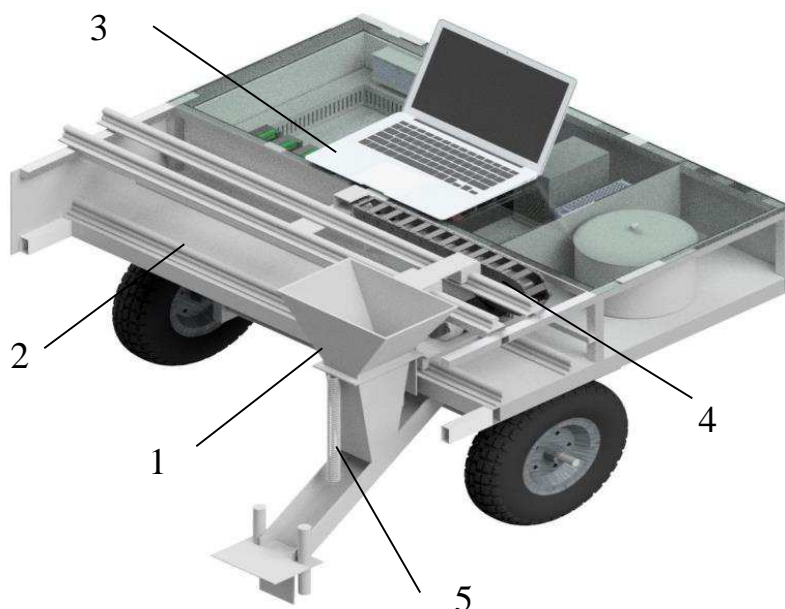


Рисунок 1.0 – Напольный 3D строительный принтер

Строительный 3D принтер представляет собой раму 2, на которой размещены экструдер 5; стальной трапециевидный бункер 1; электромотор – который приводит в движение подвижные органы оборудования; фиксаторы – датчик положения который расположен на бункере и предназначен для определения присутствия объекта (стеклофибробетонной, бетонной смесей) на расстоянии до 25мм; датчик линейного перемещения расположенный на передвижном устройстве; датчики температуры и давления для управления и

контроля состояния рабочих параметров привода напольного 3D строительного принтера; передвижное устройство 4 и сама система управления 3D принтером 3.

Наиболее важными элементами принтера являются экструдер 5 и бункер 1. Экструдер 3D принтера – это узел, который обеспечивает подачу рабочей смеси из бункера в рабочую зону аппарата. В качестве системы управления напольным 3D принтером используется установленный на раму ноутбук, с помощью которого задается и отслеживается весь процесс изготовления конструкций и изделий.

Выводы:

В результате литературного обзора можно сделать выводы, что аддитивные технологии в строительной сфере набирают большие темпы в своем развитии. Преимущества аддитивных технологий заключается в уменьшении количественных отходов производства, сокращение сроков строительства и изготовления конструкций, сокращение энергетических и трудовых затрат на строительство и др.

Внедрение аддитивных технологий можно рассматривать как элемент стратегии по реализации концепции «бережливого производства». Данные технологии, несмотря на препятствия, способны упростить функционирование производственной и логистической цепи за счет автоматизации процессов и устранения потерь, и тем самым значительно увеличить темпы роста доступного жилья на строительном рынке.

ГЛАВА 2 МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА 3D ПЕЧАТИ

2.1 Описание среды моделирования

Для разработки модели 3D строительного принтера требуется проведение теоретических исследований на основе математических моделей. Моделирование – это процесс построения модели объекта и исследования его свойств путем исследования модели.

Под моделью понимается физический или абстрактный объект, свойства которого в определенном смысле сходны со свойствами исследуемого объекта. При этом требования к модели определяются решаемой задачей и имеющимися средствами. Существует ряд общих требований к моделям:

- Адекватность – достаточно точное отображение свойств объекта;
- Полнота – предоставление получателю всей необходимой информации об объекте;
- Гибкость – возможность воспроизведения различных ситуаций во всем диапазоне изменения условий и параметров;
- Трудоемкость разработки должна быть приемлемой для имеющегося времени и программных средств.

Теория математического моделирования обеспечивает выявление закономерностей протекания различных явлений или работы систем и устройств путем их математического описания и моделирования без проведения натурных испытаний. При этом используются положения и законы математики, описывающие моделируемые явления, системы или устройства на некотором уровне их идеализации.

Целью математического моделирования является анализ реальных процессов математическими методами. В свою очередь, это требует формализации математического процесса, подлежащего исследованию. Модель

может представлять собой математическое выражение, содержащее переменные, поведение которых аналогично поведению реальной системы.

Математическое моделирование для исследования характеристик систем можно разделить на аналитическое, имитационное и комбинированное.

Для аналитического моделирования характерно, что процессы функционирования системы записываются в виде некоторых функциональных соотношений (алгебраических, дифференциальных, интегральных уравнений).

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.

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

Реализации математического моделирования осуществляется в программной среде MATLAB-Simulink с помощью блоков различных библиотек.

MATLAB – это высокоуровневый язык и интерактивная среда для программирования, численных расчетов и визуализации результатов. С помощью MATLAB можно анализировать данные, разрабатывать алгоритмы, создавать модели и приложения.

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

Язык, инструментарий и встроенные математические функции позволяют вам исследовать различные подходы и получать решение быстрее, чем с использованием электронных таблиц или традиционных языков программирования.

Одной из наиболее привлекательных особенностей системы MATLAB является наличие в ее составе наиболее наглядного и эффективного средства составления программных моделей – пакета визуального программирования Simulink.

Пакет Simulink позволяет осуществлять исследование (моделирование во времени) поведения динамических нелинейных систем, причем введение характеристик исследуемых систем осуществлять в диалоговом режиме, путем графической сборки схемы соединений элементарных (стандартных или пользовательских) звеньев. В результате такого составления получается модель исследуемой системы.

Для исследования влияния основных параметров на подвеску привода 3D строительного принтера при воздействии вибрационных нагрузок используем динамическую модель 3D принтера, которая представлена на рисунке 2.1 в виде отдельных блоков и связей.

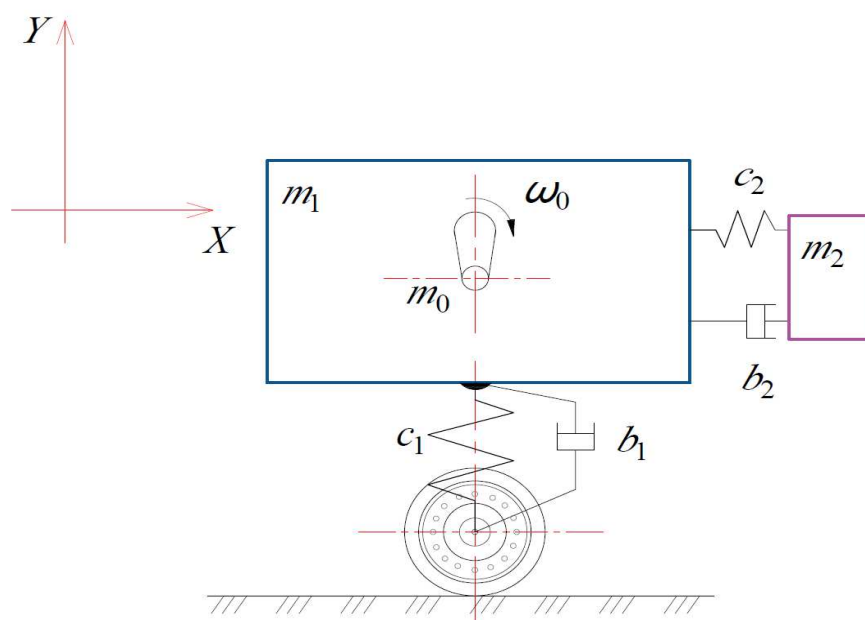


Рисунок 2.1 – Динамическая модель строительного 3D принтера:

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

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.

2.2 Математическая модель поведения подвески привода 3D строительного принтера при воздействии вибрационных нагрузок

Анализ исследований в рассматриваемой области показал недостаточно изученный вопрос о поведении 3D строительного принтера при воздействии на него нагрузок различного характера непосредственно при производстве конструкций и изделий. Необходимо исследовать, как влияет используемая рабочая смесь при печати строительных конструкций и воздействующие вибрационные нагрузки на подвеску привода 3D строительного принтера.

Рассмотрим математическую модель, учитывающую массу рабочей смеси и 3D принтера их жесткость и динамические характеристики. Необходимо определить значения самих параметров, дать рекомендации по их значениям в процессе производства строительных конструкций. Допущения, принятые при составлении математической модели, приведены в разделе 2.2. Исходные данные.

Математическое описание модели:

Основная идея 3D-принтера – такая же, как и у картезианского робота. Это машина, которая может двигаться линейно в трех измерениях – по осям X, Y и Z, так же известные как картезианские координаты. Чтобы это делать, 3D-принтер имеет шаговые двигатели с цилиндрическими редукторами, которые

могут двигаться с высокими точностью и аккуратностью – обычно на 1,8 градуса на шаг. Принтер оснащен приводами, позволяющими быстро и точно перемещать печатающую головку. Эти «трехмерные» роботы управляются контроллером, как и любая другая автоматизированная система, и тем самым имеется возможность перемещать печатающую головку, выдавливающую бетонную смесь, создавая конструкции слой за слоем. Диапазон движения приводов ограничен механическим или оптическим фиксатором. Другими словами, это просто ограничители, которые подают принтеру сигнал, что он подошел к краю рабочей поверхности, чтобы предотвратить выход за рамки рабочей платформы. Наличие фиксаторов позволяет делать принтеру калибровку положения перед началом каждого процесса печати, что позволяет сделать печать более аккуратной и точной.

Уравнения движения рассматриваемой системы при наличии возмущения со стороны движения описывается следующими дифференциальными уравнениями

$$m_1 \cdot \ddot{z}_1 + b_1 \cdot \dot{z}_1 + b_2 \cdot (\dot{z}_1 - \dot{z}_2) + c_1 \cdot z_1 + c_2 \cdot (z_1 - z_2) = F, \quad (2.1)$$

$$m_2 \cdot \ddot{z}_2 + b_2 \cdot (\dot{z}_2 - \dot{z}_1) + c_2 \cdot (z_2 - z_1) = 0, \quad (2.2)$$

где $F = m_0 \cdot r_0 \cdot \omega^2 \cdot \sin(\omega \cdot t)$,

m_1 – масса тележки;

m_2 – масса рабочей смеси в бункере;

c_1, b_1 – жесткость и демпфирование рабочей смеси;

c_2, b_2 – жесткость и демпфирование тележки;

m_0 – масса дебаланса вибратора;

r_0 – радиус эксцентриситета;

ω – угловая частота вращения дебаланса;

t – время;

$z_i, \dot{z}_i, \ddot{z}_i$ – обобщенные координаты и их производные по времени.

Преобразуем уравнения движения к виду:

$$\ddot{z}_1 = -\frac{1}{m_1} \cdot (b_1 + \dot{z}_1 + b_2 \cdot (\dot{z}_1 - \dot{z}_2) + c_1 \cdot z_1 + c_2 \cdot (z_1 - z_2)) - F, \quad (2.3)$$

$$\ddot{z}_2 = -\frac{1}{m_2} \cdot (b_2 \cdot (\dot{z}_2 - \dot{z}_1) + c_2 \cdot (z_2 - z_1)), \quad (2.4)$$

Главным критерием работоспособности в режиме воздействия на 3D принтер динамических нагрузок является амплитуда колебаний бункера и ее вторая производная ускорения. Для обеспечения минимизации вибрационных сил в конструкции виброформовочной установки предусмотрены гасители вибрации в виде амортизирующих элементов. 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, жесткость амортизатора, жесткость бункера, время работы.

Блок-диаграммы каждого блока модели в пакете 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 2.2. 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:

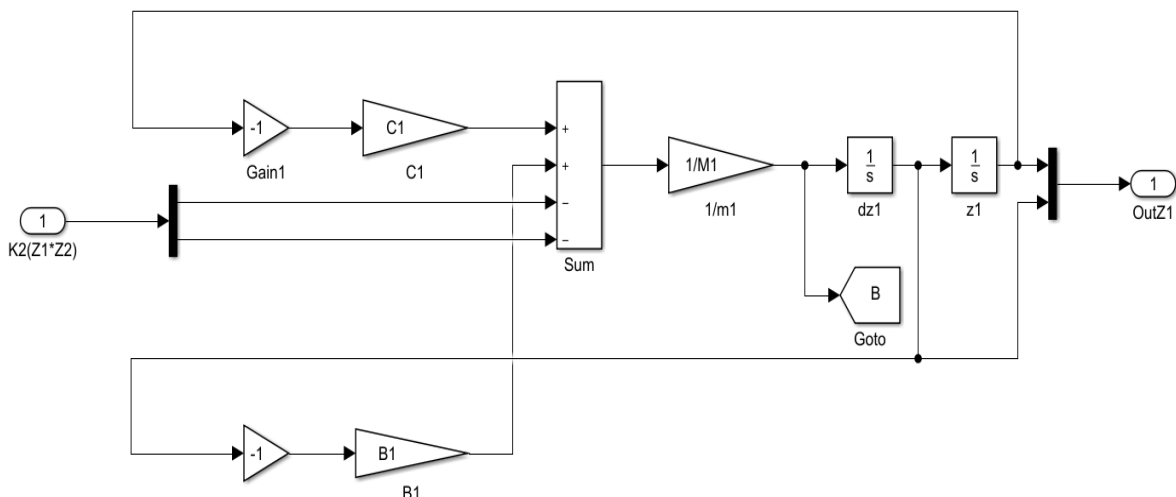


Рисунок 2.2 – Подсистема, описывающая колебания рабочей смеси в бункере

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

1) 5 блоков Gain. Gain – блок усилителя, который выполняет умножение входного сигнала на постоянный коэффициент. В параметрах блоков определен способ выполнения операции, значение параметра которого выбран из предложенного списка: Element-wise $K*u$ – поэлементный. Масса рабочей ($m1$) смеси в бункере, равна при использовании бетонной тяжелой смеси 55кг и 49,5 кг при использовании стеклофибробетонной смеси. Демпфирование 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 внутренний.

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

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

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

7) 1 блок Demux. Demux — демультиплексор, 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 2.3.

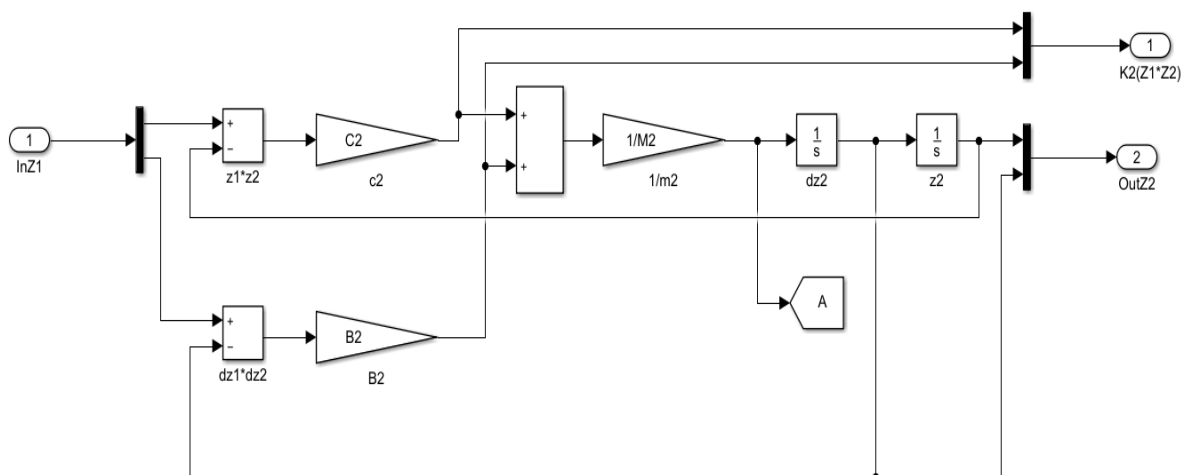


Рисунок 2.3 – Подсистема, описывающая колебания рамы 3D принтера

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

1) 3 блока Gain. В параметрах блоков определен способ выполнения операции, значение параметра которого выбран 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. Для блоков были выбраны следующие параметры:
 - внешний сброс не выполняется;
 - источник начального значения выходного сигнала внутренний.
- 4) 2 блока Outport.
- 5) 1 блок Import.
- 6) 1 блок Mux.
- 7) 2 блока Demux.

Соответствующее значение функции $Z1$ является выходом подсистемы OutZ2.

Сформируем окончательный вид модели поведения подвески привода 3D строительного принтера при воздействии вибрационных нагрузок. Результат модели приведен на рисунке 2.4.

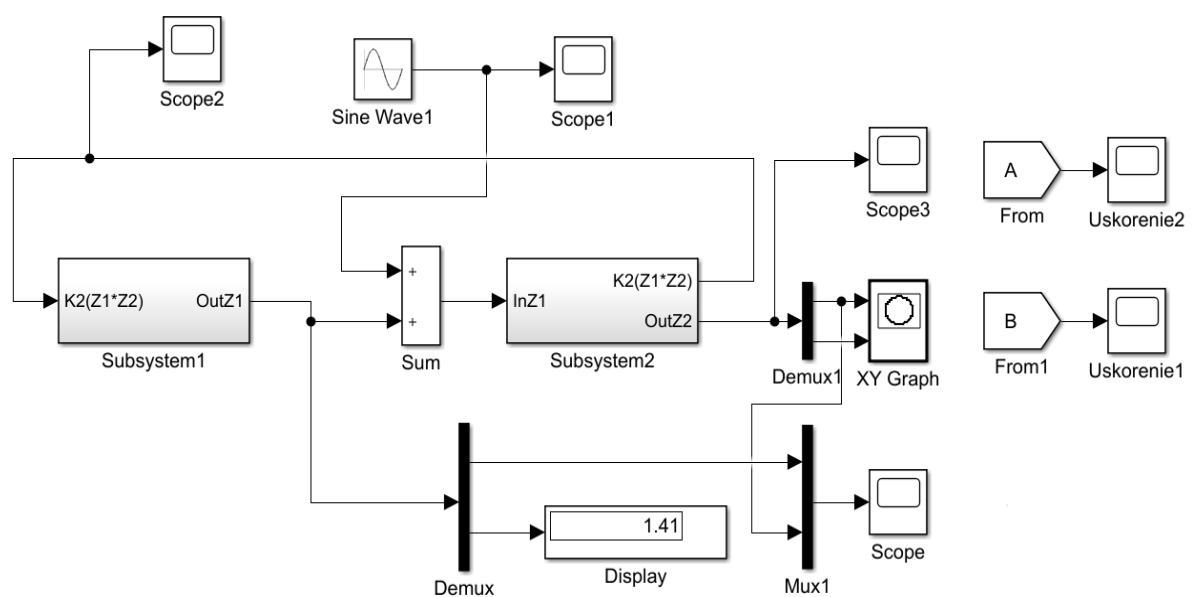


Рисунок 2.4 – Simulink-модель 3D строительного принтера

Система состоит из следующих блоков:

- 1) 2 блока подсистем. Subsystem – фрагмент Simulink-модели, оформленный в виде отдельного блока. Подсистемы необходимы для следующих целей:

- уменьшает количество одновременно отображаемых на экране блоков, что облегчает восприятие модели;
- позволяет создавать и отлаживать отдельные фрагменты модели, что повышает технологичность создания модели;
- позволяет создавать собственные библиотеки;
- позволяет синхронизировать параллельно работающие подсистема;
- позволяет включить в модель собственные справочные средства;
- позволяет связывать подсистему с M-файлом, обеспечивая запуск этого файла при открытии подсистемы.

Subsystem1 – подсистема OutZ1, Subsystem2 – подсистема OutZ2.

2) 1 блок Sine Wave. Он формирует синусоидальный сигнал с заданной частотой, амплитудой, фазой и смещением, связан с сумматором и стандартным блоком выхода Scope, на который он подает вектор выходных величин. Амплитуда задана формулой $m0*r0*(2*\pi*f0)^2$, а частота воздействия (рад/сек) задана выражением $2*\pi*f0$. 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. Это цифровой дисплей, который отображает значение сигнала в виде числа. Формат отображения данных, принимает 5ти значения, включая десятичную точку. Для создания XYplot были заданы значения диапазонов $xmin=0$, $xmax=0,1$, $ymin=-0,5$, $ymax=0,5$. Время обработки задано 0,01.

6) 6 стандартных блоков Scope. Scope – блок осциллографа. Строит графики исследуемых сигналов как функций времени.

3.1 Методика проведения измерений

Целью экспериментальных исследований является сбор данных от параметров аддитивных технологий. Экспериментальные исследования, выполненные при полевых испытаниях преследовали цель доказательства применения системы 3D монолитного формирования строительных конструкций.

Задачи экспериментальных исследований:

- 1) Разработка методики автоматизированного сбора экспериментальных данных;
- 2) Создание измерительного комплекса на основе ЭВМ, оснащение регистрирующей аппаратурой;
- 3) Проведение лабораторных и полевых испытаний 3D строительным принтером;
- 4) Статистический анализ измеренных сигналов.

При натурных испытаниях 3D принтера основные задачи заключались в определении динамических характеристик оборудования, параметров колебательного процесса формирования стеклофибробетонных конструкций, влияние вибраций на самовозбуждение бункера. Эти параметры определялись при варьировании величин внешней нагрузки и конструктивных решений 3D принтера. Натурные исследования проводились на лабораторной установке, приведенной на рисунке 3.1.

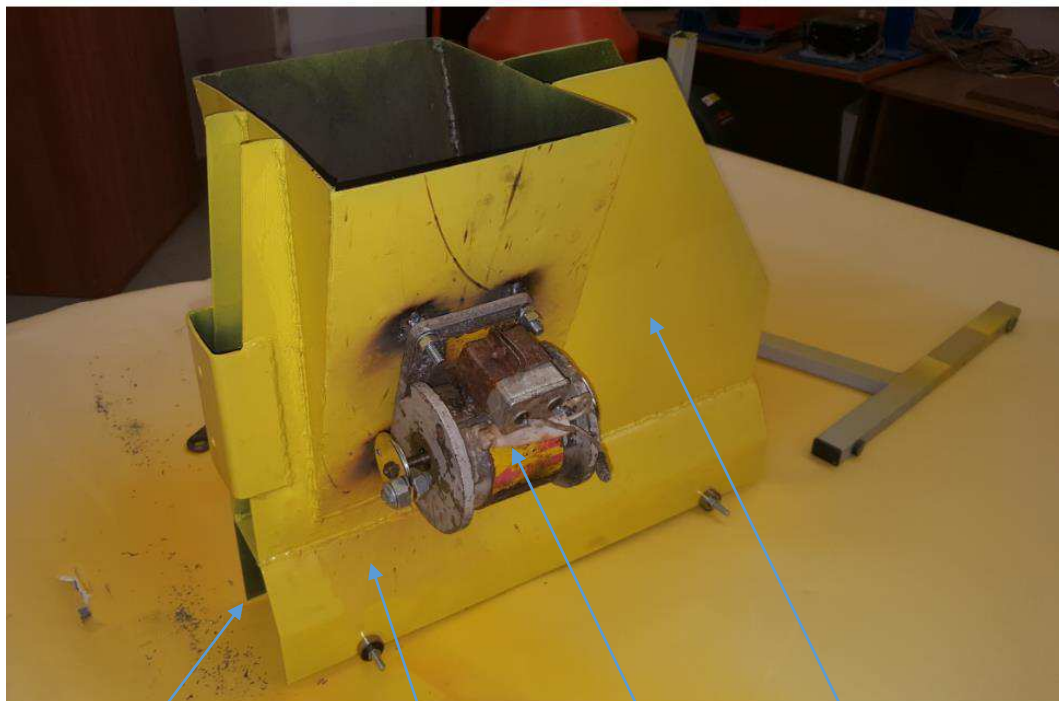


Рисунок 3.1 – Лабораторное оборудование:

1 - монолитный брус; 2 - скользящая опалубка; 3 - вибратор; 4 - бункер.

При движении оборудования смесь из бункера 4 поступает в скользящую опалубку 2 под воздействием вынуждающей силы, возникающей при работе вибратора 3. Растекаемость свежего бетона определялась акселерометром косвенно по амплитудно-частотным характеристикам вибрационного оборудования. При этом варьировалась вынуждающая сила вибратора. Точность измерений составляет около $\pm 2\%$. Диапазон измерений акселерометра охватывает частоты от 800 до 50 000 мин⁻¹, что соответствует примерно 14-833 Гц.

Растекаемость монолитного бруса зависит от состава бетонной смеси. В таблице 3.1 приведены классы растекаемости и уплотнения бетонной смеси в зависимости от категории бетона.

Таблица 3.1 - Характеристика бетона

Категория бетона по консистенции	Классы растекаемости		Классы уплотнения	
	Класс	Значение растекаемости, мм	Класс	Степень уплотнения v
очень жесткий	–	–	C0	$\geq 1,46$
жесткий	F1	≤ 340	C1	1,45 – 1,26
пластичный	F2	350 – 410	C2	1,25 – 1,11
мягкий	F3	420 – 480	C3	1,11 – 1,04
очень мягкий	F4	490 – 550		
текучий	F5	560 – 620		
очень текучий	F6	≥ 630		

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

При проведении экспериментов определялись динамические характеристики процессов виброформования:

– амплитуда и частота колебаний стенок вибробункера и скользящей опалубки;

– амплитуда и частота колебаний стеклофибробетонной смеси.

Параметры, определяемые в процессе экспериментов приведены в таблице

3.2

Таблица 3.2 – Определение экспериментальных параметров

Параметры	Аппаратура	Объект определенных параметров
Частота и амплитуда колебаний стенок бункера, Гц	Analog Devices с USB	колесо, отбойный брус
Плотность стеклофибробетонной смеси, кг/м ³	ВА - 2	то же
Масса компонентов стеклофибробетонной смеси, кг	Дозатор	то же
Прочность на сжатие, МПа	Шкала прессы	Пресс

Частота и амплитуда колебаний стенок бункера измерялись акселерометром Analog Devices с USB. Датчики измерения колебательного процесса устанавливали на торцевой стороне стенки бункера (рисунок 3.2). При полностью загруженном стеклофибробетоном вибробункере замерялись частота, и амплитуда колебаний смеси и стенок бункера на различных участках работы вибратора марки «ИВ-92»: 20; 40,5; 100Гц. Возбуждающее усилие от двух дебалансов составило: 8кН; минимальное – 2,4кН, для исследования были выбраны характерные точки на стенках бункера. Испытания проводились при двух состояниях бункера: загруженном и пустом.

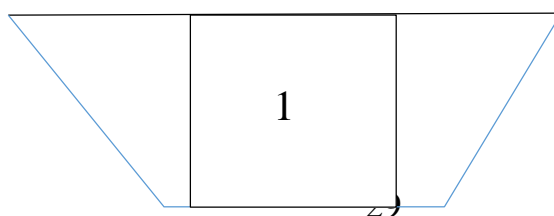


Рисунок 3.2 – Схема размещения датчиков на бункере
1 - акселерометр Analog Devices с USB

Для испытания конструкции на прочность применялись гидравлический пресс. Выбор прессы осуществлялся из условия, что ожидаемая разрушающая нагрузка должна составлять 0,8 максимального усилия. Образец устанавливается на нижней опорной плите таким образом, чтобы усилия сжатия было направлено параллельно слоям укладки стеклофибробетонной смеси. Образец центрировался относительно центра действия усилия прессы.

Прочность при сжатии определяется по формуле

$$R_{сж} = K_w \cdot \frac{P}{F}, \quad (3.1)$$

где K_w – коэффициент учитывающий влажность стеклофибробетона;
 P – усилие прессы;
 F – площадь поперечного сечения образца.

Минимальное число образцов для испытаний определялось по зависимости:

$$N = t^2 \cdot \frac{V^2}{P_2}, \quad (3.2)$$

где t – коэффициент обеспеченности;
 V – коэффициент изменчивости;

P – допустимая ошибка.

Оценка достоверности экспериментальных данных определяется точность измерений, выбором числа необходимых опытов, методами обработки результатов исследований и обоснованием сделанных допущений. Оценка точности измерения каждого параметра производилось следующим образом. Для параметра « X » определялась оценка математического ожидания:

Оценка дисперсии:

$$X = \frac{\sum x_t}{n_t}, \quad (3.3)$$

Оценка дисперсии:

$$\sigma^2 = \frac{1}{n-1} \sum (x_t - x_{cp})^2. \quad (3.4)$$

Коэффициент вариации:

$$P_x = 100 \frac{\sigma_x}{x}, \quad (3.5)$$

Показатель точности опыта:

$$\sigma = \frac{P_x}{n}. \quad (3.6)$$

После определения статических показателей проводилась оценка их достоверности. Для оценки математического ожидания определялись поверхностные границы:

$$Xt \pm \% \frac{\sigma_x}{n} . \quad (3.7)$$

Оценка расхождения между средними значениями:

$$t = \frac{x_1 - x_2}{\sigma_1 n_2 / (n_1 + n_2)} . \quad (3.8)$$

Оценка дисперсии групповых выборок по критерию Фишера:

$$F = \frac{\sigma_1^2}{\sigma_2^2} , \quad (3.9)$$

когда $F < F_{\text{табл.}}$.

Оценка тесноты связи между двумя признаками совокупности определялась для прямолинейной связи коэффициентов корреляции:

$$G = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{n^2} . \quad (3.10)$$

Основная ошибка коэффициента корреляции определялась по формуле:

$$m_r = \frac{1 - V^2}{n} . \quad (3.11)$$

Показатель достоверности коэффициента корреляции:

$$t_r = \frac{V}{m_r}. \quad (3.12)$$

При криволинейной связи определялось корреляционное отношение:

$$\zeta = \zeta = \frac{\sigma_{yx}}{n_y}, \quad (3.13)$$

где $\sigma_{xy} = \frac{\sum(x_i y_i - y_i)}{n}$.

При предварительном определении необходимого числа опытов предполагалось, что абсолютное отклонение средней X при n_i -том измерений величины X не превзойдет доли того стандарта (нормального закона распределения средней квадратичной ошибки), которые дают нам измерения, т. е.:

$$q = \frac{t_a}{\sum n}, \quad (3.13)$$

Предполагая, что $q = 1$, то есть предельное абсолютное отклонение равно стандарту проводимых измерений, а вероятность ожидания $\beta = 0,95$ определяем минимальное число измерений, которое позволяет получить значения измеряемых параметров с заданной степенью точности. В нашем случае для $\beta = 0,95$ и $q = 1,00$; число измерений $n_i = 7$. Поэтому при проведении экспериментальных исследований тормозных процессов все измерения, соответствующие одному опыту, повторялись не менее 7-ми раз.

Точность измерений уточнялась в процессе исследований по формуле

$$\sigma = \frac{100\sigma_x}{x \sum n_i}, \quad (3.14)$$

затем по таблице [14] уточнялось число опытов n_i по определённой величине σ .

Исключение грубых ошибок, полученных в процессе измерений проводилось по формуле Стьюдента:

$$V = \frac{x_{\max} - x}{\sigma_x}, \quad (3.15)$$

где X_{\max} – максимальное значение полученной величины параметра;

X – среднее арифметическое;

σ_x – среднеквадратичное выборки.

При получении величины большей табличного значения X_{\max} исключается из выборки как грубый результат.

Для сглаживания экспериментальных данных использовался метод наименьших квадратов. Исходя из нормального закона распределения ошибок и требований наибольшей вероятности, данной совокупности значений ошибок, функция аппроксимированной кривой должна отвечать условию:

$$\sum (y_i - f(x))^2 = \min, \quad (3.16)$$

то есть, чтобы сумма квадратов отклонений опытных значений y_i от $f(x_i)$ была наименьшей.

Выбор типа кривой $Y = f(x)$ является ответственной и вместе с тем достаточно затруднительной частью работы, поэтому результаты

экспериментальных исследований обрабатывались на ЭВМ. Конечной целью исследований было отыскание уравнений регрессии: зависимости средних Y от X . Однако получить средние значения Y для всех допустимых значений параметра « X » невозможно, поэтому проводилось отыскание уравнения приближённой регрессии. Для оценки степени приближения функции аппроксимированной кривой применялся метод наименьших квадратов. После определения уравнения приближённой регрессии проводился его статистический анализ. Адекватность полученной модели для парной корреляции проверялась по величине относительной ошибки, для множественной корреляции – по критерию Фишера:

$$F = F(k_1 k_2), \quad (3.17)$$

где k_1, k_2 – количество степеней свободы для дисперсии опыта и дисперсии адекватности соответственно.

Проверка коэффициентов уравнения регрессии на существенность проводилась по зависимости:

$$b_i = t_{\alpha}(f), \quad (3.18)$$

где b_j – абсолютное значение параметра;
 $t_{\alpha}(f)$ – табличное значение параметра по критерию Стьюдента.

Определялся коэффициент детерминации, показывающий величину влияния учтенных факторов на выходной параметр по формуле

$$D = r_{mm}^2, \quad (3.19)$$

где r^2_{MH} – множественный коэффициент корреляции.

После проведения экспериментов с использованием полного факторного эксперимента уравнения регрессии проверяются на воспроизводимость и адекватность. Дисперсия воспроизводимости определяется по формуле

$$\sigma^2_{y(\text{восп})} = \frac{\sum \sum (y_{ij} - y_i)^2}{n(m-1)}, \quad (3.20)$$

где n – число сторон в матрице планирования;

m – число параллельных опытов;

y_{ij} – условные опытные значения в i -ой строке,

Y_j – om столбце соответственно;

y_i – среднее значение параметра.

Дисперсия неадекватности:

$$\sigma^2_{\text{неад}} = \frac{m \sum (y_{iор} - y_{iрас})^2}{n-d}, \quad (3.21)$$

где d – число значащих коэффициентов в модели;

$y_{iрас}$ – расчётное значение параметра;

$y_{iор}$ – действительное значение параметра.

Структурно-логическая схема экспериментальных исследований 3D принтера приведена на рисунке 3.3.

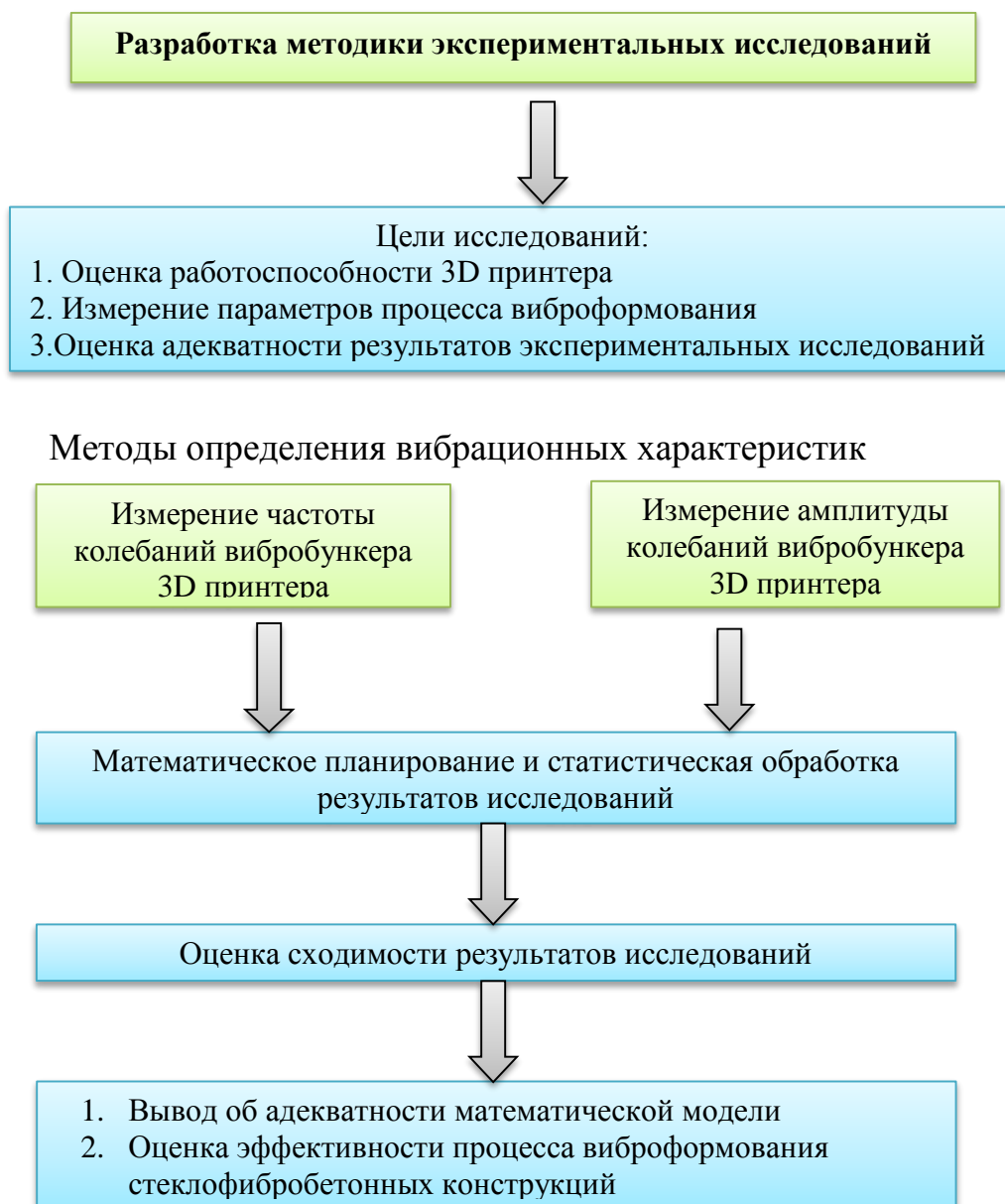


Рисунок 3.3 – Структурно-логическая схема экспериментальных исследований

3.2 Разработка системы измерений

На рисунке 3.4 приведена функциональная схема управления напольным приводом 3D принтера.

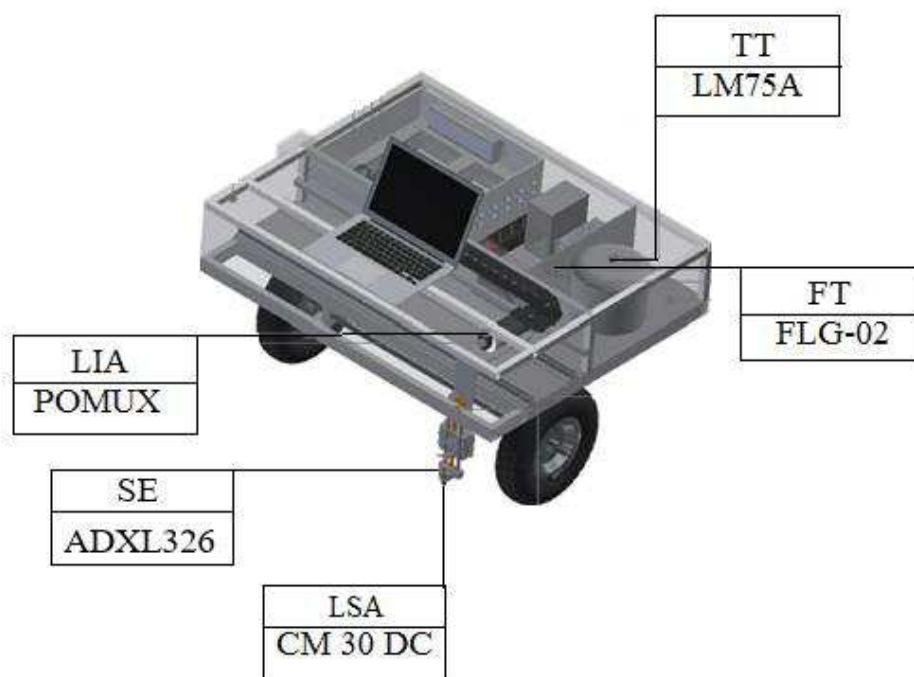


Рисунок 3.4 – Функциональная схема управления напольным приводом 3D принтера: 1 – тележка; 2 – каретка; 3 – форсунка; 4 – подача краски

В напольном 3D принтере применяются следующие датчики:

- 1) Датчик положения марки CM 30 DC;
- 2) Датчик линейного перемещения марки POMUX KH 53;
- 3) Тензодатчик давления FLG-02;
- 4) Датчик температур марки LM75A;
- 5) Акселерометр марки ADXL326.

Датчик положения – устройство, формирующее выходной сигнал (это может быть напряжение, ток, цифровой код) при прохождении объекта управления через определенную точку в пространстве, фиксируя наличие объекта в зоне чувствительности датчика.

Емкостный датчик положения предназначен для определения присутствия объекта (стеклофибробетонной, бетонной смесей) на расстоянии до 25мм. Датчик определяет приближение и присутствие объектов (стеклофибробетонной, бетонной смесей) и используется для мониторинга

уровня заполнения бункера смесью. В емкостном датчике положения чувствительным элементом является электрическая емкость конденсатора в колебательном контуре. Перемещение смеси между двумя пластинами конденсатора изменяет диэлектрическую проницаемость среды между пластинами, и электрическую емкость конденсатора. При этом нарушается условие электрического резонанса в колебательном контуре, что приводит к срыву колебаний генератора и появлению сигнала на выходе датчика.

Емкостный бесконтактный датчик функционирует следующим образом:

1) Генератор обеспечивает электрическое поле взаимодействия с объектом.

2) Демодулятор преобразует изменение амплитуды высокочастотных колебаний генератора в изменение постоянного напряжения.

3) Триггер обеспечивает необходимую крутизну фронта сигнала переключения и значение гистерезиса.

4) Усилитель увеличивает выходной сигнал до необходимого значения.

5) Светодиодный индикатор показывает состояние выключателя, обеспечивает работоспособность, оперативность настройки.

6) Компаунд обеспечивает необходимую степень защиты от проникновения твердых частиц и воды.

7) Корпус обеспечивает монтаж выключателя, защищает от механических воздействий. Выполняется из латуни или полиамида, комплектуется метизными изделиями.

Емкостный датчик положения высокочувствителен и прост в конструкции, однако меняет свои характеристики в зависимости от запыленности и температуры. Датчик устойчив к воздействию электромагнитных полей и соответствует классу защиты IP 67 для работы в тяжелых условиях эксплуатации. Емкостный датчик приведен на рисунке 3.5. Условное обозначение на функциональной схеме (рисунок 27) LSA^H/CM 30 DC.



Рисунок 3.5 – Емкостный датчик положения CM 30 DC

Технические характеристики емкостного датчика CM 30 DC сведены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Технические параметры емкостного датчика CM 30 DC

Технические параметры	Значения
Габаритные размеры	M30, шаг резьбы 1,5мм
Материал корпуса	пластик
Схема подключения	4-проводная DC
Напряжение питания	10...40В постоянного тока
Непрерывный ток	$\leq 200\text{mA}$
Тип выходного сигнала	PNP/NPN
Состояние выхода	НО/НЗ
Тип монтажа	выступ./уплотн.
Диапазон измерений	16мм/25мм

Подключение	кабель/разъем M12, шаг резьбы 1мм
Класс защиты	IP67
Частота срабатывания	50/с
Защита от короткого замыкания	есть
Защита от переплюсовки	есть

Датчик перемещений - измеряет линейное или угловое перемещение. Различают аналоговые и цифровые измерители перемещений. В аналоговых измерителях выходная величина измеряется непрерывно, в зависимости от величины перемещения объекта. Датчик представляет собой переменный резистор, к которому приложено питающее напряжение, его входной величиной является линейное перемещение токосъемного контакта, а выходной величиной - напряжение, снимаемое с этого контакта, изменяющееся по величине при изменении его положения. Датчики основаны на простом принципе действия, что приводит к конструкциям умеренной стоимости; измеряемый сигнал может иметь достаточно высокий уровень и линейность и не требует специальной электрической схемы обработки. Однако, такой датчик обладает внутренним трением, которое влияет на его точность, являясь источником шумов и причиной износа, что влечёт за собой ухудшение характеристик (линейности, точности) и устанавливает предел количества измерений, которое датчик может выдержать. Кроме этого, на его функционирование заметно влияет окружающая атмосфера (влажность, пыль, температура...).

Преимущества потенциометрических датчиков: простота конструкции; малые габариты и вес; высокая степень линейности статических характеристик; стабильность характеристик; возможность работы на переменном и постоянном токе.

Линейный энкодер Romix KH53 компании SICK AG позволяет осуществлять бесконтактные измерения, не требуют технического

обслуживания и характеризуются надежностью, прочностью и долговечностью. Датчик линейного перемещения приведен на рисунке 3.6. Условное обозначение на функциональной схеме (рисунок 27) LIA/POMUX KH 53.

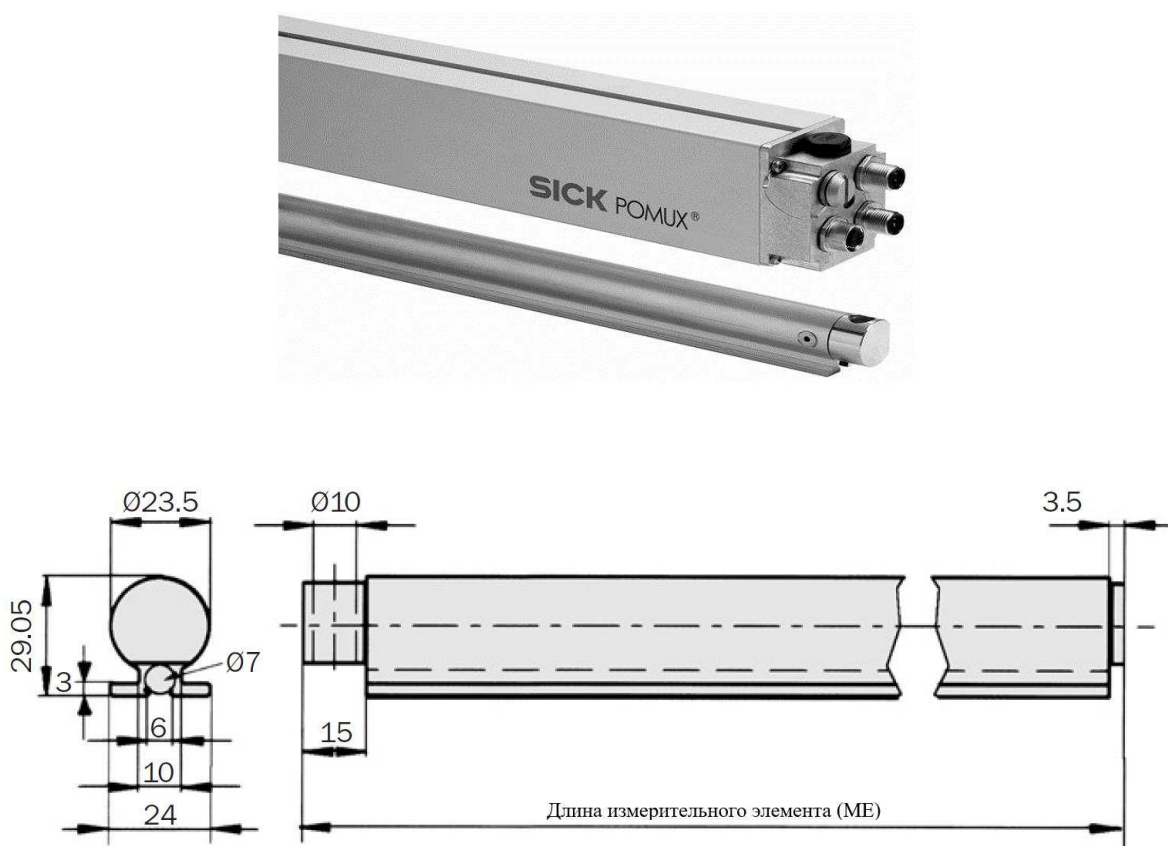


Рисунок 3.6 – Датчик линейного перемещения POMUX KH 53

Технические характеристики датчика линейного перемещения POMUX KH 53 сведены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Технические параметры датчика линейного перемещения POMUX KH 53

Технические параметры	Значения
Диапазон измерений	до 1700м
Разрешение	0,1мм

Повторяемость	30мкм
Интерфейс	SSI, RS 422, Profibus
Напряжение питания	10...32В постоянного тока
Диапазон рабочих температур	-20...60 ^{0С}
Подключение	кабель или круглый резьбовой разъем
Класс защиты	PI65/IP66
Максимальная скорость обработки	6,6м/с
SSI	0,8мс
RS 422	0,9мс
Profibus	1,1мс

Для управления и контроля состояния рабочих параметров привода напольного 3D строительного принтера используются датчик температур и тензодатчик давления. Управление подразумевает регулировку или изменение режимов работы привода 3D принтера (включение и выключение, изменение скорости или момента), а контроль необходим для безопасной и надежной работы привода (отсутствие перегрева, адекватная реакция на резкое изменение нагрузки и т.п.).

Датчик температур - используется в системах автоматического управления, в которых лежит принцип преобразования измеряемой температуры в электрическую величину. Это обусловлено следующими достоинствами электрических измерений: электрические величины удобно передавать на расстояние, причем передача осуществляется с высокой скоростью; электрические величины универсальны в том смысле, что любые другие величины могут быть преобразованы в электрические и наоборот; они точно преобразуются в цифровой код и позволяют достигнуть высокой точности, чувствительности и быстродействия средств измерений.

Полупроводниковые датчики регистрируют изменение характеристик р-п

перехода под влиянием температуры. В качестве термодатчиков могут быть использованы любые диоды или биполярные транзисторы. Пропорциональная зависимость напряжения на транзисторах от абсолютной температуры (в Кельвинах) дает возможность реализовать довольно точный датчик.

Достоинства таких датчиков — простота и низкая стоимость, линейность характеристик, маленькая погрешность. Кроме того, эти датчики можно формировать прямо на кремневой подложке.

Цифровой температурный датчик LM75A, производства Philips Semiconductors, pin-to-pin совместим с индустриальным стандартом LM75, но имеет более высокое разрешение и расширенный диапазон напряжений питания. Микросхема содержит термочувствительный элемент, 11-ти битный дельта-сигма АЦП, схему сброса, тактовый генератор, не требующий внешних компонентов, а также регистр конфигурации, измеренной температуры, пороговой температуры, гистерезиса и логику управления и реализации I2C протокола (три адресных вывода позволяют присвоить индивидуальный адрес устройства, обеспечивая подключение на шину до восьми термометров). Кроме этого ЧИП включает цифровой компаратор с каскадом усиления на полевом транзисторе с открытым стоком. Датчик температур приведен на рисунке 3.7. Функциональная схема приведена на рисунке 3.8.



Рисунок 3.7 – Датчик температур LM75A

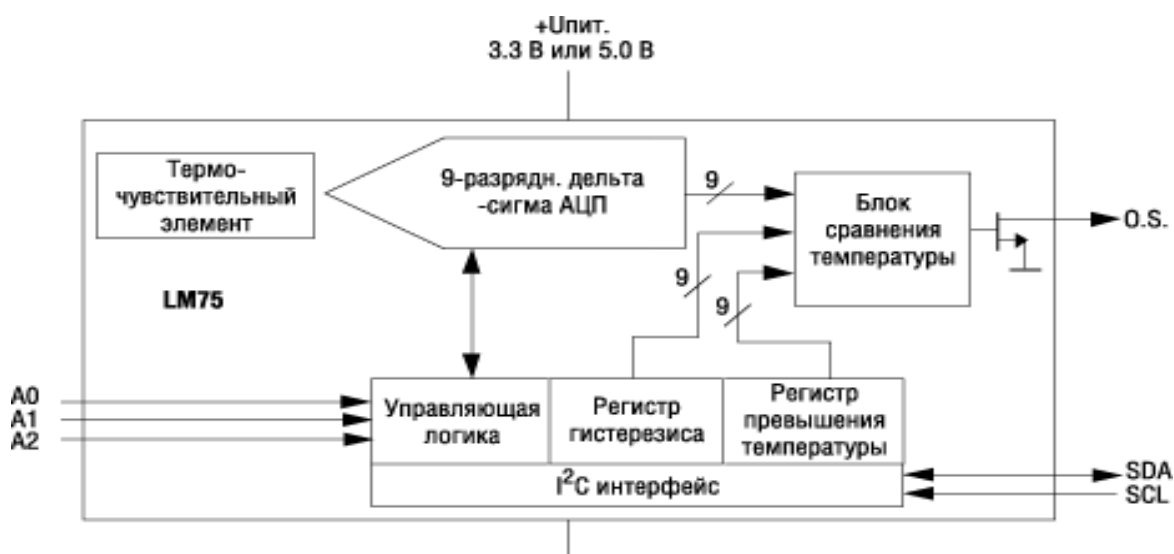


Рисунок 3.8 – Функциональная схема датчика

Технические характеристики датчика температур LM75A сведены в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Технические параметры датчика температур LM75A

Технические параметры	Значения
Диапазон измеряемой температуры	-55...+150 ⁰ C
Погрешность	±2,0 ⁰ C
Разрешение	0,1250 ^C
Время преобразования	0,1с
Напряжение питания	2,5...5,5В
Выходные сигналы	I2C
Корпус	TSSOP-8
Измерительный ток	10мА

Датчик (тензодатчик) давления – это устройства, которые могут преобразовать механическую деформацию тела в электрический сигнал, который позволяет определить уровень растяжения и сжатия конкретного

предмета. При растяжении проводящих элементов тензорезистора увеличивается их длина и уменьшается поперечное сечение, что увеличивает сопротивление тензорезистора, при сжатии — уменьшается.

Индикатор с фольговым элементом используется как наклеиваемый тензодатчик. Это очень удобная система, которая представляет собой фольговую ленту, толщиной до 12 мкм. Часть пленки имеет плотную форму, а часть — решетчатую. Данная модель отличается от остальных тем, что можно припаивать дополнительные контакты, к тому же они нормально переносят низкие температуры. Устройство изготовлено из чувствительного тензорезистора, который производится из тензоматериалов. Чаще всего это фольга или алюминиевая проволока с небольшим сечением. Как и прочие весовые приборы, резистор реагирует на изменение постоянного сопротивления на контактах, которое происходит в результате воздействия всестороннего сжатия.

Тонкопленочные фольговые тензорезисторы FLG-02 на основе сплава Cu-Ni толщиной от 0.003 до 0.007 мм. Подложка на основе эпоксидной резины толщиной 0.03 мм с повышенными электроизоляционными свойствами. Подложка имеет цветную маркировку в зависимости от температурного коэффициента линейного расширения материала. Датчик давления приведена на рисунке 31. Условное обозначение на функциональной схеме (рисунок 3.9) FT/FLG-02

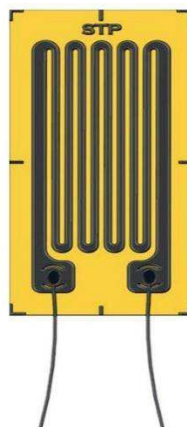


Рисунок 3.9 – Датчик давления FLG-02

Технические характеристики датчика давления FLG-02 сведены в таблице 3.6.

Таблица 3.6 – Технические параметры датчика давления FLG-02

Технические параметры	Значения
Тип	FLG-02-11-17
Номинальная база, LxW	0,2x1,4мм
Подложка, LxW	3,5x2,5мм
Сопротивление	120Ом
Допустимая рабочая температура	-20...+80 ⁰ С
Измеряемая деформация, мкм/м не более	±3 000
Чувствительность	1,9-2,3

Схема измерения приведена на рисунке 310.

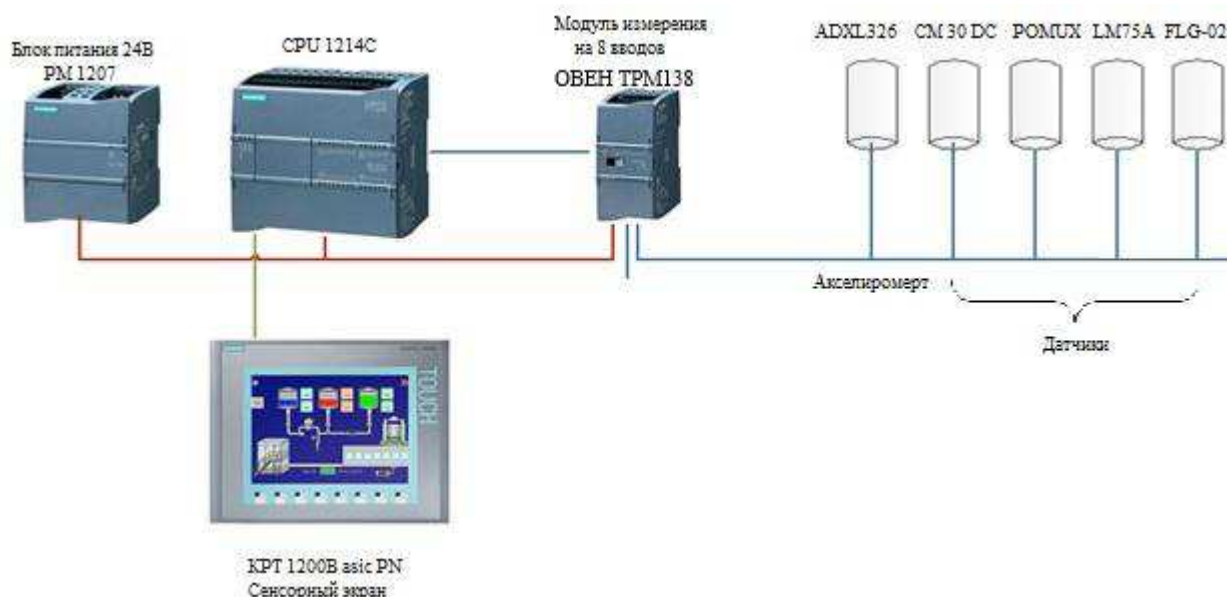


Рисунок 310 – Схема измерений

Вибрация ходовой тележки определялась с целью определения ее на точность позиционирования. В процессе измерений величины вибрации использовались цифровые акселерометры USB выполненные на базе микросхемы цифрового MEMS-акселерометра Analog Devices, которые могут

работать как при наличии микросхемы энергонезависимой памяти на плате, так и без нее.

Акселерометр USB без микросхемы памяти работает только, будучи подключенным к USB компьютера, питание также подается по USB. После каждого измерения акселерометр USB передает результаты в компьютер.

Технология iMEMS (integrated MEMS) от Analog Devices представляет собой разновидность технологии MEMS (Micro Electro Mechanical Systems), позволяющую совмещать на одном кристалле микроэлектромеханические устройства с традиционными элементами интегральных схем.

На специально отделенный участок кристалла наносится диоксид кремния (так называемый «жертвенный» слой), проводится литография, вскрываются «окна» для подсоединения микромеханического сенсора к электрической схеме и одновременного получения «якорей», удерживающих конструкцию сенсорной части датчика на кремниевой подложке. Далее сверху наращивается слой поликристаллического кремния, затем посредством литографии и травления поликремния создается сенсорная структура.

Прилагаемое программное обеспечение позволяет выбрать:

- диапазон измеряемых ускорений акселерометра USB $\pm 2g$, $\pm 4g$, $\pm 8g$ или $\pm 16g$;
- частоту выборки акселерометра USB 3200 Гц, 1600 Гц, 800 Гц, 400 Гц, 200 Гц, 100 Гц, 50 Гц, 25 Гц, 12,5 Гц или 6,25 Гц.

На рисунке 3.11 приведен общий вид акселерометра Analog Devices серии ADXL326.



Рисунок 3.11 – Цифровой акселерометр Analog Devices USB серии ADXL326

Программное обеспечение позволяет управлять акселерометром, считывать результаты измерения, отображать их в виде графиков ускорения и сохранять полученные данные в виде файлов.

Акселерометр с памятью работает автономно при питании от стабилизированного источника напряжения +3,3В. Потребляемый ток 10мА. Для источника питания акселерометра можно использовать микросхему LM1117DTX-3,3 (стабилизатор фиксированного напряжения 3,3В) и четыре батарейки или аккумулятора – на входе микросхемы должно быть напряжение от +4,75В до 10В. Управление выбором режима акселерометра выполняется по USB, затем акселерометр отключается от USB, измерения могут выполняться на объектах, на которые установка компьютера невозможна. Энергонезависимость памяти акселерометра USB – хранение записанных в памяти данных не требует источника питания.

Технические характеристики акселерометра Analog Devices USB серии ADXL326 сведены в таблице 3.7.

Таблица 3.7 – Технические параметры акселерометра ADXL326

Технические параметры	Значения
Ускорение (макс)	16±g
Оси	XYZ
Нелинейность	0,3%
Чувствительность	57мВ/g
Частота среза	X,Y – 1600, Z – 500

Окончание таблицы 8

Технические параметры	Значения
Напряжение питания	от 1,8 до 3,6В
Потребляемый ток	350мкА
Диапазон рабочих температур	-40...85°С
Тип корпуса	LF CSP-16

Для определения, регистрации и регулирования физических параметров, был применен измеритель-регулятор марки ОБЕН ТРМ138 для управления датчиками и акселерометром вышеуказанных марок.

Измеритель-регулятор предназначен для измерения, регистрации и регулирования температуры либо другого физического параметра, одновременного управления несколькими (до 8-ми) исполнительными механизмами, а также для регистрации измеренных параметров на ЭВМ. Прибор производит измерение входных параметров объекта (температура, давление и т.п.) путем последовательного опроса включенных в работу датчиков и преобразования, полученных от них сигналов (по данным НСХ) в текущие цифровые значения. Кроме того, в процессе обработки сигналов осуществляется их фильтрация от помех и коррекция показаний в соответствии с заданными пользователем параметрами.

Восьмиканальный микропроцессорный измеритель-регулятор ТРМ138 предназначен для построения автоматических систем контроля и регулирования производственными технологическими процессами.

Во время работы прибор выполняет следующие основные функции:

- позволяет производить конфигурирование функциональной схемы и установку программируемых рабочих параметров с помощью встроенной клавиатуры управления;
- производит измерение физических параметров, контролируемых входными первичными преобразователями с учетом нелинейности их НСХ;
- осуществляет цифровую фильтрацию измеренных параметров от промышленных импульсных помех;
- позволяет производить коррекцию измеренных параметров для устранения погрешностей первичных преобразователей;
- осуществляет отображение результатов измерений на встроенном светодиодном четырехразрядном цифровом индикаторе;
- формирует аварийный сигнал при обнаружении неисправности первичных преобразователей с отображением его причины на цифровом индикаторе и при необходимости выводит его на внешнюю сигнализацию;
- формирует сигналы управления внешними исполнительными механизмами и устройствами в соответствии с заданными пользователем законами и параметрами регулирования;
- осуществляет отображение на встроенном светодиодном цифровом индикаторе заданных параметров регулирования;
- формирует команды ручного управления исполнительными механизмами и устройствами с клавиатуры прибора;
- осуществляет передачу компьютеру информации о значениях контролируемых датчиками величин и установленных рабочих параметрах, а также принимает от него данные на изменение этих параметров;
- производит сохранение заданных программируемых параметров в энергонезависимой памяти при отключении напряжения питания.

Условия эксплуатации:

- закрытые взрывобезопасные помещения без агрессивных паров и газов;
- температура окружающего воздуха от + 1°С до + 50°С;

- верхний предел относительной влажности воздуха 80% при 25°C и более низких температурах без конденсации влаги;
- атмосферное давление от 86 до 106,7 кПа.

На рисунке 3.12 приведен общий вид и функциональная схема измерителя-регулятора ОВЕН ТРМ138.

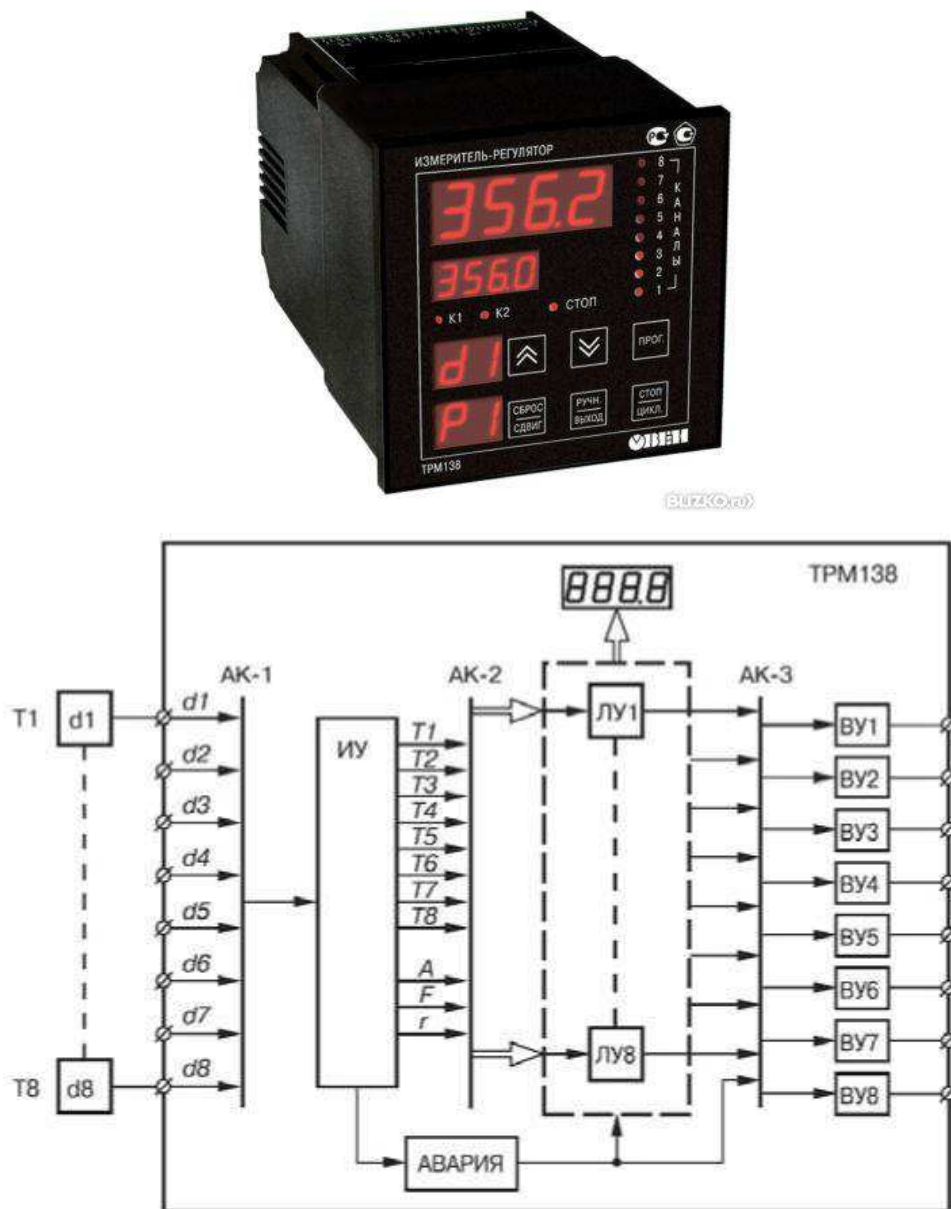


Рисунок 3.12 – Измеритель-регулятор ОВЕН ТРМ138

Технические характеристики измерителя-регулятора ОВЕН ТРМ138 сведены в таблице 3.8.

Таблица 3.8 – Технические параметры измерителя-регулятора ОВЕН ТРМ138

Технические параметры	Значения
-----------------------	----------

Диапазон напряжений питания	90...245В постоянн. или перемен. тока (47...63Гц)
Потребляемая мощность	не более 12 ВА
Количество каналов измерения	1...8
Время опроса одного канала	не более 0,6с
Количество каналов контроля	1...8
Количество выходных устройств	8
Напряжение источника питания активных датчиков	24±3В постоянн. тока (150мА макс.)
Интерфейс связи с компьютером	RS-485
Степень защиты корпуса	IP54
Габаритные размеры прибора	96x96x140мм
Масса прибора	не более 1,5кг

Для определения деформаций в готовых бетонных конструкциях и изделиях применены тензорезисторы КС-70-120-А1-11.

Тензорезисторы для определения деформаций в бетонных конструкциях и изделиях

Внутренние процессы, происходящие в бетоне при твердении, эксплуатации, нагружении, замерзании и самых различных воздействиях, часто находят свое внешнее выражение в виде деформаций всего материала. В основу метода замера деформаций тензорезисторами положен тензометрический эффект – изменение электрического сопротивления проводника и полупроводника при деформации.

Тензорезисторы представляют собой несколько близко расположенных петель константовой проволоки (в виде решётки), наклеенной специальным эластичным клеем на полоску тонкой бумаги.

К концам проволочной решётки для удобства электромонтажа припаивают тоководы в виде медной проволоки диаметром 0,1-0,2мм и длиной 20-30мм. Так

как тензорезистор должен обладать высокой тензочувствительностью, большим удельным сопротивлением и малым температурным коэффициентом сопротивления, то обычно решётки тензорезистора изготавливают из сплавов меди с никелем (константин, эдванс, элинвар и другие) диаметром 0,12-0,3мм.

К положительным качествам тензорезистора относятся:

- возможность непосредственной регистрации деформаций как на поверхности, так и внутри конструкции;
- высокая точность измерения деформаций;
- возможность измерения деформаций на всех ступенях нагрузок, вплоть до текучести арматуры в конструкции;
- сравнительная простота установки тензорезистора на исследуемую конструкцию;
- относительная простота и дешевизна изготовления проволочных тензорезисторов при малой их массе и незначительных размерах;
- возможность измерения деформаций одновременно во многих точках конструкции.

На рисунке 3.13 приведен общий вид тензорезистора КС-70-120-А1-11.

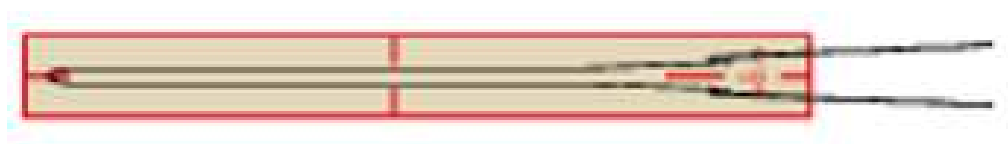




Рисунок 3.13 – Тензорезистор для определения деформаций бетона КС-70-120-А1-11

Технические характеристики тензорезистора КС-70-120-А1-11 сведены в таблице 3.9.

Таблица 3.9 – Технические параметры тензорезистора КС-70-120-А1-11

Технические параметры	Значения
Тип	КС-120-120-А1-11 L1M3R
Способ крепления	клей СС-35
Номинальная база, LxW	132x6мм
Длина решетки	120мм
Коэффициент линейного расширения	11
Сопротивление	120Ом
Допустимая рабочая температура	-10...+80°С
Температурная самокомпенсация	от +10 до +60°С
Чувствительность	2,1

3.3 Результаты исследования процессов формирования строительных конструкций

С помощью программного обеспечения для акселерометра Analog Devices USB серии ADXL326 был проведен эксперимент для определения частоты и амплитуды колебаний стенок бункера 3D принтера при печати конструкций. Порядок выполнения эксперимента был приведен выше. Применяемое программное обеспечение позволяет выбрать:

- диапазон измеряемых ускорений акселерометра USB $\pm 2g$, $\pm 4g$, $\pm 8g$ или $\pm 16g$;
- число осей акселерометра USB, по которым выполняется измерение (использование не всех осей актуально при записи данных в энергонезависимую память и при построении графика при открытии файла - при мегабайтных файлах на построение графика требуется ощутимое время);
- частоту выборки акселерометра USB 3200 Гц, 1600 Гц, 800 Гц, 400 Гц, 200Гц, 100Гц, 50Гц, 25 Гц, 12,5Гц или 6,25 Гц;
- время измерения/число выборок, ограниченные только объемом оперативной памяти вашего компьютера.

Программное обеспечение позволяет управлять акселерометром, считывать результаты измерения, отображать их в виде графиков ускорения и сохранять полученные данные в виде файлов.

Компьютерное приложение, работающее с акселерометром, обеспечивает удобные функции:

- просмотр графиков;
- обработку сигналов (интегрирование, вычисление спектра, тренда). А также получать график спектра для выделенного фрагмента;
- определение затухание для выделенного фрагмента (вычисление и построение линейного тренда методом наименьших квадратов, как в MS-Excel)
- компенсирование начальный уровень сигнала;
- выделение на графиках интересующие фрагменты сигнала;

- поиск файлов по комментариям к ним;
- документирование результатов.

Результаты полученные в ходе проведения эксперимента приведены на рисунках 3.14, 3.15 и 3.16.

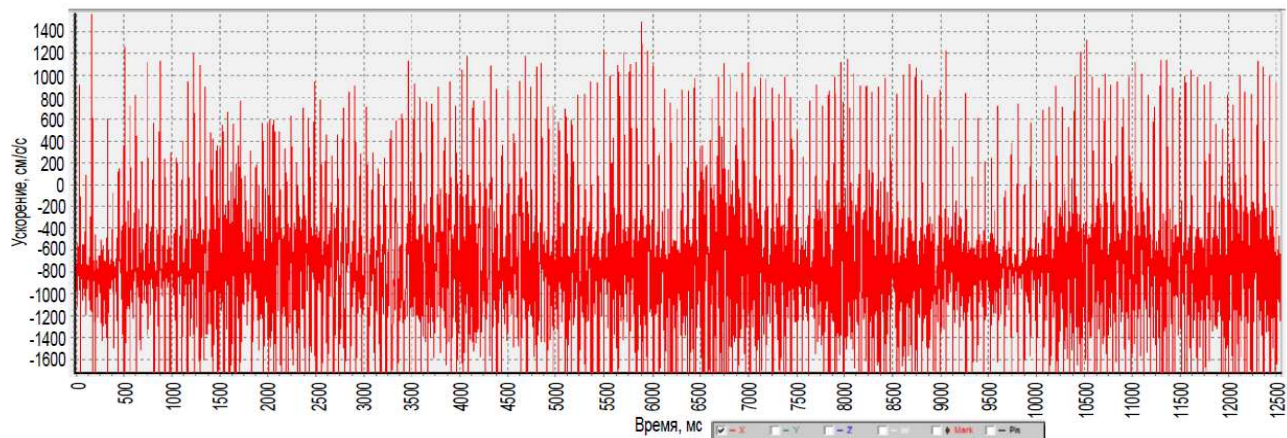


Рисунок 3.14 – Измерение малых ускорений по оси X

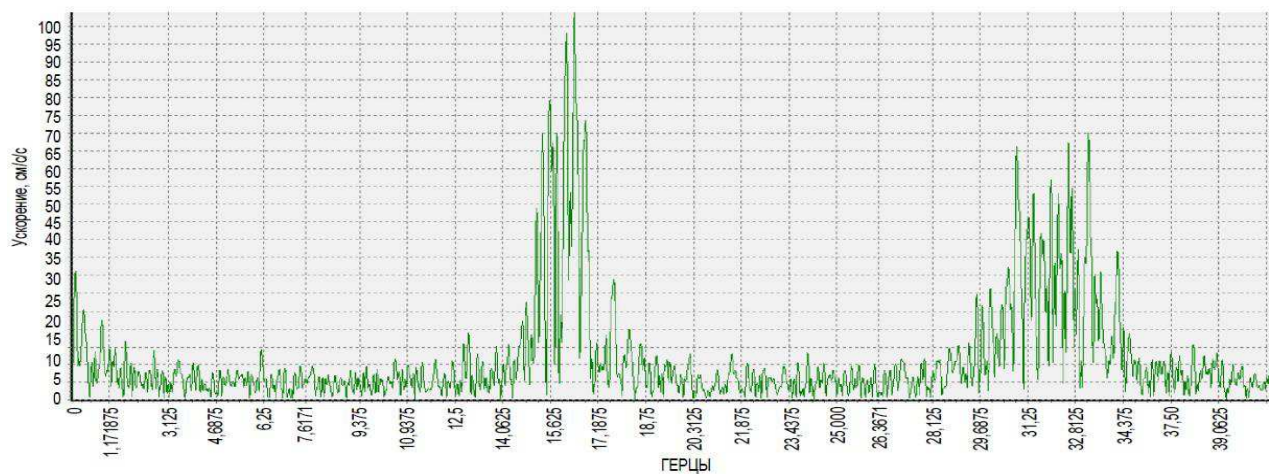


Рисунок 3.15 – Спектр малых ускорений

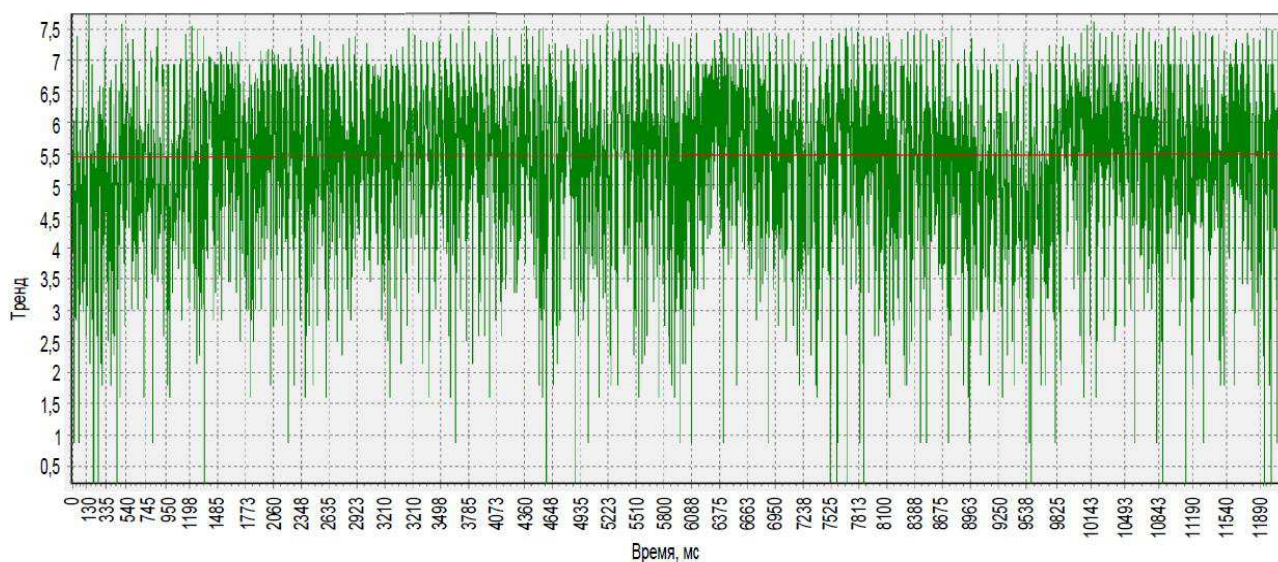


Рисунок 3.16 – Тренд малых ускорений

На графике малых ускорений (рисунок 3.16) записаны колебания по оси X с малыми ускорениями, применяя функцию интегрирования по N точкам для снижения шума, заранее скрыв при этом графики для осей Y и Z, мы можем увидеть, как выглядит малый сигнал на фоне шума и как снизить уровень шума за счет интегрирования.

ГЛАВА 4 РЕЗУЛЬТАТЫ РЕАЛИЗАЦИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

4.1 Технологические преимущества использования 3D-принтеров в строительстве

Развитие 3D печати для инвестиционно-строительной сферы точки зрения технологического прогнозирования происходит по следующим направлениям:

- модернизации 3D принтеров
- совершенствование используемых материалов для данной технологии строительства
- развитие технологических способов создания объемных конструкций и сооружений.

Определяющими факторами перспективного развития аддитивных технологий в строительстве, являются используемые строительные материалы и технологические способы строительства. В настоящее время существует три метода создания зданий и сооружений с использованием аддитивных технологий:

- метод послойного экструдирования вязкой смеси;
- метод спекания (селективного спекания);
- метод напыления (компонентной склейки).

Самым распространенным в настоящее время является метод послойного экструдирования, а основным материалом для строительства с помощью 3D печати является бетон.

В настоящее время в сфере строительства задействовано большое количество ручного труда. Данный факт не только тормозит темпы различных видов строительных работ, но и влечет за собой дополнительные затраты и дальнейшие сложности в процессах отделочных работ. Именно поэтому

преимуществами использования 3D-принтеров в строительстве можно считать их точность, скорость и автоматизацию.

Значительным преимуществом также является возможность легко изменять толщину и конфигурацию стен на стадии разработки модели в зависимости от климатических условий и нужд заказчика, что делает процесс выбора утеплителя для стен в таком доме в разы проще. Кроме того, влияние на дом погодных условий сводится к минимуму из-за специальных добавок в бетонную смесь.

Многие виды принтеров для строительства малоэтажных зданий имеют небольшие размеры и тем самым обеспечивают возможность для свободной транспортировки на строительные площадки. Сборка данных видов принтеров обычно составляет от 30 минут до нескольких часов, что значительно ускоряет темпы строительства.

Отпадает нужда в сложных процессах проведения различных коммуникаций, т.к. в ходе проектирования модели здания заранее планируются все коммуникационные развязки, узлы и инженерные системы, и получается готовая схема для их прокладки.

По причине того, что при печати здания бетонная смесь подается дозированно с машинной точностью, при завершении рабочего процесса принтер не оставляет за собой следов и отходов, которые могли бы потребовать последующей уборки.

4.2 Методы контроля качества 3D печати строительных конструкций

Для контроля качества 3D печати строительных конструкций была использована печатная плата *Arduino Uno*. На самом деле в современном мире существует огромное количество различных плат, но мой выбор был сделан именно в пользу этой платы, так как она является самой популярной платформой для любительской и образовательной электроники и роботехники. *Arduino* – это марка аппаратно-программных средств, которая предназначена для

выстраивания незамысловатых систем робототехники и автоматики, для всех пользователей. Так же *Arduino* представляет из себя электронный конструктор для быстрой и удобной разработки электронных устройств, благодаря таким преимуществам платформа является очень популярной во всем мире.

Arduino состоит из макетной платы и программной части. Программная часть представлена в виде бесплатной программной оболочки (*IDE*), которая имеется в свободном доступе на официальном сайте *Arduino* [11].

В программе содержится текстовый редактор, компилятор, инструменты с помощью которых можно загрузить программу в микроконтроллер, менеджер проектов, препроцессор. Оболочка языка написана на языке *Java* и работает на различных ОП, таких как: *Windows, Mac OS X и Linux*. Написание программы *Arduino* осуществляется на языке *C++*, с определенными облегчающими особенностями, которые позволяют новичкам создание первой работающей программы без особых затруднений.

Программы, которые были написаны на *Arduino* называют скетчи и сохраняются в файлах с расширением *.ino*. Файлы перед компиляцией (загрузкой) обрабатывает препроцессор *Arduino*. Программа *Arduino*, как и все остальные состоит из отдельных блоков. Начало блока выражается левой фигурной скобкой «*{*», а его конец – правой фигурной скобкой «*}*».

Structure: команды, которые предназначены для написания структуры программы:

- Циклы;
- Ветвления;
- Синтаксис;
- Арифметические и логические операторы;
- Операторы сравнения;
- Работа с битами;

Variables: это различные переменные, которые по аналогии используют в языке программирования Си, но для *Arduino* характерны только несколько:

□ *HIGH* – высокий уровень, логическая 1, это +5 Вольт на контакте *Arduino*;

□ *LOW* – низкий уровень, логический 0, подразумевает 0 Вольт на контакте *Arduino*;

□ *INPUT* – обозначение контакта *Arduino* как входного (прием информации с внешних устройств);

□ *OUTPUT* – прописывание контакта *Arduino* как выходного (передача информации на внешние устройства, управление силовыми блоками);

Примечание. описания команд в данной среде осуществляется на английском языке, что может представлять затруднения. Перевод описаний на русский язык, а также подробная информация имеется на официальном сайте *Arduino* [11]. В дополнение, описание всех команд можно изучить в самой среде разработки *Arduino*, выполнив Справка – Найти в справке.

Синтаксис языка программирования, как говорилось выше очень схож с языком программирования C++. В язык программирования входят:

Операторы .

□ Управляющие операторы (операторы условия «*if*» «*if...else*», циклов «*for*», «*while*», «*do...while*» и другие);

□ Синтаксис (знаки препинания «*{}*», объявление комментариев «*//*» «*/** */»), операторы включения библиотек «*#include*»);

□ Арифметические операторы;

- Операторы сравнения («==» - равно, «!=» - не равно и другие);
- Логические операторы («&&» - И, «||» - ИЛИ, «!» - НЕ);
- Указатели доступа (указатели - «*», ссылки - «&»);
- Битовые операторы («&» - побитовое И, «~» - побитовое НЕ, «<<»);
- Составные операторы («++» - инкремент, «--» - декремент, «+=» - составное сложение и другие);

Данные

- Константы (целочисленные, с плавающей точкой, зарезервированные - «HIGH», «INPUT», «true»);
- Типы данных (логические «boolean», символьные «char», целочисленные «int», «long», «short», вещественные «float», массивы и другие);
- Преобразование типов данных («char()», «byte()», «float()» и другие);

Функции

- Цифровой ввод/вывод («pinMode()», «digitalWrite()», «digitalRead()»);
- Аналоговый ввод/вывод («analogRead()», «analogWrite()»);
- Расширенный ввод/вывод («tone()», «shiftIn()» и другие);
- Время (возвращение прошедшего времени со старта программы «millis()», «micros()», приостановка выполнения программы «delay()»);
- Математические вычисления («min()», «abs()», «sqrt()» и другие);

- Тригонометрия («*sin()*», «*cos()*», «*tan()*»);
- Случайные числа («*random()*»);
- Биты и байты (извлечение младшего/старшего байта переменной «*lowByte()*», «*highByte()*», установка значения бита «*bitSet()*», очистка бита «*bitClear()*» и другие);
- Внешние прерывания («*attachInterrupt()*»);
- Библиотеки (*EEPROM*, *SD*, *SPI*, *SoftwareSerial*, библиотеки для подключаемых модулей и другие). В *Arduino IDE* есть набор стандартных библиотек, которые используются очень часто. Эти библиотеки поддерживают все примеры, которые включены в *Arduino IDE*. Стандартные библиотеки поддерживают функции для работы с наиболее распространенным периферийным оборудованием. Стандартные библиотеки устанавливаются в папку "*Libraries*" при установке *Arduino IDE*. Дополнительные библиотеки можно найти на интернет ресурсах, так как они находятся в свободном доступе, с удобным функционалом и драйверами для различного периферийного оборудования. Аппаратная часть представляет собой набор смонтированных печатных плат. На рынке платы продаются как самим официальным производителем, так и иными производителями. Полностью открытая архитектура системы позволяет свободно копировать или дополнять линейку продукции *Arduino*. *Arduino* может использоваться как для создания автономных объектов автоматике, так и подключаться к программному обеспечению на компьютере через стандартные проводные и беспроводные интерфейсы.

Характеристики печатной платы *Arduino Uno* приведены в таблица 3.1. Самым главным плюсом этой платы является то, что на «борту» платы уже находится регулятор питания, микроконтроллер, программатор, интерфейс для подключения устройств и программная библиотека. Нет никакой необходимости

задумываться о программировании микроконтроллера или способах подключения. Микроконтроллер *Atmel AVR ATmega328* с частотой тактирования 16 или 8 МГц уже предварительно прошит загрузчиком (*bootloader*). AVR – лучший из свободно-распространяемых компиляторов для контроллеров AVR, построенный на базе *GCC* – одного из наиболее совершенных C-компиляторов, широко используемого и постоянно улучшаемого на протяжении уже двадцати лет. С помощью загрузчика программа загружается в микроконтроллер без каких-либо программаторов. Через интерфейс *USB* загрузчик соединяется с компьютером.

На платформе *Arduino Uno* (рисунок 3.1), имеется 14 цифровых вход/выходов (6 из которых могут использоваться как выходы ШИМ), 6 аналоговых входов, кварцевый генератор 16 МГц, разъем *USB*, силовой разъем, разъем *ICSP* и кнопку перезагрузки. Для работы необходимо подключить платформу к компьютеру посредством кабеля *USB*, либо подать питание при помощи адаптера *AC/DC* или батареи.



Рисунок 3.2 – Платформа *Arduino Uno*

Таблица 3.1 – Характеристики платы

<i>Arduino Uno</i> Параметр	Значение
Микроконтроллер	ATmega 328
Рабочее напряжение	5 В
Входное напряжение (рекомендуемое)	7-12 В
Входное напряжение (предельное)	6-20 В
Цифровые входы/выходы	14 (6 из которых могут использоваться как выходы ШИМ)
Аналоговые выходы	6
Постоянный ток через вход/выход	40 мА
Постоянный ток для вывода	50 мА
3.3В	
Флэш-память	32 Кб (ATmega328) из которых 0,5 Кб используется для загрузчика
ОЗУ	2Кб (ATmega328)
EEPROM	1 Кб (ATmega328)
Тактовая частота	16 МГц

Токовая защита разъема *USB*. В *Arduino Uno* встроен самовосстанавливающийся предохранитель (автомат), защищающий порт

USB компьютера от токов короткого замыкания и сверхтоков. Хотя практически все компьютеры имеют подобную защиту, тем не менее, данный предохранитель обеспечивает дополнительный барьер. Предохранитель срабатывает при прохождении тока более 500 мА через *USB* порт и размыкает цепь до тех пока нормальные значения токов не будут восстановлены.

При создании модели «Строительный принтер» были подключены датчики, к плате Arduino Uno. Для подключения всей системы в моделируемом помещении потребовалось:

1) В качестве датчика движения, мы использовали *PIR*-сенсор (*Passive Infrared sensor*), т.е. пассивный инфракрасный *PIR*-датчик (рис 3.3). *PIR*-сенсоры основаны на методике измерения инфракрасного излучения от объектов. Любой человек и животное становятся источником теплового излучения. Длина волны этого излучения зависит от температуры и находится в инфракрасной части спектра, это излучение улавливается специальными датчиками, которые называют *PIR* – датчики. Такие датчики называют пассивными, потому что датчики сами не излучают, а только принимают излучение с длиной от 7 до 9 мкм. Рабочее напряжение от 5 до 9В. Датчик имеет 3 контакта: *GND*: «-» питание, *OUT*: Вывод выходного сигнала, *VCC*: «+» питание.

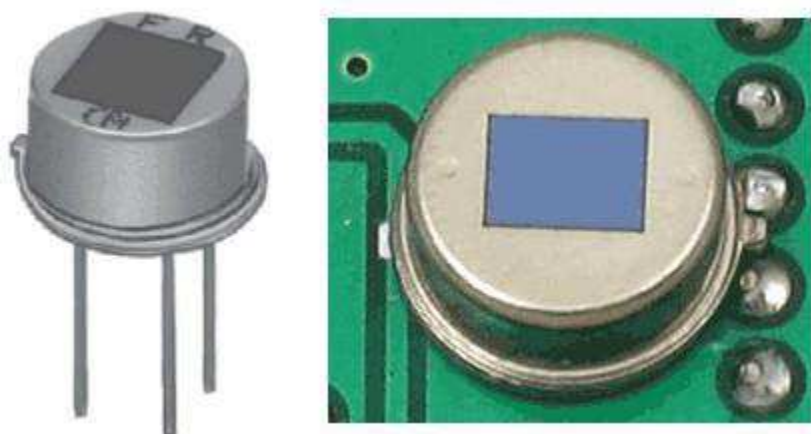


Рисунок 3.3 – *PIR*-датчик

PIR-датчики имеют чувствительный элемент, который реагирует на изменение теплового излучения. Если же тепловое излучение остается неизменным, то электрический сигнал не формируется. Для того, чтобы датчик среагировал на движение, применяют линзы Френеля. Эти линзы представляют сложную составную линзу, образованную совокупностью концентрических колец относительно небольшой толщины, примыкающих друг к другу. Сечение

каждого из колец имеет форму треугольника, одна из сторон которого криволинейна, и это сечение представляет собой элемент сечения сплошной сферической линзы (рис 3.4).

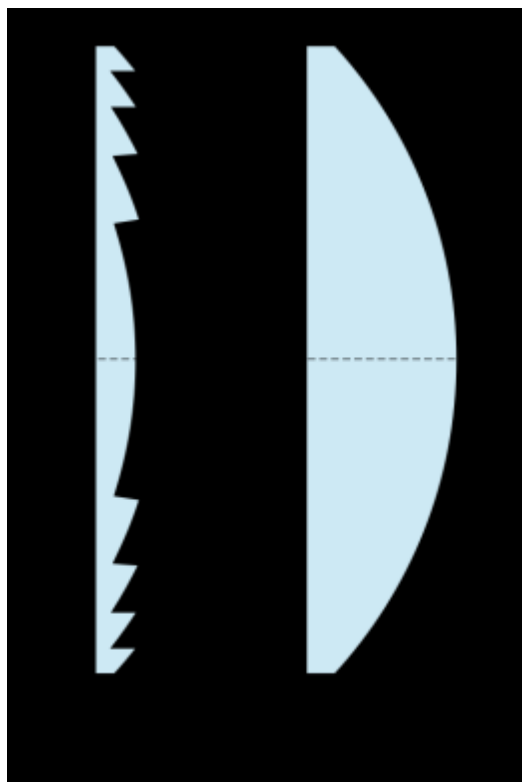


Рисунок 3.4 – Линзы (1.линза Френеля, 2.Обычная линза)

Чтобы датчик среагировал на движение, применяют линзы Френеля с несколькими фокусирующими участками, которые разбивают общую тепловую картину на активные и пассивные зоны, расположенные в шахматном порядке. В сфере работы датчика, занимает несколько активных зон полностью или частично. Поэтому, даже при минимальном движении происходит перемещение из одних активных зон в другие, что вызывает срабатывание датчика (рис 3.5).

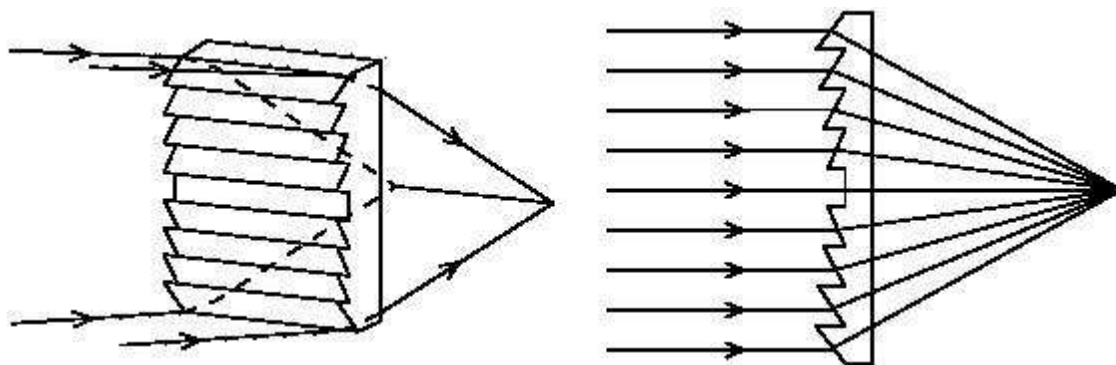


Рисунок 3.5 – Принцип работы датчика движения

Фоновая тепловая картина меняется очень медленно и равномерно, поэтому датчик на нее не реагирует. Высокая плотность активных и пассивных зон позволяет датчику надежно определить движение. Датчик *PIR* обнаруживает инфракрасный измененный сигнал, и модифицирует его в колебания напряжения. После чего подается ток на аналоговый пин № A1, к которому подключен светодиод, и он загорается. С этого момента начинает работать задержка в 1 минуту, если по окончании времени движения не обнаружено – то перестает подаваться питание на светодиод, иначе продолжает гореть в течении 60 секунд. Такой способ является очень удобным, и экономичным. Для подключения датчиков к *Arduino* потребовалось:

- Плата Arduino Uno;
- Макетная плата;
- USB-кабель;
- PIR-датчик движения;
- 1 светодиод;
- 1 резистор 220 Ом;
- Провода «папа-папа» и «папа-мама»;

Программный код, для работы датчиков выглядит следующим образом:

```
#define LED A1
// назначаем порт (A1) для светодиода (LED)
#define PIR A2
// назначаем порт (A2) для PIR-датчика
void setup() {
// начало работы программы.
pinMode(LED, OUTPUT);
```

```

// прописываем, что значение светодиода является выходным значением
pinMode(PIR, INPUT);
// здесь наоборот, значения PIR-датчика являются входным значением.
}
void loop()
// выполнение программного кода в основном цикле
{
// если есть движение включаем светодиод (знак «==» является
сравнением)
if (digitalRead(PIR) == HIGH) { digitalWrite(LED, HIGH);
counttime = millis();
// включаем счетчик на 1 минуту
millis() - counttime > 60000;
//С помощью функции counttime = millis() начинается отсчет времени. При
этом, в отличие от функции delay, которая полностью прерывает
программу, микроконтроллер может продолжать остальные вычисления в
скетче.
}
{ if (digitalRead(PIR) == LOW)
// если нет движения в течении 1 минуты
digitalWrite(LED, LOW);
// выключаем светодиод

```

4.3 Экономические преимущества и недостатки использования 3D-принтеров в строительстве

Использование методов прогнозирования для маркетинговых исследований перспектив развития мирового рынка 3D строительства позволяет говорить о значительном увеличении спроса на 3D печать как в целом, так и для

строительства из бетона. По оценкам экспертов мировая экономика продолжает восстанавливаться и в ближайшее время до 2021 года указанный рынок будет расширяться до 56,4 млн. долларов.

Метод послойного экструдирования бетонной смеси, в настоящее время, является самым распространённым и перспективным. Возьмем к примеру отечественную компанию СПЕЦАВИА, которая производит 3D принтеры для создания строительных конструкций и изделий методом экструдирования. На сегодняшний день они создали ряд различных 3D строительных принтеров, разных размеров, мощностей и назначений.

Для наглядного сравнения экономических преимуществ использования 3D-принтера в строительстве, была рассчитана стоимость строительных работ двумя разными способами. Для проведения сравнения было использовано здание (рисунок 4.1), которое по объемно-планировочному решению представляет собой трехэтажное каркасное здание с террасой. Габариты здания составляют 26х19м, высота 10,3м.

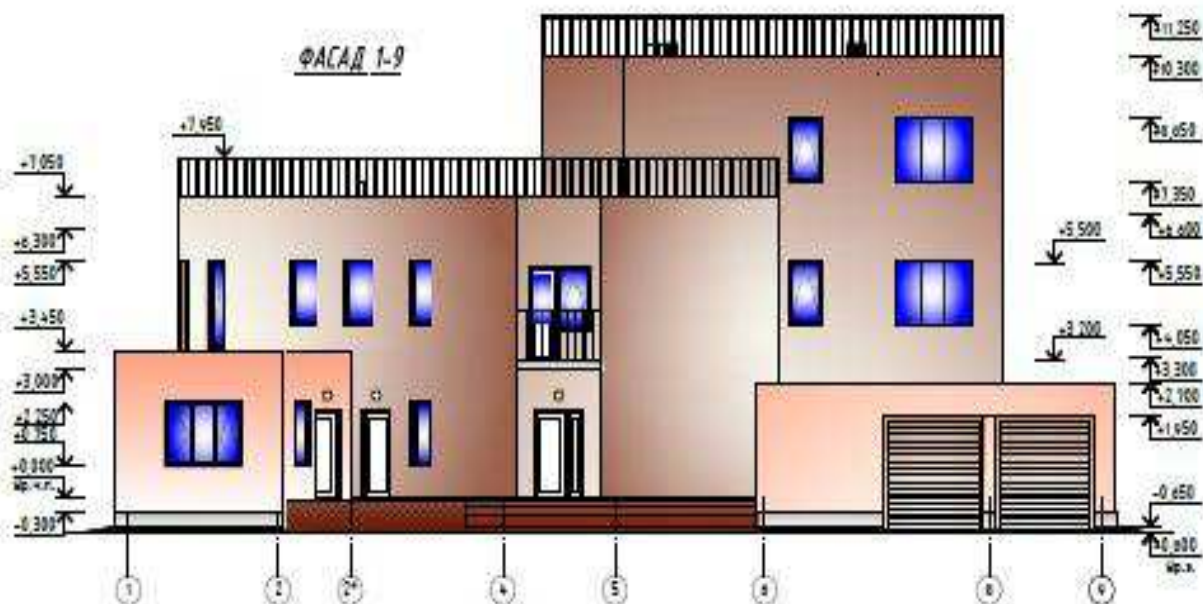


Рисунок 4.1 – Общий вид здания

Для сравнения было принято два метода строительства:

- 1) возведение надземной части здания из кирпича;
- 2) возведение надземной части здания методом 3D печати из монолитного стеклофибробетона.

Анализ структуры сметной стоимости общестроительных работ по разделам сведен в таблицу 4.1.

Таблица 4.1 – Экономическое сравнение вариантов возведения надземной части здания.

Наименование	Стоимость, руб		Трудозатраты, чел.-см.	
	2 метом возведения	1 метод возведения	2 метом возведения	1 метод возведения
Наружные и внутренние стены	2 021 920,00	3 636 673,00	90,62	174,07
Перемычки	233 514,00	231 018,00		
Колонны	388 618,00	45 522,00	8,67	5,51
Перекрытия	1 599 143,00	1 582 053,00	99,04	99,04
Лестница	73 668,00	72 881,00	3,71	3,71
Итого:	4 316 856,00	5 568 141,00	202,04	282,33

При сравнении двух вариантов возведения надземной части здания наиболее экономически выгодным и наименее трудозатратным является вариант возведения надземной части здания из монолитных стеклофибробетонных блоков. Разница в стоимости на строительные работы составляет 1 251 285,00 руб., что составляет 22,47% экономии, а трудозатрат на возведение надземной части здания методом 3D печати из монолитного стеклофибробетона на 80,29 чел.-см. меньше чем при возведении надземной части здания из кирпича.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения задач магистерской диссертации было выполнено следующее:

1) выполнен анализ существующих 3D строительных принтеров, методов печати и армирования конструкций.

2) рассмотрен подробный состав материалов для печати конструкций с помощью 3D строительного принтера.

3) выполнен подбор первичных преобразователей, описано устройство и принцип работы, а также подбор исполнительных механизмов с подробным описанием.

4) в ходе теоретических исследований, лабораторных и производственных экспериментов установлены закономерности влияния динамических нагрузок на поведение подвески привода 3D строительного принтера при печати конструкций.

5) разработана имитационная модель процесса печати конструкций с помощью 3D принтера. Полученные имитационные модели можно считать адекватными, так как результаты моделирования соответствуют реальным.

6) выполнен анализ экономической эффективности производства конструкций и изделий с помощью 3D принтера.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Абомелик, Т. П. Методология планирования эксперимента. Сборник лабораторных работ. – Ульяновск: УлГТУ, 2006. – 36 с
- 2 Агеева М.С., Матюхина А.А., Никулина А.С. Аддитивные технологии – эпоха инноваций в строительстве. – г. Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова.
- 3 Адлер, Ю.П. Введение в планирование эксперимента / Ю.П. Адлер – Москва: Металлургия, 1968. – 155 с.
- 4 Алексеенко В.И., Субботин А.И., Чутченко С.Г. Возведение строительных объектов с использованием 3D принтеров // В сборнике: современные строительные материалы, технологии и конструкции Материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 95-летию ФГБОУ ВПО «ГГНТУ им. акад. М.Д. Миллионщикова». Грозненский государственный нефтяной технический университет имени академика М.Д. Миллионщикова. 2015. С. 556-558.
- 5 Альшакова Е.Л. Применение 3D моделирования на стадии эскизного проектирования объектов строительства и архитектуры // В книге: Информационные технологии в образовании XXI века Сборник научных трудов Международной научно-практической конференции. 2015. С. 157-162.
- 6 Ахназарова, С.Л. Оптимизация экспериментов в химии и химической технологии / С.Л. Ахназарова, В.В. Кафаров. – Москва: Высшая школа, 1978. – 319 с.
- 7 Байгалиев Б.Е., Акимов А.В., Зарипов И.Р., Кошелев Д.В. Использование метода 3D прототипирования для производства жилых помещений // Международный научно-исследовательский журнал. 2015. № 5-2 (36). С. 11-12.
- 8 Белов А.О., Боев С.Ю., Гилязидинова Н.В. Технология возведения малоэтажных зданий с помощью 3D-принтера. – г. Кемерово: КГТУ им. Т.Ф. Горбачева. дата редак. 24.04.2015.

- 9 Бесекерский, В. А. Теория автоматического управления: учебное пособие / В.А. Бесекерский, Е.П. Попов. – Санкт-Петербург: Изд-во «Профессия», 2003. – 751 с.
- 10 Валетов, В. А. Аддитивные технологии (состояние и перспективы): Учебное пособие / В.А. Валетов. – СПб.: Университет ИТМО, 2015. – 63с.
- 11 Ватин Н.И., Чумадова Л.И., Гончаров И.С., Зыкова В.В., Карпеня А.Н., Ким А.А., Финашенков Е.А. 3D-печать в строительстве. УДК 691.4. дата редак. 28.10.2016. – г. Санкт-Петербург. с.27-46.
- 12 Вентцель, Е.С. Теория вероятностей и ее инженерные приложения / Е.С. Вентцель, Л.А. Овчаров. – Москва: Наука, 1988. – 480 с.
- 13 Вентцель, Е.С. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения /Е.С. Вентцель, Л.А. Овчаров. – Москва: Наука, 1991. – 384 с.
- 14 Вентцель, Е.С. Задачи и упражнения по теории вероятностей: учеб. пособие для студ. вузов / Е.С. Вентцель, Л.А. Овчаров. – Москва: Издательский центр «Академия», 2003. – 448 с.
- 15 Гмурман, В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика / В.Е. Гмурман. – Москва: Высшая школа, 2008. – 479 с.
- 16 Гмурман, В.Е. Руководство к решению задач по теории вероятностей и математической статистике / В.Е. Гмурман. – Москва: Высшая школа, 2008. – 404 с.
- 17 Госселина С., Дубалетта Р., Рукса Ф., Гаудильера Н., Дирренбергера Дж. (2016) Крупномасштабные 3D-печати из сверхпрочного бетона – новый маршрут обработки для архитекторов и строителей. Материи и дизайн 100: 102-109.
- 18 ГОСТ 24026-80. Исследовательские испытания. Планирование эксперимента. Термины и определения.
- 19 Гурский Н. Н. Моделирование процессов управления электромеханической трансмиссией колесного трактора / Н. Н. Гурский, А. В. Пащенко, И. Н. Жуковский // Наука и техника. – 2014. – № 2. – С. 41–45.

20 Гурский Н. Н. Simulink-модель движения большегрузной машины с нейро-контроллером в контуре управления / Н. Н. Гурский, М. Нажжарин // Системный анализ и прикладная информатика. – 2014. – № 4 – С. 32–38.

21 Гуторов Н.Ю., Чепенко А.С., Павленко О.А.. Аддитивные технологии и современные технологии строительства. УДК 69:004.92. – г. Белгород. с. 85-87.

22 Далинчук В.С., Власенко Д.А. Основные аспекты печати домов с помощью 3D принтера. УДК 69.002.5. – г. Санкт-Петербург. с. 6-12.

23 Даулбаев Ч.Б., Родин М.И., Елемесова Ж.К., Алиев Е.Т., Мансуров З.А. Определение добавки ускоряющей время схватывания бетонной массы для 3D принтинга. УДК 666.972.1. – г. Алма-Ата: КНУ. дата редак. 19.07.2016. с. 2-5.

24 Добщиц Л.М. Современные технологии 3D-печати в строительстве. – г. Москва: ФГБОУ ВО МГУПС МИИТ.

25 Дресвянников В. А., Страхов Е. П. Аддитивные технологии как технологическая инновация: понятие, содержание, анализ развития. // Экономика и менеджмент инновационных технологий. 2018. № 1 – г. Пенза. дата редак. 12.01.2018.

26 Дребезгова М.Ю., Лесовик В.С. Применение композиционного гипсового вяжущего в 3D-технологиях стройиндустрии. – г. Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова. с.157-168

27 Евтюков, С.А. Построение математических моделей и систем автоматизированного проектирования подъемно-транспортных и строительно-дорожных машин [Электронный ресурс]: учебное пособие / Евтюков С.А., Овчаров А.А., Замараев И.В. – Электрон. текстовые данные. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, ЭБС АСВ, 2011. – 44 с. – ЭБС «IPRbooks».

28 Емельянов, С.Г. Роботизация и автоматизация строительных процессов / С.Г. Емельянов, А.Г. Булгаков, Л.М. Червяков и др.; Минобрнауки России, Юго-Зап. гос. ун-т. – Курск : ЮЗГУ, 2014. – 322 с.

29 Закс, Л. Статистическое оценивание /Л. Закс. – Москва: Статистика, 1976. – 598 с.

30 Зленко М.А., Попович А.А., Мутылина И.Н. Аддитивные технологии в машиностроении: Учебн. пособие. СПб.: СПбГУ, 2013. 221 с.

31 Кудряшов А.А., Старикова Е.А. 3D-принтеры для строительства домов. УДК 004.94. 2017.

32 Кузнецов Е.О., Пустовгар А.П., Нефедов С.В. Тонкомолотые наполнители Silverbond в гипсовых сухих строительных смесях / Е.О. Кузнецов, А.П. Пустовгар, С.В. Нефедов // Строительные материалы. –декабрь 2010. - №12 (672) – С. 52-53.

33 Клюев А.В., Клюев С.В., Нетребенко А.В., Дураченко А.В. Мелкозернистый фибробетон армированный полипропиленовым волокном // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2014. – № 4. – С. 67 – 72.

34 Лесовик В.С., Чернышева Н.В., Глаголев Е.С., Ермолаева А.Э. 3D-аддитивные технологии в сфере строительства. – г. Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова. с.157-168

35 Лунева Д.А., Кожевникова Е.О., Калошина С.В. Технология 3D-печати с использованием метода послойного экструдирования в строительстве. УДК 624.154.5. – г. Пермь: ПНИПУ. с. 30-41.

36 Литовкин С.В., Петькова Ю.Р. Использование 3D печати в машиностроении и строительстве// Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы современного машиностроения», ФГА ОУ «НИ ТПУ», г. Югра, 2015 г. С. 433-435.

37 Лысыч М.Н., Шабанов М.Л., Воронцов Р.В. Материалы, доступные в рамках различных технологий 3d печати//Современные наукоемкие технологии. 2015. № 5. С. 20-25.

38 Максимцев Д.С., Шатрова С.А., Шириев Т.Т. Будущее сейчас: строительство домов с помощью 3D-принтера. УДК 69.002.5. – г. Красноярск: СФУ ИСИ. с. 7-9.

39 Медведев, А.Е. Элементы систем автоматики / А.Е. Медведев // ГУ КузГТУ.– Кемерово, 2007. – 232 с.

40 Мирошник, И. В. Теория автоматического управления. Линейные системы: учебное пособие / И. В. Мирошник. – Санкт-Петербург: Изд-во «Питер», 2005. – 336 с.

41 Муртазин А.Р. Особенности технологии строительства домов с помощью 3D-принтера. – г. Москва: ФГБОУ ВО «НИ МГСУ».

42 Пермяков М.Б., Пермяков А.Ф., Давыдова А.М. Аддитивные технологии в строительстве. - г. Магнитогорск.

43 Перрот А., Рангеард Д., Пиерре А. (2015). Структурное наращивание материалов на основе цемента, используемых для технологий экструзии с трехмерной печатью. Материалы и конструкции, апрель 2016, 1213-1220.

44 Постоев П. А. Влияние колебательного процесса на динамические параметры бункера укладчика бетонной смеси/ Постоев П. А., Цыганкова А. В. / Материалы всероссийской научно-технической конференции молодых ученых. Инновации и актуальные проблемы техники и технологий. Том 2. Саратов. 2010. С. 187-189.

45 Прокопьев А.П., Емельянов Р.Т.. Планирование эксперимента и обработка результатов экспериментальных исследований. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2017. – 74с.

46 Прокопьев, А.П. Планирование эксперимента и обработка результатов экспериментальных исследований: учебно-методическое пособие для практических занятий [Электронный ресурс] / сост. А. П. Прокопьев. – Электронные данные– Красноярск: Сиб. федер. ун., 2013.

47 Роботизация в производстве строительных материалов, изделий и конструкций: метод. указания к выполнению практ. и курсовой работ для студентов, обучающихся по магистер. образоват. программе по направлению 270800.68 / БГТУ им. В. Г. Шухова, каф. строит. материаловедения, изделий и конструкций; сост. Л. А. Сулейманова. – Белгород: Изд - во БГТУ им. В. Г. Шухова, 2011. – 99 с.

48 Руденко О.В., Есполова З.А. Моделирование конструкции для печати на строительном 3D принтере. УДК:69.001.5. – г. Усть-Каменогорск. с. 41-47.

49 Серков А.И. Развитие технологии трехмерной печати в области строительства. УДК 69.001.5. – г. Самара. // Региональное развитие: электронный научно-практический журнал. 2017. № 2(20). URL <https://regrazvitie.ru/razvitie-tehnologiiitrehmernoj-pechati-v-oblasti-stroitelstva/>.

50 Серых И. Р., Панченко Л. А. Прочность стеклофибробетона //Научные труды Sworld. 2014. Т. 9. № 2. С. 43-47.

51 СТО 4.2-07-2014. Система менеджмента качества. Общие требования к построению, изложению и оформлению документов учебной и научной деятельности. - Взамен СТО 4.2-07-2012; дата введ. 30.12.2013. - Красноярск: ИПК СФУ, 2014. - 57 с.

52 Тихонов, А.Ф. Автоматизация строительных и дорожных машин [Электронный ресурс]: учебное пособие/А.Ф. Тихонов, С.Л. Демидов, А.Н. Дроздов.– Электрон. текстовые данные. – Москва: Московский государственный строительный университет, ЭБС АСВ, 2013. – 254 с. – Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/23716>

53 Торшин А.О., Потапова Е.Н. Перспективы использования 3D-принтера в строительстве. УДК 691.5. – г. Москва. с. 118-120.

54 Удодов С.А., Белов Ф.А., Золотухин А.Е. 3D-печать в строительстве: новое направление в технологии бетона и сухих строительных смесей. УДК 666.97. – г. Краснодар. с. 58-61.

55 Фенг П., Дж.Чен, Л. Е. (2015). Механические свойства структур 3D, напечатанных с помощью целых порошков. Строительство и строительные материалы 93: 486-497.

56 Чен Л.. Исследование состояния и тенденции развития технологии аддитивного производства. Интернационал. Журнал передовых технологий производства. 2016. С.1-10.

57 Шандров, Б.В. Технические средства автоматизации / Б.В. Шандров, А.Д. Чудаков. – М.: Издательский центр «Академия», 2007. – 368 с.

Шарманов В. В. и др. Трудности поэтапного внедрения BIM//Строительство уникальных зданий и сооружений. 2015. №10(37). С. 108-120.

58 Шорстова Е.С. Современное развитие аддитивного производства фибробетонов. УДК 666.97. – г. Белгород. с. 18-21.

59 Щербаков, В.С. Теория автоматического управления. Линейные непрерывные системы: учебное пособие / В.С. Щербаков, И.В. Лазута. – Омск: СибАДИ, 2013. – 142 с.

60 Щербаков, В.С. Основы моделирования систем автоматического регулирования и электротехнических систем в среде MatLab и Simulink: учебное пособие / В.С. Щербаков, А.А. Руппель, В.А. Глушец. – Омск: Изд-во СибАДИ, 2003. – 160 с.

Перечень условных обозначений

m_1 – масса тележки;

m_2 – масса рабочей смеси в бункере;

c_1, b_1 – жесткость и демпфирование рабочей смеси;

c_2, b_2 – жесткость и демпфирование тележки;

m_0 – масса дебаланса вибратора;

r_0 – радиус эксцентриситета;

ω_0 – угловая частота вращения дебаланса;

t – время;

m – масса смеси, кг;

c – коэффициент упругости смеси, Н/м.

Y – коэффициент упругости смеси, Н/м;

Z – масса рабочей смеси, кг.

K_w – коэффициент учитывающий влажность стеклофибробетона;

P – усилие пресса;

F – площадь поперечного сечения образца.

t – коэффициент обеспеченности;

V – коэффициент изменчивости;

P – допустимая ошибка.

X_{\max} – максимальное значение полученной величины параметра;

X – среднее арифметическое;

σ_x – среднеквадратичное выборки.

k_1, k_2 – количество степеней свободы для дисперсии опыта и дисперсии адекватности соответственно.

b_j – абсолютное значение параметра;

$t_{\alpha}(f)$ – табличное значение параметра по критерию Стьюдента.

n – число сторон в матрице планирования;

m – число параллельных опытов;

y_{ij} – условные опытные значения в i -ой строке,

Y_j – ом столбце соответственно;

y_i – среднее значение параметра.

d – число значащих коэффициентов в модели;

$U_{рас}$ – расчётное значение параметра;

U_{iop} – действительное значение параметра.

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

« 09 » 07 2020г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

«Совершенствование оборудования для 3D печати в строительстве»

08.04.01

Строительство

08.04.01.007

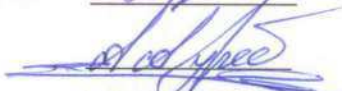
Комплексная механизация и
автоматизация строительства

Научный руководитель



к.т.н., доцент Е.С. Турышева

Выпускник



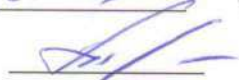
А.А. Греб

Рецензент



д-р техн. наук, профессор В.И. Иванчура

Нормоконтролер



к.т.н., доцент Е.С. Турышева

Красноярск 2020