

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Российский государственный профессионально-педагогический университет»

РАЗРАБОТКА 3D ПРИНТЕРА НА ОСНОВЕ МИКРОКОНТРОЛЛЕРА
ATMEGA2560

Выпускная квалификационная работа бакалавра
по направлению подготовки 44.03.04 Профессиональное обучение
(по отраслям)

Идентификационный код ВКР: 144

Екатеринбург 2016

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Российский государственный профессионально-педагогический университет»
Институт инженерно-педагогического образования
Кафедра электрооборудования и энергоснабжения

К ЗАЩИТЕ ДОПУСКАЮ:
Заведующая кафедрой ЭС

_____ А.О. Прокубовская
«_____» _____ 2016 г.

**РАЗРАБОТКА 3D ПРИНТЕРА НА ОСНОВЕ МИКРОКОНТРОЛЛЕРА
ATMEGA2560**

Выпускная квалификационная работа бакалавра
по направлению подготовки 44.03.04 Профессиональное обучение
(по отраслям)
профиля подготовки «Энергетика»
специализации «Электропривод и автоматика»

Идентификационный код ВКР: 144

Исполнитель:
студент группы ЭП- 401

Э.Ф. Габзалилов

Руководитель:
доцент

А.А. Емельянов

Нормоконтролер:
ст. преподаватель

Н.В. Шайхадарова

Екатеринбург 2016

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа выполнена на 71 странице, содержит 27 рисунков, 9 таблиц, 22 источника литературы, 5 приложений.

Ключевые слова: 3D ПРИНТЕР, ATMEGA2560, GCODE, МИКРОКОНТРОЛЛЕР, ДРАЙВЕР, ПРОГРАММИРОВАНИЕ.

Объектом исследования является разработка 3d принтера на основе микроконтроллера ATMEGA2560.

Предметом исследования является стенд для демонстрации студентам в учебном процессе возможности программирования различных форм предметов.

Цель работы – разработать стенд по изучению языка программирования g-code под управлением микроконтроллера ATMEGA2560.

В процессе работы проводилось экспериментальное исследование используемых элементов.

В результате исследования был разработан, собран и запрограммирован 3D принтер под управлением микроконтроллера ATMEGA2560. На данном учебном стенде есть возможность проводить: исследовательские работы по изучению языка программирования g-code, проводить демонстрационные работы.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	6
1. 3D ПЕЧАТЬ	9
1.1 История развития 3D печати.....	9
1.2 Классификация 3D принтеров	11
1.3 Популярные технологии 3D печати	16
2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ	25
2.1 Описание стенда.....	25
2.2 Выбор микроконтроллера	26
2.3 Описание платы управления.....	28
2.4 Описание силовой части.....	29
2.5 Выбор драйвера двигателей	31
2.6 Описание шаговых двигателей	32
2.7 Выбор нагревательных элементов и терморезисторов	35
2.8 Выбор направляющих валов	37
2.9 Выбор линейных подшипников.....	38
2.10 Высокотемпературная полиамидная лента	40
2.11 Нить-материал для изготовления различных форм предметов.....	41
3. ПРОГРАММИРОВАНИЕ	44
3.1 Нарезка модели и передача инструкций в микроконтроллер.....	44
3.2 G-code	47
3.3 Алгоритм получения модели	56
4. ЭКОНОМИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ.....	57
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	63
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	65
ПРИЛОЖЕНИЕ А	67
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	68
ПРИЛОЖЕНИЕ В.....	71

ПРИЛОЖЕНИЕ Г	72
ПРИЛОЖЕНИЕ Д	73

ВВЕДЕНИЕ

3D-печать (также известная как аддитивное производство) – это процесс создания твёрдых трёхмерных объектов любой формы из цифровой компьютерной модели. 3D-печать достигается посредством так называемых аддитивных процессов, во время которых каждый слой материала кладётся в разной форме. Это отличает её от традиционных техник механической обработки, большинство которых основано на удалении материала путём его обрезания или сверления (субтрактивные процессы). Объекты, произведённые аддитивно, могут быть использованы на любой стадии жизненного цикла продукции, от создания предварительных образцов (например, в быстром прототипировании) до полноценного производства (например, в быстром производстве), в добавок к механической обработке и постпроизводственной доработке.

Сегодня эта технология широко используется в ювелирном и обувном производстве, промышленном дизайне, архитектуре, инженерии и конструировании, автомобильной, космической, стоматологической и медицинской промышленности, образовании, геоинформационных системах, гражданском строительстве и многих других профессиональных сферах, и новые области применения добавляются в этот список каждый год.

3D-принтер – это периферийное устройство, использующее метод послойного создания физического объекта по цифровой 3D-модели.

Компьютерные технологии все больше срастаются с реальной жизнью. Однако грань между настоящей реальностью и реальностью, так сказать, компьютерной или виртуальной остается. Перенести предмет из одной плоскости в другую не так просто. Конечно, если речь идет о тексте, картинках и прочих двухмерных вещах – то принтеры и сканеры уже давно сделали такой обмен делом несложным и совершенно обыденным.

Зачем нужно брать трехмерную модель чего-то и делать из нее реальный предмет? Оказывается, применений хватает. Однако в случае с трехмерными физическими объектами все намного сложнее. Даже технологии, которые

позволяют увидеть трехмерную компьютерную модель в реальном объеме нельзя назвать очень распространенными.

Дешёвая трёхмерная печать, хотя ещё и в стадии младенчества, но быстро взрослеет с помощью, по-видимому, безграничного потенциала. С её способностью воспроизводить 3D объекты – от археологических экспонатов, сложных математических поверхностей, до медицинских протезов.

Есть надежда, что эта передовая технология откроет новые перспективы для науки, образования и окажет заметное влияние в развивающихся странах. Доступная цена технологии плюс огромное количество 3D объектов для печатания в свободном доступе уже в настоящее время делают новейшие 3D принтеры привлекательной технологией для стран с низким уровнем дохода.

В самом деле, большое количество приложений и доступная цена делают 3D печать технологией, доступной для широкой аудитории. Стоимость нового поколения 3D принтеров, основанных на аппаратных средствах с открытым исходным кодом, варьируется от 15000 до 100000 рублей, и они могут быть приобретены через Интернет. В масштабе, принтеры могут быть использованы для домашней печати объектов, для небольших исследовательских лабораторий в университетах и школах для создания учебного материала, без необходимости вкладывать много денег. 3D печать открывает новые возможности, не осуществимые ранее для творческого производства.

Наше общество стоит на пороге 3D-революции в производстве, передовая мысль и 3D-технологии развиваются семимильными шагами, сферы применения расширяются и в недалёком будущем этот бум произойдёт.

Объектом исследования является разработка 3d принтера на основе микроконтроллера ATMEGA2560.

Предметом исследования является стенд для демонстрации студентам в учебном процессе возможности программирования различных форм предметов.

Цель работы – разработать стенд по изучению языка программирования g-code для управления микроконтроллером ATMEGA2560.

Задачи выпускной квалификационной работы:

1. Выбрать элементную базу:

- микроконтроллер;
- силовую часть;
- драйвера двигателей;
- шаговые двигатели;
- нагревательные элементы;
- терморезисторы;
- направляющие валы;
- линейные подшипники;
- высокотемпературная полиамидная лента;
- нить-материал для изготовления различных форм предметов.

2. Разработать и собрать механическую часть стенда, состоящую из подвижных и неподвижных частей;

3. Изменить программу для микроконтроллера под данный стенд, позволяющую послойно с различной конфигурацией наплавлять формы предметов (для каждого слоя записывается программа с новой конфигурацией). В процессе такого перепрограммирования каждого слоя студенты обучаются работе с языком программирования g-code. В программе необходимо обеспечить синхронную подачу пластикового материала в виде прутка в зону нагревательного элемента.

1. 3D ПЕЧАТЬ

1.1 История развития 3D печати

К середине 90-х годов прошлого столетия в мировой экономике сложилась интересная ситуация: фирмы-конкуренты стали не просто бороться за потребителей продукции, но буквально выполнять любые их пожелания. Самое важное, что в итоге однообразную продукцию – например, часы и автомобили – прекратили приобретать миллионными партиями. Объем продаж с заводов-производителей сократился до нескольких тысяч штук в одной партии. Это ознаменовало начало эпохи мелкосерийного производства. В конечном итоге компании обнаружили, что разработка форм, лекал и прототипов для все новых и новых моделей обходится весьма дорого [14].

Примерно тогда же становятся популярными устройства, способные быстро и с минимумом затрат изготавливать модели, – станки с ЧПУ, числовым программным управлением. Многие из них так и остались в секторе производства, но интенсивное развитие отдельной ветви «эволюции» привело к появлению офисных принтеров объемной печати – так началась история развития 3D-печати [15].

Самым первым устройством для создания 3D-прототипов была американская SLA-установка, разработанная и запатентованная Чарльзом Халлом (рисунок 1) в 1986 году и использующая стереолитографию. Само собой, это еще не был первый 3D-принтер в современном понимании, но именно она определила, как работает 3D-принтер: объекты наращиваются послойно [5].

Халл сразу же создал фирму 3D Systems, которая изготовила первое устройство объемной печати под названием Stereolithography Apparatus. Первой моделью этой машины, имевшей широкое распространение, стала разработанная в 1988 году SLA-250.



Рисунок 1 – Чарльз Халл

В 1990 году был использован новый способ получения объемных «печатных оттисков» — метод наплавления. Его разработали Скотт Крамп, основатель компании Stratasys, и его жена, продолжившие развитие 3D-печати. После этого стали активно использоваться понятия «лазерный 3D-принтер» и «струйный 3D-принтер» [13].

Современный исторический этап развития 3D-печати стартовал в 1993 году с созданием компании Solidscapе. Она производила струйные принтеры, которые предшествовали трехмерным. В 1995 году двумя студентами Массачусетского технологического института был модифицирован струйный принтер. Он создавал изображения не на бумаге, а в специальной емкости, и они были объемными. Тогда же появилось понятие «3D-печать» и первый 3D-принтер. Этот метод был запатентован, и теперь используется в созданной теми же студентами компании Z Corporation, а также в ExOne. Z Corp. до сих пор производит 3D-принтеры, использующие эту технологию [19].

История создания 3D-принтера продолжилась появлением технологии под названием PolyJet, основанной на использовании фотополимерного жидкого пластика. При таком способе печати головка «рисует» слой фотополимера, который моментально засвечивается лампой. Метод оказался выигрышным по многим параметрам: цена его значительно ниже, а высокая точность дает возможность изготовления не просто моделей, но готовых к применению деталей.

С течением времени развитие индустрии 3D-печати ускори́лось, появлялись новые фирмы производители 3D-принтеров, вносящие свой вклад в ее разработку, использовались новые материалы и принципы, размеры и цены устройств становились все меньше – первые 3D-принтеры были огромны, сейчас же они умецаются на столе (исключая разве что промышленный 3D-принтер). Современный трехмерный принтер все больше становится похож на обычный, печатающий на бумаге, по внешнему виду и технологии нанесения «красящего» вещества. Печатаемые им модели отличаются еще и высокой прочностью, поэтому могут применяться в качестве готовых изделий [8].

Сейчас 3D-принтер может занимать очень мало места – конечно, это зависит от его назначения. В начале развития цена такого принтера была доступна разве что очень крупным компаниям, теперь же любой человек может приобрести 3D-принтер, цена которого в среднем \$1000. История 3D-принтера еще не окончена, и самое интересное – впереди [6].

1.2 Классификация 3D принтеров

3D печать уверенно набирает обороты, и мы все чаще видим новости о том, что 3D принтер научили печатать детали для МКС, органы, дома и многое другое. Зарубежные технологические издания начинают говорить о том, что 3D печать способна воскресить промышленность в штатах, а сервис shapeways, у нас на глазах, показывает интересные темпы роста, хоть и далекие от промышленных. При таком обилии хвалебных текстов о надвигающейся революции в производстве на ум приходит мысль о том, что российский сегмент практически свободен, но так ли просто достигнуть промышленных масштабов при удешевлении самих принтеров и появления open source проектов?

Потребительский

Тип принтеров, который предназначен, в основном, для личного использования (рисунок 2). Поставляется в виде конструктора, либо в сборе. Подавляющее большинство моделей принтеров такого типа являются

производной от open source проекта RepRap. Так как платформа у них, в основном, одна и та же, их характеристики тоже весьма схожи.

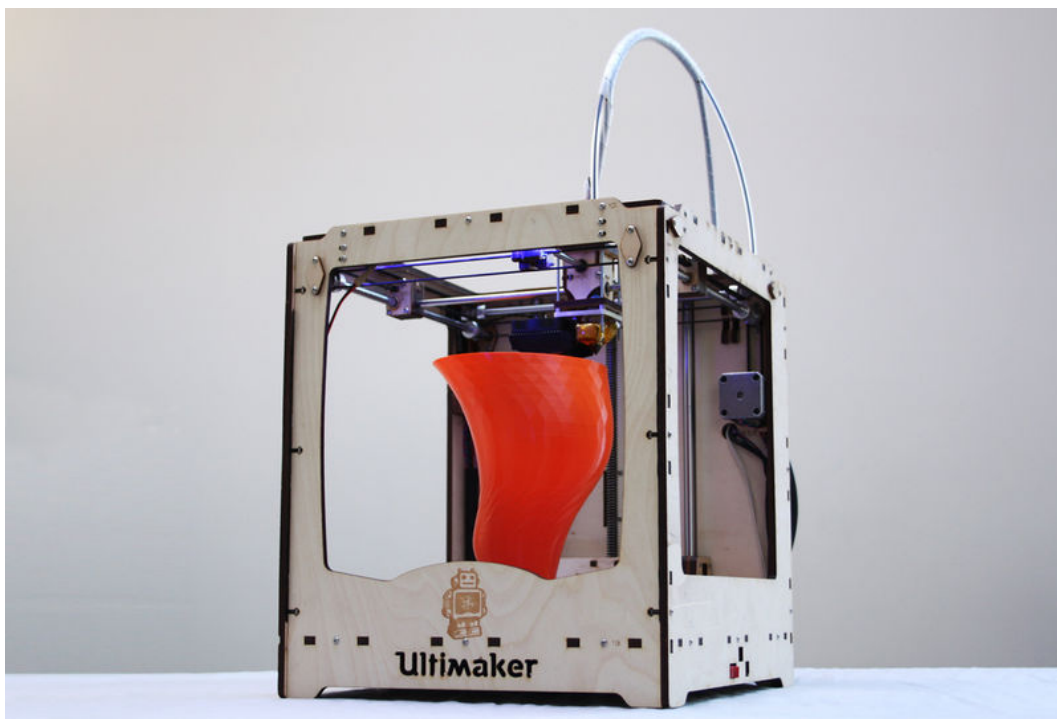


Рисунок 2 – 3D принтер компании Ultimaker

Спроектированы с оглядкой на обычного пользователя и оборудованы довольно простым и понятным интерфейсом. Печатают, как правило, ABS и PLA пластиком. Сложные и высокоточные объекты напечатать будет довольно проблематично, но обычные поделки они печатают с легкостью, хоть и долго.

Ценовой диапазон: 500\$ – 3500\$.

На кого ориентировано: дизайнеры, художники, изобретатели, которые работают дома [19].

Персональный

Пограничный класс принтеров, который является домашним, но в то же время относится к нижней ступени промышленных принтеров для бизнеса (рисунок 3). Эти принтеры имеют много общего с братьями из потребительского класса, но обладают более высоким качеством и точностью печати, которые присущи профессиональным 3D принт системам. Появление таких принтеров, это скорее реакция крупных производителей на растущий рынок домашних систем. Учитывая низкую точность потребительского класса, вендоры предложили

уменьшенные модели профессиональных систем с близкими к ним показателями. Оперировать принтерами этого класса так же просто и сводится к загрузке образа и нажатию кнопки «пуск». В то же время это ограничивает возможности в плане различных дополнительных параметров печати.

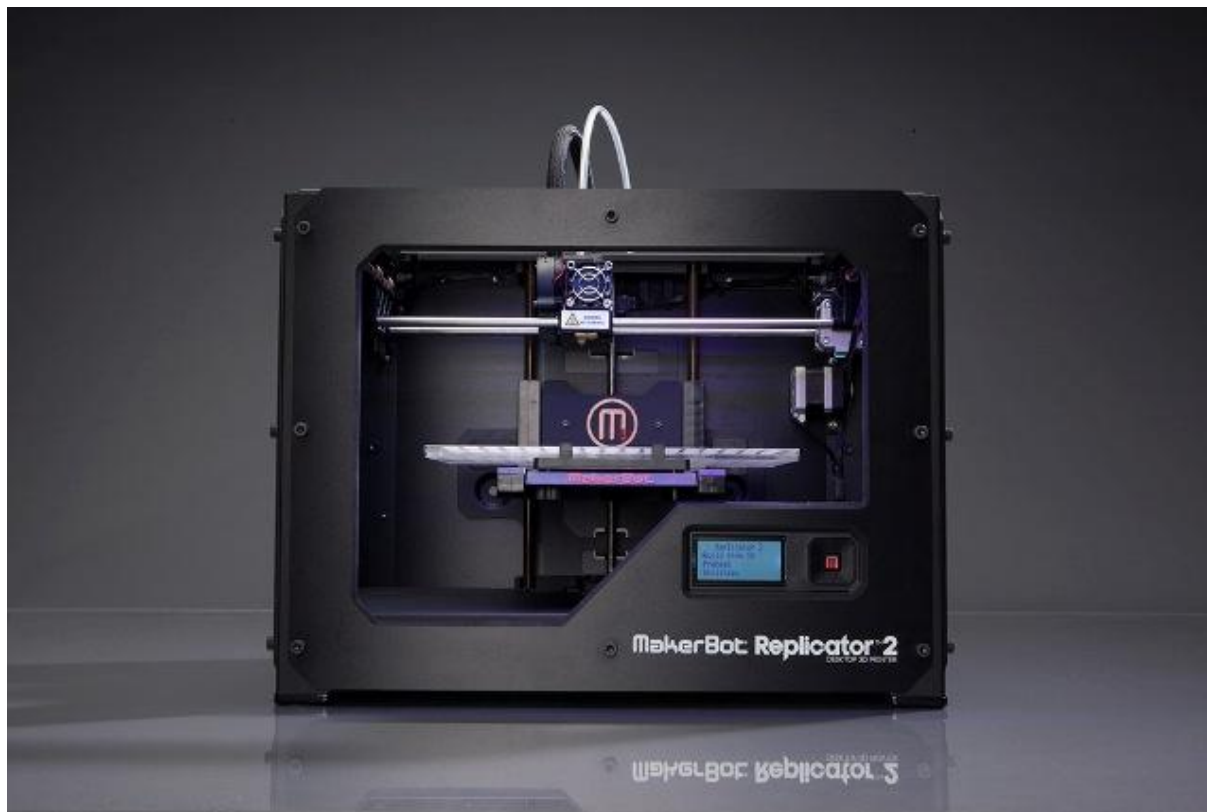


Рисунок 3 – 3D принтер компании MakerBot

Пригодны для использования в офисах, однако шумность и высокий температурный режим некоторых моделей предполагает их размещение на некотором удалении от рабочей зоны. Легкость очистки объектов на выходе не была перенесена в этот класс с промышленных моделей, поэтому логичным было бы размещение их в отдельном рабочем пространстве.

Ценовой диапазон: 7000\$ – 40 000\$.

На кого ориентировано: на малый бизнес с небольшим бюджетом, но у которого есть потребность в периодическом использовании 3D печати. Это могут быть инженерные компании, дизайн студии, маркетинговые агентства [18].

Профессиональный

Системы этого класса уже не выглядят компактными, а скорее похожи на большие холодильники (рисунок 4).



Рисунок 4 – Профессиональный 3D принтер

Это основа технологии 3D печати, которая включает в себя все достижения и возможности доступные индустрии. Предназначение профессиональных систем может быть очень разным, от прототипирования до полномасштабного производства, что в свою очередь делает их отличным вариантом как для крупного бизнеса, так и для высокотехнологичных компаний с малым штатом сотрудников. ShapeWays, кстати, использует принтеры именно такого класса.

В отличие от своих малых братьев, данные принтеры, ввиду большого количества режимов и дополнительных опций, уже требуют определенных навыков для работы с ними, поэтому без оператора здесь не обойтись. По части рабочего пространства здесь тоже не все так просто. Они очень большие и шумные, поэтому требуют отдельного помещения с хорошей вентиляцией.

Требования к помещению различаются, но пространство должно быть чем-то вроде лаборатории и с подведенной высоковольтной линией.

На выходе мы получаем универсальную 3D принт установку, которая предоставляет высочайшее качество печати и увеличенные, по сравнению с младшими классами, размеры продукта. ShapeWays, например, за цикл печати собирает по несколько объектов, располагая их на некотором удалении друг от друга, что в итоге положительно сказывается на скорости обработки заказа.

Ценовой диапазон: 30 000\$ – 750 000\$.

На кого ориентировано: на компании, у которых присутствует постоянная потребность прототипировании, моделировании, изготовлении разного рода объектов с высокими показателями качества и точности [21].

Производственный

Название класса говорит само за себя. Эти машины являются совокупностью точности и качества профессиональных принтеров, большой площадью печати, высокого уровня автоматизации и контроля процессов. На них, как и на профессиональных установках, можно печатать не только прототипы, но и конечный потребительский продукт (рисунок 5).



Рисунок 5 – Производственный 3D принтер

Системы такого рода не предназначены для рядовых пользователей, а суммы, которые придется вложить в такое производство вызовут у вас логичное желание нанять опытного оператора, который заставит работать весь механизм 24 часа в сутки без простоя.

Малыми помещениями здесь уже не обойтись. Здесь нужно четко спланировать будущую линию и позаботиться о подводе высоковольтной линии и газовой трубы.

На выходе получится высокотехнологичное производство, которое может быстро менять профиль и использовать материалы от ABS пластика до титана.

Ценовой диапазон: 300 000\$ – 1 000 000\$.

На кого ориентировано: на компании с потребностью в производстве высокоточных продуктов большого размера, либо на компании с потребностью в производстве большого количества менее объемных предметов с высокой точностью и высоким уровнем качества.

Несмотря на то, что порог входа в эту индустрию еще очень высок, за такими системами будущее. В пределах горизонта событий мы сможем лицезреть реальный переворот, как минимум, в высокотехнологичном производстве. Одними из первых это осознали в General Electric и уже стали производить на 3D принтерах сложные детали из титана для авиационных двигателей [9].

1.3 Популярные технологии 3D печати

FDM (Моделирование методом наплавления)

Существует много технологий 3D-печати, самая популярная называется моделированием методом наплавления (рисунок 6). Она очень проста: сложные объекты создаются из расплавленного пластика, выдавленного через сопло. Намотанная на катушку пластиковая нить (или даже металлический провод), разматываясь, подаётся в экструзионное сопло, при этом управляемый компьютером механизм, перемещает само сопло или объект (или оба) вдоль трёх осей. После выдавливания (экструзии) материал

моментально затвердевает. Для всех этих перемещений, также, как и для подачи нити в экструдер, обычно используются шаговые двигатели или сервомоторы [10].

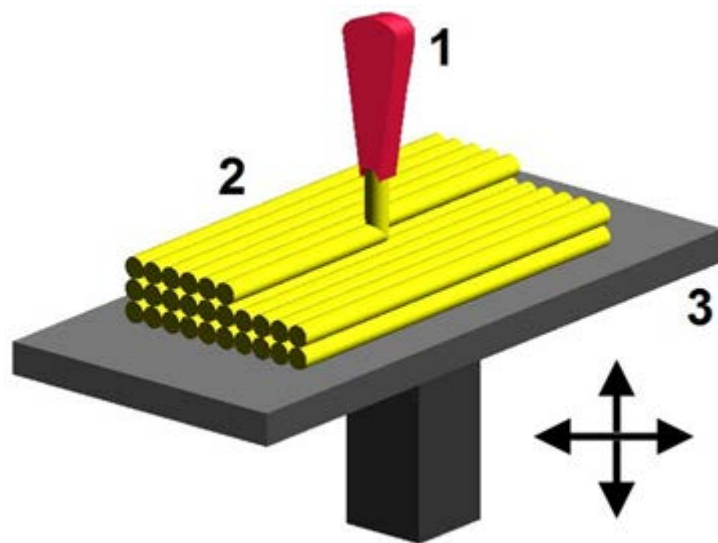


Рисунок 6 – Моделирование методом наплавления: 1 – дюза подает расплавленный пластик, 2 – осажденный материал (часть модели), 3 – управляемый подвижный столик

Технология Polyjet

Технология была изобретена израильской компанией Objet в 2000 году. Суть технологии: фотополимер маленькими дозами выстреливается из тонких сопел, как при струйной печати, и сразу полимеризуется на поверхности изготавливаемой детали под воздействием УФ излучения (рисунок 7).

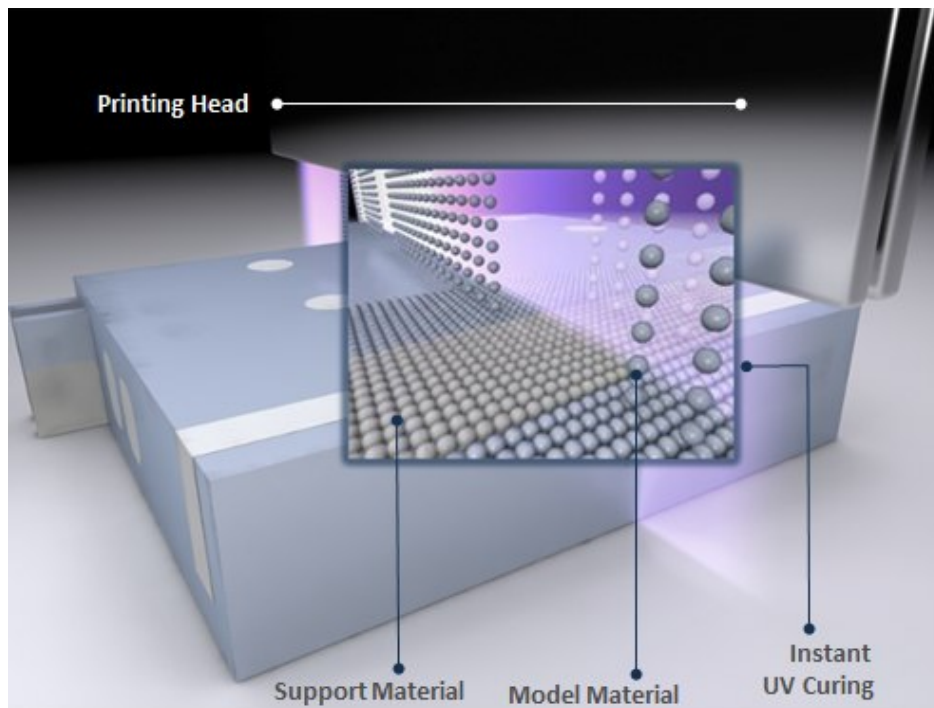


Рисунок 7 – Технология Polyjet

Важная особенность, отличающая PolyJet от стереолитографии, является возможность печати различными материалами.

Преимущества технологии:

- толщина слоя до 16 микрон (клетка крови 10 микрон);
- быстро печатает, так как жидкость можно наносить очень быстро.

Недостатки технологии:

- печатает только с использованием фотополимера – узко специализированный, дорогой пластик, как правило, чувствительный к УФ и достаточно хрупкий.

Применение: промышленное прототипирование и медицина.

LENS (Технология лазерной наплавки)

Материал в форме порошка выдувается из сопла и попадает на сфокусированный луч лазера (рисунок 8). Часть порошка пролетает мимо, а та часть, которая попадает в фокус лазера мгновенно спекается и слой за слоем формирует трехмерную деталь. Именно по такой технологии печатают стальные и титановые объекты [11].



Рисунок 8 – Технология лазерной наплавки

Поскольку до появления этой технологии печатать можно было только объекты из пластика, к 3D печати особенно серьезно никто не относился, а эта технология, открыла двери для 3D печати в «большую» промышленность. Порошки различных материалов можно смешивать и получать таким образом сплавы, на лету.

Применение: титановые лопатки для турбин с внутренними каналами охлаждения.

Производитель оборудования: Optomes.

ЛОМ (Производство объектов методом ламинирования)

Тонкие ламинированные листы материала вырезаются с помощью ножа или лазера и затем спекаются или склеиваются в трехмерный объект (рисунок 9). Т.е. укладывается тонкий лист материала, который вырезается по контуру объекта, таким образом получается один слой, на него укладывается следующий лист и так далее. После этого все листы прессуются или спекаются.

Таким образом печатают 3D модели из бумаги, пластика или из алюминия. Для печати моделей из алюминия используется тонкая алюминиевая фольга,

которая вырезается по контуру слой за слоем и затем спекается с помощью ультразвуковой вибрации [7].

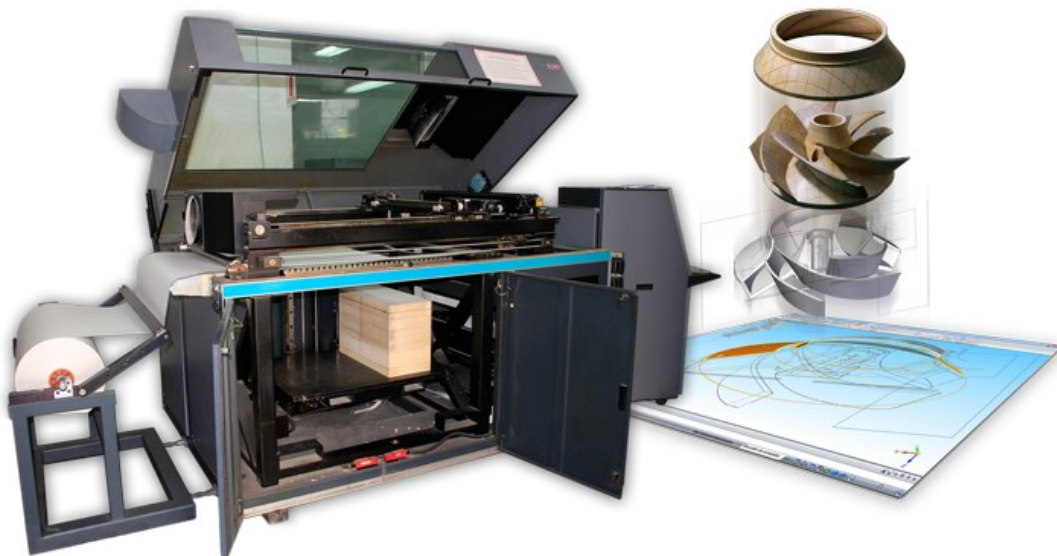


Рисунок 9 – 3D принтер, производящий объекты методом ламинирования

SL (Стереолитография)

Есть небольшая ванна с жидким полимером. Луч лазера проходит по поверхности, и в этом месте полимер под воздействием УФ полимеризуется (рисунок 10). После того как один слой готов платформа с деталью опускается, жидкий полимер заполняет пустоту далее запекается следующий слой и так далее. Иногда происходит наоборот: платформа с деталью поднимается вверх, лазер соответственно расположен снизу...

После печати таким методом, требуется постобработка объекта — удаление лишнего материала и поддержки, иногда поверхность шлифуют. В зависимости от необходимых свойств конечного объекта модель запекают в т.н. ультрафиолетовых духовках.

Фотополимер зачастую бывает токсичным поэтому при работе с ним нужно пользоваться средствами защиты и респираторами. Содержать и обслуживать такой принтер дома — сложно и дорого

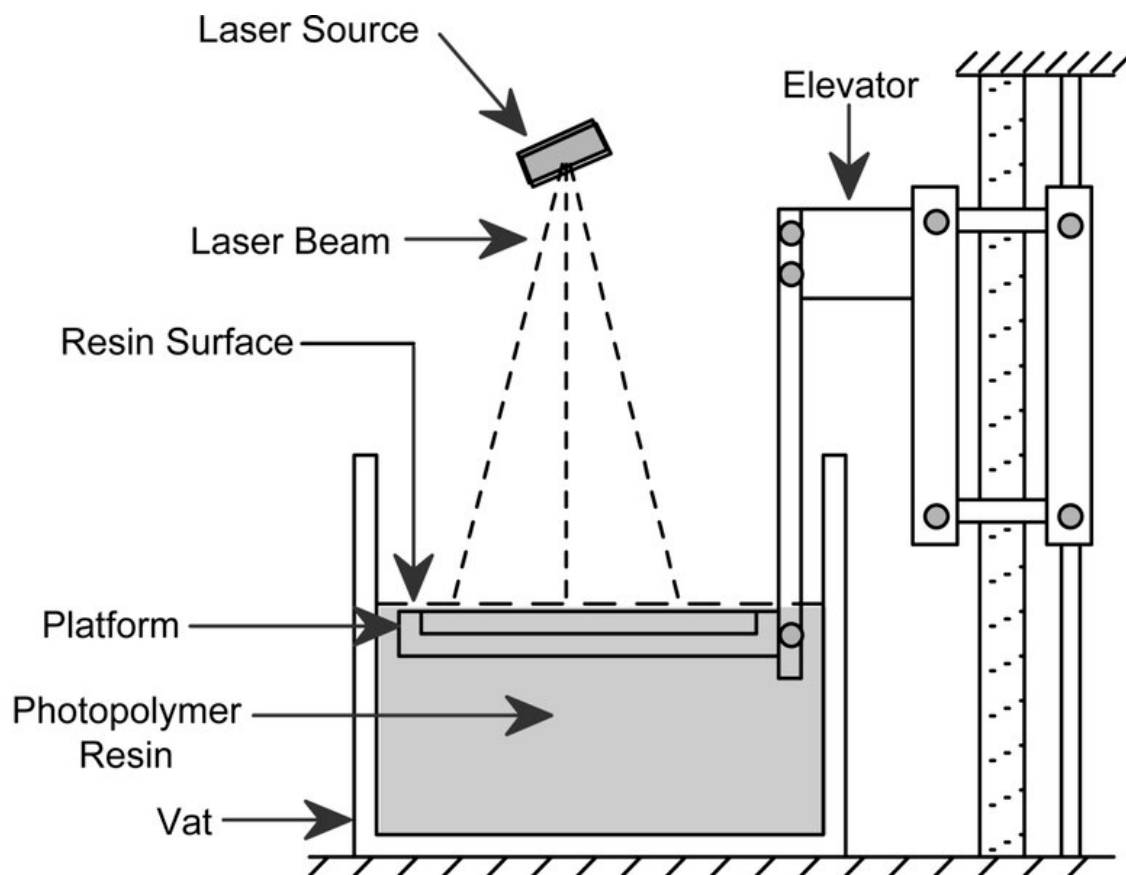


Рисунок 10 – Стереолитография

Преимущества:

- быстро и точно, точность до 10 микрон;
- для спекания фотополимера достаточно лазера от Blu-ray проигрывателя, благодаря чему на рынке появляются дешевые при этом точные принтеры, работающие по такой технологии.

LS (Лазерное спекание)

Лазерное спекание. Похоже на SL, только вместо жидкого фотополимера используется порошок, который спекается лазером (рисунок 11).

Преимущества:

- менее вероятно, что деталь сломается в процессе печати, так как сам порошок выступает надежной поддержкой;
- материалы в порошковой форме довольно легко найти в продаже в том числе это могут быть: бронза, сталь, нейлон, титан [12].



Рисунок 11 – Лазерное спекание

Недостатки:

- поверхность получается пористая;
- некоторые порошки взрывоопасны, поэтому должны храниться в камерах, заполненных азотом;
- спекание происходит при высоких температурах, поэтому готовые детали долго остывают, в зависимости от размера и толщины слоев, некоторые предметы могут остывать до одного дня.

3DP (Струйная трехмерная печать)

Технология изобретена в 1980 году в MIT студентом Paul Williams, технология была продана в несколько коммерческих организаций, одна из которых — zCorp, в настоящее время поглощена 3D Systems.

На материал в порошковой форме наносится клей, который связывает гранулы, затем поверх склеенного слоя наносится свежий слой порошка, и так

далее. На выходе, как правило, получается материал sandstone (похожий по свойствам на гипс), представлен на рисунке 12.

Преимущества:

- так как используется клей, в него можно добавить краску и таким образом печатать цветные объекты;
- технология относительно дешевая и энергоэффективная;
- можно использовать в условиях дома или офиса;
- можно печатать использовать порошок стекла, костный порошок, переработанную резину, бронзу и даже древесные опилки.

Используя похожую технологию можно печатать съедобные объекты, например, из сахара или шоколадного порошка. Порошок склеивается специальным пищевым клеем, в клей может добавляться краситель и ароматизатор.

Как пример, новые 3D принтеры от компании 3D systems, которые были продемонстрированы на CES 2014 — ChefJet и ChefJet Pro [14].



Рисунок 12 – Струйная трехмерная печать

Недостатки:

- на выходе получается достаточно грубая поверхность, с невысоким разрешением ~ 100 микрон;
- материал нужно подвергать постобработке (запекать), чтобы придать ему необходимые свойства.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

2.1 Описание станда

Модель учебного станда представляет собой 3D принтер с печатной головкой (экструдер) для нагрева и выдавливания материала, подогреваемой платформой, с установленными: платой микроконтроллера (рисунок 13) и платой силовой части с драйверами двигателей.

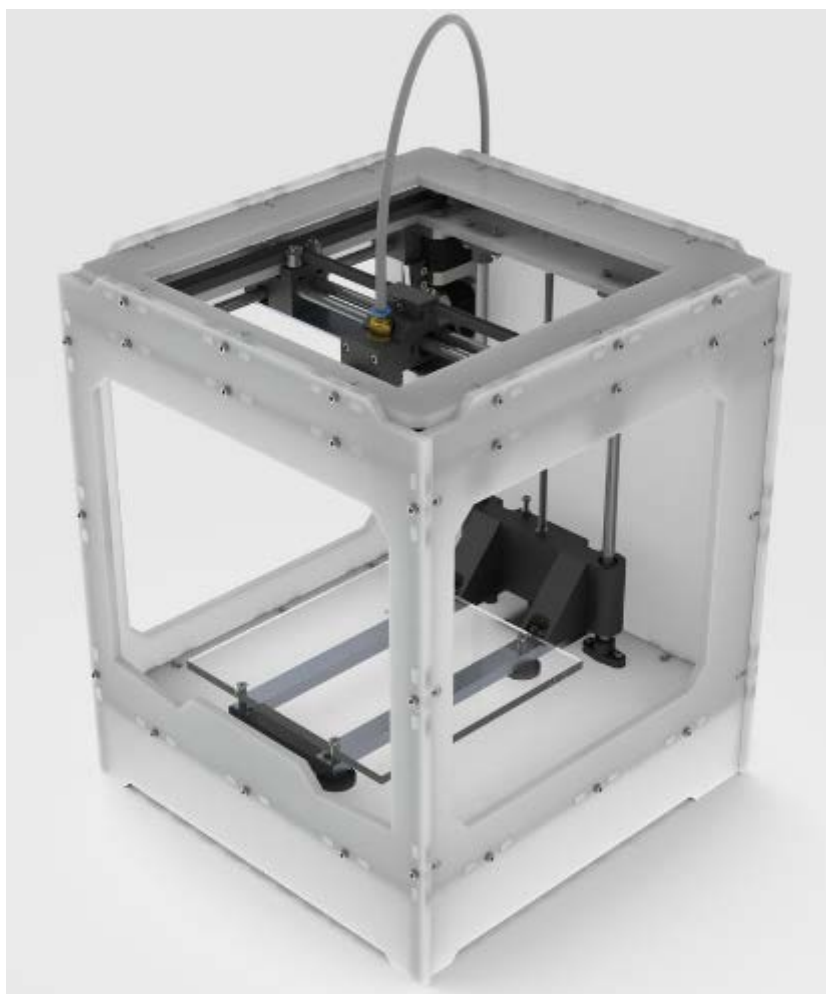


Рисунок 13 – Учебный стенд на основе микроконтроллера ATmega 2560

На стенде, установлены четыре двигателя, для движения печатной головки по оси X и Y, движения подогреваемой платформы по оси Z и подачи материала в печатающую головку. Также установлен блок питания форм-фактора АТХ, мощностью 350 Вт.

Конструкция аналогична ЧПУ станку, отличие только в процессе создания объекта. 3D-печать достигается посредством аддитивных процессов, во время которого каждый слой материала кладётся в разной форме. Это отличает её от традиционных техник механической обработки, большинство которых основано на удалении материала путём его обрезания или сверления (субтрактивные процессы).

Две боковые стенки принтера изготовлены из оргстекла, остальные из фанерной доски. Направляющие валы, экструдер, подогреваемая платформа закреплены на пластиковых деталях, которые в свою очередь закреплены на фанерной доске с помощью болтов и гаек размера М3. Между собой стенки закреплены алюминиевыми уголками.

На задней стенке стенда установлена плата микроконтроллера ATmega 2560 с установленной на ней силовой частью и драйверами двигателей оснащенные микросхемой A4988.

Питание всей схемы производится напряжением +12 вольт от блока питания, установленного на задней стенке стенда. Питающие провода подключаются в колодку питания на силовой плате, от которой параллельно питается плата микроконтроллера.

Монтажная схема учебного стенда представлена в приложении Д.

2.2 Выбор микроконтроллера

Микроконтроллеры являются основой современной электроники и электронной техники. Они находят применение в устройствах различного применения, будь то электронные часы или системы управления технологическим процессом на заводах. При выборе элементной базы не возникает вопросов, какие электронные компоненты использовать, поскольку сразу стало очевидно, что поставленные задачи можно решить только с использованием в разработке микроконтроллеров. Но совершенно очевидно, что хоть микроконтроллеры могут

решать довольно сложные задачи, их использование требует глубоких знаний программирования, а также определенного умения и опыта [2].

Самой подходящей для выполнения данной работы, является фирма Atmel, поскольку ее микроконтроллер ATmega2560 в составе отладочной платы Arduino Mega имеет некоторые значительные преимущества:

- плата имеет 54 цифровых входа/выходов (14 из которых могут использоваться как выходы ШИМ), 16 аналоговых входов, 4 последовательных порта UART, кварцевый генератор 16 МГц, USB коннектор, разъем питания, разъем ICSP и кнопка перезагрузки;
- наличие огромного количества примеров программ, библиотек, которые помогают значительно ускорить разработку электронных устройств;
- наличие встроенного программатора;
- большая устойчивость к воздействиям внешних факторов (резкие изменения температуры, удары молний).

Поэтому выбор был остановлен на микроконтроллере ATmega2560, поскольку он обладает необходимыми возможностями для выполнения моей работы, является высокопроизводительным, имеет хороший объем flash памяти для программирования. В приложении А представлена схема выводов микроконтроллера ATmega2560 (рисунок 14).



Рисунок 14 – Микроконтроллер ATmega2560

2.3 Описание платы управления

В качестве платы управления используется Arduino Mega с установленным на нем микроконтроллером ATmega2560 (рисунок 15).

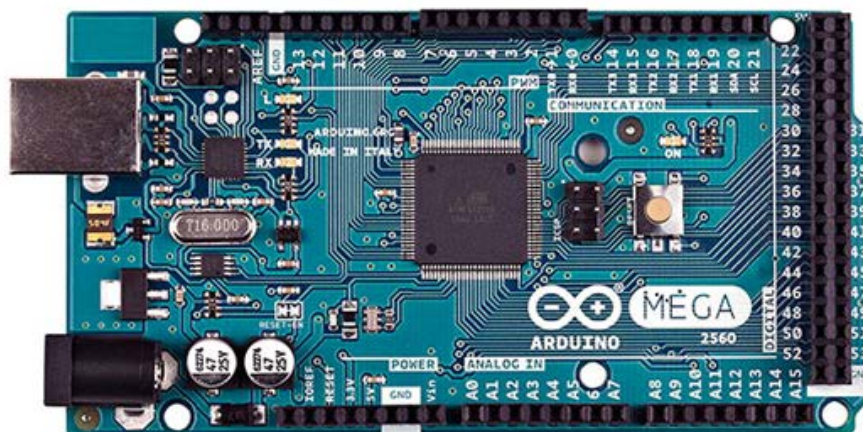


Рисунок 15 – Отладочная плата Arduino Mega

Основные характеристики Arduino Mega 2560 представлены в таблице 1 [3].

Таблица 1 – Основные характеристики Arduino Mega 2560

Микроконтроллер	ATmega2560
Рабочее напряжение	5В
Напряжение питания (рекомендуемое)	7-12В
Напряжение питания (предельное)	6-20В
Цифровые входы/выходы	54 (из которых 15 могут использоваться в качестве ШИМ-выходов)
Аналоговые входы	16
Максимальный ток одного вывода	40 мА
Максимальный выходной ток вывода 3.3V	50 мА
Flash-память	256 КБ из которых, 8 КБ используются загрузчиком
SRAM	8 КБ
EEPROM	4 КБ
Тактовая частота	16 МГц

Предельно допустимые параметры:

- напряжение питания постоянного тока, от +7В до +12В;
- максимальный выходной ток на один выход, 40 мА.

Назначение:

- отладочная плата предназначена для ускорения процесса разработки и отладки электронной аппаратуры;
- может являться частью промышленно выпускаемой электронной аппаратуры;
- в составе учебного стенда может использоваться для изучения микроконтроллера ATmega2560 фирмы Atmel.

Основные особенности:

- Arduino Mega 2560 отличается от всех предыдущих плат тем, что в нем для преобразования интерфейсов USB-UART вместо микросхемы FTDI используется микроконтроллер ATmega16U2;
- защита всех линий ввода-вывода токоограничивающими резисторами;
- распиновка 1.0: добавлены выводы SDA и SCL (возле вывода AREF), а также два новых вывода, расположенных возле вывода RESET. Первый - IOREF - позволяет платам расширения подстраиваться под рабочее напряжение Ардуино. Данный вывод предусмотрен для совместимости плат расширения как с 5В Ардуино на базе микроконтроллеров AVR, так и с 3.3В-платами Arduino Due. Второй вывод ни к чему не подсоединен и зарезервирован для будущих целей;
- улучшена помехоустойчивость цепи сброса.

В приложении Б показана принципиальная схема платы, расположение элементов на плате и их перечень.

2.4 Описание силовой части

В качестве платы силовой части была выбрана плата RAMPS 1.4 (RepRap Arduino Mega Pololu Shield). В нем пять независимых контроллеров: три - для шаговых двигателей (ось X, Z, Y), два - для экструдеров (можно подключить один или два экструдера). Имеется выход для нагревательного стола, термисторов стола и экструдеров, выход на коннектор SD карты, SPI и I2C. 6 выходов для концевых выключателей [16].

Основные особенности:

- расширения возможностей платы при помощи дополнительных плат расширения;
- Mosfets для обогревателей и вентилятора с выходами для работы с тремя схемами использующих контроль нагрева при помощи термисторов;
- плавкий предохранитель на 5А для дополнительной защиты компонентов платы;
- блок управления для обогрева печатного стола с дополнительным 11А предохранителем;
- одновременное управление 5-ю двигателями;
- I2C и SPI разъёмы для будущего расширения;
- все Mosfets подключены в разъем ШИМ для универсальности.

Разъёмы для подключения оборудования имеют вид такой же, как на Сервоприводах. Эти разъёмы рассчитаны на нагрузку 3А, очень компактны и доступны во всем мире.

Плата имеет светодиоды индикации нагрева печатного стола и Экструдера.

Рисунок платы показан на рисунке 16.

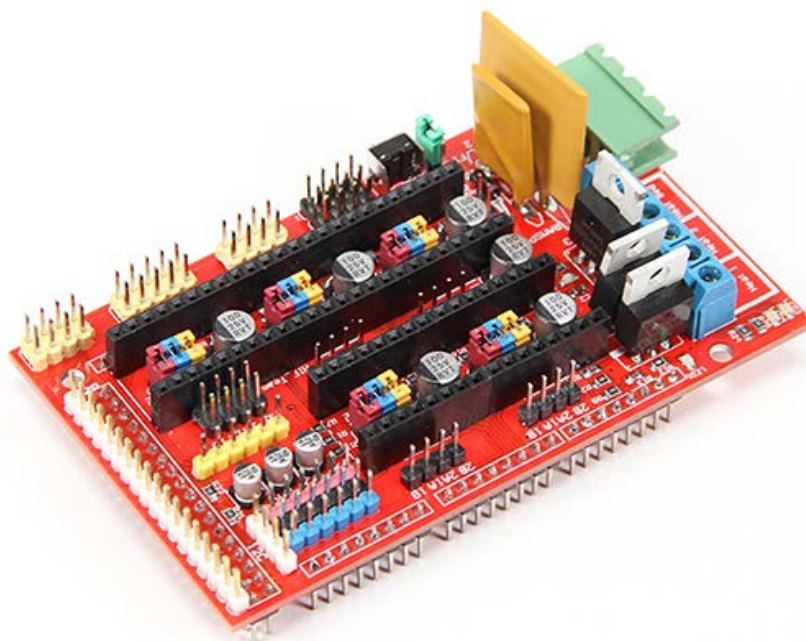


Рисунок 16 – Плата силовой части RAMPS

Принципиальная схема платы представлена в приложении В.

2.5 Выбор драйвера двигателей

Для управления двигателями выбрано использовать микросхему A4988 компании Allegro – драйвер биполярного шагового двигателя (рисунок 17), Особенностями этого драйвера являются регулируемый ток, защита от перегрузки и перегрева. Для работы с драйвером необходимо питание логического уровня (3 - 5,5 В), подаваемое на выводы VDD и GND.

Используя данный драйвер, можно управлять шаговым двигателем с довольно широким диапазоном питающего напряжения от 8 до 35 вольт и может обеспечить ток до 1А на фазу без радиатора и дополнительного охлаждения (дополнительное охлаждение необходимо при подаче тока в 2А на каждую обмотку).

Основные особенности:

- простой интерфейс управления шагом и направлением вращения электродвигателя;
- пять различных разрешений перемещения: полный шаг, 1/2-шага, 1/4-шага, 1/8-шага, 1/16-шага;
- регулируемый контроль тока с помощью потенциометра, позволит установить максимальный выходной ток. Это даст вам возможность использовать напряжение выше допустимого диапазона для достижения более высокой угловой скорости шага двигателя;
- интеллектуальное управление автоматически выбирает режим регулировки затухания тока (медленный и быстрый режимы);
- защитное отключение при перегреве и перегрузке по току, а также блокировка питания при пониженном напряжении;
- защита от короткого замыкания на землю, защита от замыкания в нагрузке.



Рисунок 17 – Микросхема драйвера двигателей A4988

Принципиальная схема представлена в приложении Г.

2.6 Описание шаговых двигателей

Шаговые двигатели («stepper motors» или «stepping motors» - англ.) – это одна из разновидностей бесколлекторных двигателей, которая применяется в периферийных устройствах компьютерной техники, приводах дисководов, робототехнике, промышленном оборудовании и т.п.

Их основное отличие – это то, что при подаче на обмотки двигателя импульса напряжения поворот его ротора осуществляется на некоторый угол, или, как принято говорить, шаг («step» - англ.), отсюда и название двигателя. Этот шаг определяется конструктивными особенностями двигателя и схемой управления. Он не зависит от тока обмоток, следовательно, не зависит и от величины импульса напряжения, поданного на такой двигатель. Шаговый двигатель позволяет осуществлять позиционирование его ротора с точностью до долей градуса, что абсолютно недостижимо для других типов двигателей. Скорость вращения двигателя определяется только частотой следования импульсов управления.

Момент, развиваемый двигателем, зависит как от тока в обмотках, так и от длительности поданного на них импульса. Момент вращения ротора шагового двигателя, максимален на минимальной скорости вращения.

Ротор такого двигателя можно достаточно жестко зафиксировать в нужном положении без применения тормозных и удерживающих систем, например, электромагнитных муфт. Для этого достаточно сохранить ток в обмотках двигателя в заданном положении ротора, и он будет зафиксирован в нужном положении. Естественно, он будет находиться в этом положении до тех пор, пока внешний приложенный момент не превысит момента удержания ротора. Шаговые двигатели, в отличие от коллекторных двигателей, практически вечны. Эти свойства шаговых двигателей и определили их сферу применения - устройства точного позиционирования (станки с точной подачей резца, например, гравировальные и фрезерные, управление манипуляторами в робототехнике, различные автоматы, 3D-принтеры и т.п.).

В данном стенде для точного позиционирования исполнительного органа используются гибридные шаговые двигатели.

Гибридные двигатели являются более дорогими, чем двигатели с постоянными магнитами, зато они обеспечивают меньшую величину шага, больший момент и большую скорость. Гибридные двигатели сочетают в себе лучшие черты двигателей с переменным магнитным сопротивлением и двигателей с постоянными магнитами. Ротор гибридного шагового двигателя имеет зубцы, расположенные в осевом направлении.

Типичное число зубцов гибридного двигателя от 100 до 400 (угол шага $3,6...0,9^\circ$). Статор гибридного двигателя также имеет зубцы, обеспечивая большее количество эквивалентных полюсов, на которых расположены обмотки. Обычно используется 4 основных полюса для $3,6^\circ$ и 8 основных полюсов для $1,8^\circ$ или $0,9^\circ$. Большинство двигателей этого типа имеют 100 полюсов (50 пар), и с учетом двухфазного исполнения полное количество полюсов равно 200, а угол шага равен $1,8^\circ$ ($360/200$).

Кроме конструктивных особенностей, связанных с исполнением ротора, двигатели отличаются и исполнением обмоток статора.

В зависимости от конфигурации обмоток, двигатели делятся на униполярные и на биполярные и имеют три варианта исполнения конфигурации обмоток. На рисунке 18 показаны варианты исполнения обмоток шагового двигателя [4].

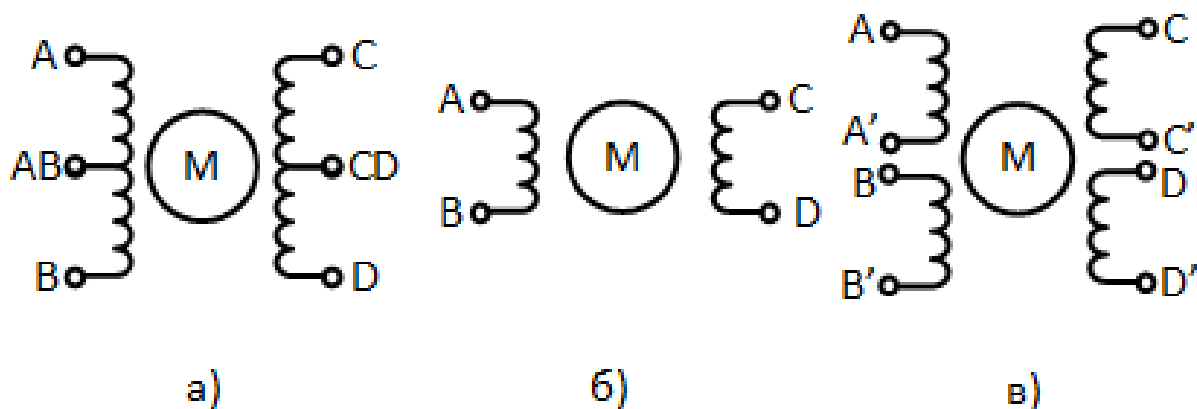


Рисунок 18 – Варианты исполнения обмоток статора шагового двигателя:
а) униполярный; б) биполярный; в) четырехобмоточный

В данной разработке для позиционирования исполнительного органа будет использоваться шаговый двигатель 17HS4401 серии Nema 17 изображенный на рисунке 19.

Технические характеристики:

- модель: 17HS4401;
- угловой шаг: $1.8^\circ \pm 5\%$;
- число фаз: 2;
- номинальный ток: 1.7 А;
- сопротивление фазы: 1.5 Ом;
- индуктивность фазы: 2.8 мГн;
- момент инерции: 54 г x см²;
- момент удержания: 4 кг x см;
- масса: 0.28 кг.

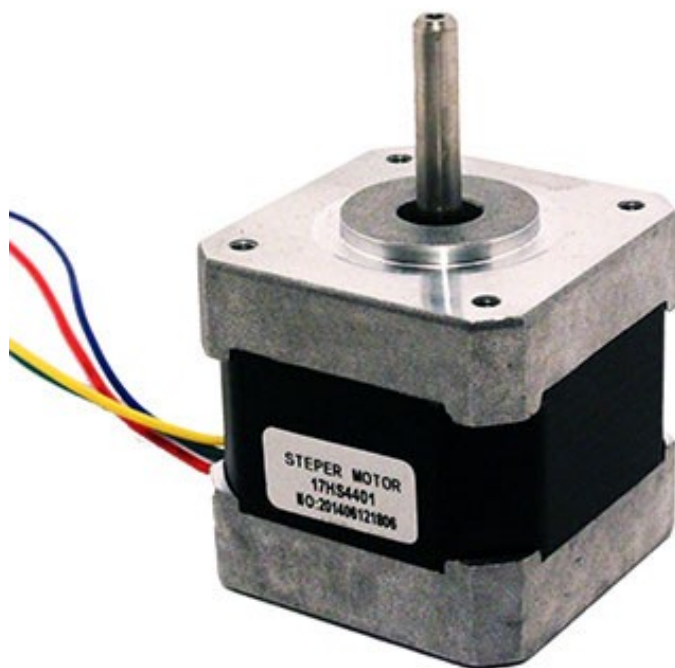


Рисунок 19 – Шаговый двигатель 17HS4401

2.7 Выбор нагревательных элементов и терморезисторов

Для данного стенда необходимо подобрать два нагревательных элемента, для стола, на которой размещается печатаемая модель и экструдера [17].

Нагревательный стол

Нагревательный стол для 3D-принтера помогает лучше прилипнуть пластику и не допускает "скручивания" во время остывания. Так как стол из стеклотекстолита и при нагреве деформируется, то поверх нагреваемого стола ложится зеркало для того чтобы поверхность была идеально ровной. Для улучшения фиксации печатаемой детали к столику используется термоскотч, который выдерживает температуру до 300 градусов. В центре нагреваемого стола имеет отверстие для установки термистора, который используется для контроля температуры.

В данном стенде был установлен нагреваемый стол МК2В, изображенный на рисунке 20.



Рисунок 20 – Подогреваемый стол МК2В

Технические характеристики:

- размер стола: 214x214мм;
- материал: стеклотекстолит FR4;
- монтажные отверстия: 209x209мм;
- напряжение питания: 12В или 24В;
- максимальная температура 12/24V - 110/150 градусов;
- потребляемый ток: минимальный 10А;
- сопротивление нагревательных элементов: 1.8 Ом.

Нагревательный элемент экструдера

Нагревательный элемент в экструдере необходим для размягчения пластика в экструдере, для последующего выдавливания пластиковой нити диаметром 1,75 через сопло диаметром от 0,2 до 0,6 мм.

В данном стенде в качестве нагрева экструдера служит керамический нагревательный элемент (рисунок 21), рассчитанный на 12 В, 40 Вт.

В отличие от обычного резистора имеет большую мощность и соответственно скорость нагрева, что положительно сказывается на качестве печати, т.к. во время печати головка экструдера греется быстрее, а значит амплитуда температурных колебаний уменьшается.



Рисунок 21 – Керамический нагревательный элемент

Терморезисторы

Терморезистор (термистор) - это полупроводниковый резистор, в котором используется зависимость электрического сопротивления от температуры. Изменение температуры терморезистора, а следовательно, его сопротивление может быть вызвано либо изменением температуры окружающей среды, либо нагревом терморезистора, проходящим через него током, либо воздействием обоих этих факторов.

В качестве терморезистора в стенде используется NTC термистор сопротивлением 100 кОм, сопротивление которого падает с увеличением температуры.

Технические характеристики:

- значения сопротивления: $R(25^\circ\text{C}) = 100\text{K} \pm 1\%$;
- диапазон рабочих температур: от -50 до $+260^\circ\text{C}$.

2.8 Выбор направляющих валов

В качестве направляющих были выбраны полированные валы диаметром 8 мм, которые обеспечивают линейное перемещение подшипников, а следовательно, рабочего органа. Направляющие выполнены из углеродистой стали с закалкой на глубину 1.5 мм.

2.9 Выбор линейных подшипников

Линейный подшипник в паре с цилиндрическим стержнем можно отнести к направляющим прямолинейного движения, также их называют шариковыми втулками, линейными втулками. Направляющие прямолинейного движения — это опоры, которые обеспечивают прямолинейность перемещения деталей (столов, суппортов, ползунов) в заданном направлении и воспринимают действующие на них силы. С появлением на рынке СНГ дистрибьюторов таких известных фирм, как Bosch, SKF, HIWIN, линейные подшипники находят все большее применение. В общетехнических справочниках отсутствует даже упоминание о линейных подшипниках.

Основным достоинством линейных подшипников является малая сила сопротивления движению.

Линейные подшипники применяют в машинах, если необходимо: уменьшить силы сопротивления движению для перемещения деталей вручную и для перемещения тяжелых деталей; медленно равномерно перемещать или точно устанавливать детали; перемещать детали с высокой скоростью.

Линейный подшипник (рисунок 22) состоит из: наружной гильзы, тел качения, сепаратора, уплотнения и запорных колец.

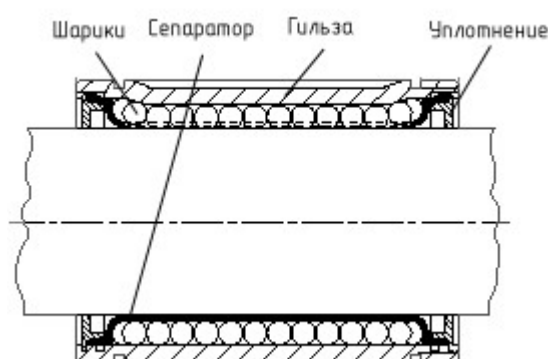


Рисунок 22 – Элементы линейного подшипника

Наружная гильза является корпусом линейного подшипника. Гильза имеет высокую твердость и шлифованную поверхность.

Тела качения представляют собой шарики, выполненные из подшипниковых сталей, обладающих антифрикционными свойствами. Шарики циркулируют по замкнутой траектории в сепараторе.

Уплотнение скребкового типа служит для предотвращения попадания грязи в подшипник и сохранения в нем смазки. Уплотнение может быть встроенного и разделяемого типа. Уплотнение разделяемого типа рекомендуется при работе в загрязненной среде.

Запорные кольца служат для фиксации линейного подшипника в корпусе и ничем не отличаются от применяемых в машиностроении пружинных кольцевых стопоров (зегеров). Возможна поставка подшипника как с кольцами, так и без них.

В данной разработке были применены линейные подшипники LM8UU компании HIWIN, изображенные на рисунке 23.

Технические характеристики:

- материал: углеродистая сталь;
- внутренний диаметр, мм: 8;
- внешний диаметр, мм: 15;
- длина, мм: 24.



Рисунок 23 – Линейные подшипники LM8UU компании HIWIN

2.10 Высокотемпературная полиамидная лента

Полиамидная лента, также известная под названием каптоновая лента, обычно используется в электрике или электронике. Ее свойства включают в себя устойчивость к высоким температурам, большое усилие на разрыв и великолепная сопротивляемость к химическим веществам.

В электрической и электронной промышленности каптоновая лента имеет несколько определенных сфер применения, таких как:

- изоляционная обмотка катушек трансформаторов и двигателей;
- обмотка и крепление окончаний термоустойчивых катушек;
- защита термометров сопротивления;
- изоляция конденсаторов, пучков проводов и других компонентов, работающих в условиях высоких температур.

В промышленности изготовления монтажных схем, каптоновая лента подходит для обеспечения защиты от нагрева и попадания воды на выключатели,

трансформаторы, реле, печатные платы и другие электронные детали поверхностного монтажа (SMT).

Также, данная лента может быть применена при волновой спайке, изоляции в бытовой технике класса люкс, изоляции двигателей, а также для крепления анодов и катодов в литиевых батареях.

Полиамидная лента в данной разработке применяется для закрепления термистора в экструдере и нагревательном столе, также лента используется для печати на нем моделей из ABS пластика, т.к. у полиамидной ленты очень высокая адгезия.

2.11 Нить-материал для изготовления различных форм предметов

В настоящее время существуют два вида пластика, широко используемых для недорогой 3D печати и несколько менее распространенных. Интересно то, что разрабатываются и тестируются многие виды пластика, имеющих куда более широкий диапазон физических, химических и механических характеристик, что открывает путь к использованию 3D печати в различных направлениях. Доступ к новым печатным материалам может круто изменить рынок материалов для печати [22].

Пластиковые прутки производятся в двух стандартах: диаметром 1.75 мм и 3.0 мм. Трехмиллиметровый пруток – более старый стандарт, он постепенно вытесняется 1.75-мм, который выдавливается немного легче, управляется немного лучше и оставляет меньше висячих хвостов с боков вашего изделия. В любом случае, множество современных принтеров до сих пор используют 3 мм пруток, и он, иногда, немного дешевле чем 1.75 мм.

Полилактид (PLA)

Наиболее распространенная пластмассовая нить, сделанная из полимолочной кислоты (или полилактид (PolyLactide Acid) – сокращено PLA53), биоразлагаемый и экологичный пластик получаемый из растительного сырья (кукуруза, сахарный тростник, пшеница, сахарная свёкла). Температура

плавления в пределах 180–230 °С. Он не имеет неприятного запаха во время печати и его пары не опасны, поэтому не требуется специальных мер безопасности или принудительной вентиляции.

Он хорошо держится на печатном основании при комнатной температуре (не требуя более дорогого нагреваемого основания для принтера), но только если платформа покрывается синим скотчем (также недорогой продукт, который необходимо время от времени заменять – главным образом, потому что он иногда получает повреждения во время удаления объекта с платформы).

Объекты, напечатанные PLA, крепкие, но относительно хрупкие, и не могут использоваться при высоких температурах (как для некоторых частей самого 3D принтера).

Нить PLA довольно недорогая, ее стоимость в среднем 30\$ за 1 кг, и она обычно продается в катушках по 0.5, 1 или 2.3 килограмма (но некоторые изготовители продают метрами). Она доступна в естественном (белый матовый) цвете или во множестве ярких цветов, чистых или полупрозрачных, отпечатанные объекты имеют красивую гладкую поверхность.

Специальный вариант PLA – мягкий или эластичный (soft/flexible) PLA, который выдавливается при низкой температуре и очень низкой скорости, может использоваться для печати гибких сочленений, лент, шин, и т.д.

АБС (акрилонитрилбутадиенстирол)

Вторая наиболее распространенная нить, изготовленная из акрилонитрилбутадиенстирола (Acrylonitrile Butadiene Styrene), кратко ABS55. Основанная на нефтепродуктах пластмасса, используемая для различных целей, одна из хорошо известных – это детали конструктора LEGO™. Её пары имеют ужасный запах (как жжёные пластиковые бутылки) и даже считаются опасными для здоровья, поэтому рекомендуется использовать принудительную вентиляцию для отвода продуктов горения пластика, когда печать ABS длится долгое время. Температура плавления ABS 210 - 260 °С.

Нить ABS стоит приблизительно как PLA и является также довольно распространенным материалом для печати, несмотря на его более высокие

требования. Объект ABS обычно печатается на нагреваемом основании (в пределах 100°C), покрытом каптоновой пленкой, для лучшей адгезии, плюс стоимость и сложность самого принтера (поэтому, не все принтеры идут с нагреваемым основанием, это как недостаток, и у некоторых нет этого как опции).

Преимущество ABS по отношению к PLA состоит в том, что получающиеся объекты более прочные и менее хрупкие, и могут выдерживать высокие температуры. Нить ABS обычно доступна во многих цветах, включая блестящий, светящийся в темноте, золотой, серебряный, и даже цвет, который изменяется под влиянием температуры (например, синий/зеленый ниже 30°C и желтый/зеленый выше, делают объекты, напечатанные такой нитью, чувствительными к температуре тела).

В данном 3D-принтере используется и PLA и ABS пластик диаметром прутка 1,75 мм.

Технические характеристики ABS пластика:

- плотность: 1.05 г/см³;
- предел прочности на разрыв: 30 МПа (23°C);
- ударная прочность: 130 (при 23°C), 100 (при -30°C) КДж/м²;
- температура размягчения: ~100°C;
- температура плавления: ~210°C - ~245°C.

Технические характеристики PLA пластика:

- плотность: 1.25 г/см³;
- предел прочности на разрыв: 28 Мпа (23°C);
- температура размягчения: ~ 60°C - ~ 110°C;
- температура плавления: ~ 180°C - ~ 220°C.

3. ПРОГРАММИРОВАНИЕ

3.1 Нарезка модели и передача инструкций в микроконтроллер

Этот шаг, возможно, самый интересный в долгом процессе движения от идеи к реальному трехмерному объекту, потому что он раскрывает в тончайших и глубочайших подробностях работу 3D принтера по преобразованию грубой пластиковой нити в наши красивые творения. Подготовка 3D модели к печати – это тонкая комбинация технических знаний, науки и искусства, и требуется много времени, чтобы освоить эту процедуру.

Перед печатью нашу модель (сохраненную или экспортированную в STL-файл) следует преобразовать в набор инструкций для принтера (стандартный формат, называемый g-кодом): это задача называется нарезкой (потому что модель «нарезается» на множество тонких горизонтальных слоев, которые будут последовательно напечатаны), выполняется с помощью комплекса программ, называемых слайсерами (рисунок 24).

Фактически, информация, содержащаяся в STL-файле бесполезна для принтера потому, что она содержит лишь длинный список координат $\langle X, Y, Z \rangle$, определяющих вершины, составляющие множество многоугольных поверхностей сетки объекта (рисунок 25).

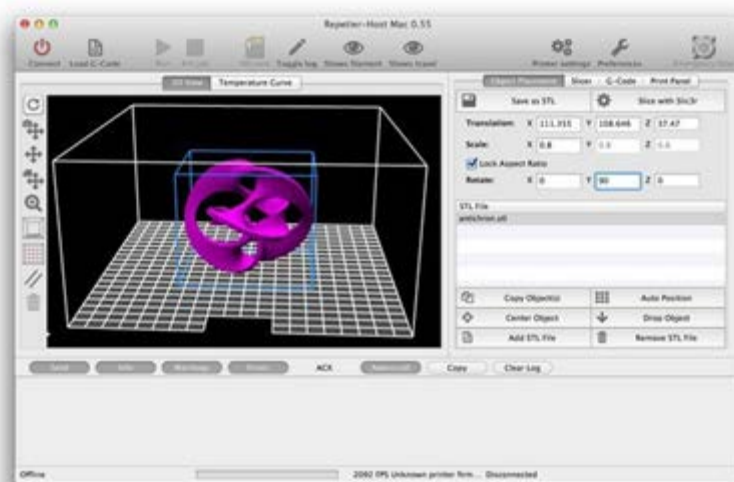


Рисунок 24 – Главное окно программы-слайсера

Принтеру нужна очень разная информация: движения печатающей головки и/или платформы в различных направлениях X, Y и Z, количество выдавливаемой пластмассы и точное время, когда необходимо начинать и прекращать выдавливание, температура сопла и печатной платформы, и так далее...

Это «преобразование» из координат вершин в команды печати – довольно тяжелая в вычислительном смысле задача, и не может обрабатываться в реальном времени ограниченным процессором самого принтера во время печати, поэтому это должно быть сделано заранее на внешнем компьютере. Другая причина поступать таким образом в том, что такой процесс нарезки требует целого ряда дополнительных параметров, которые должны быть предоставлены пользователем (например, высота слоя – это лишь самый очевидный, но еще много других), и графический интерфейс реального компьютера делает эту задачу гораздо проще.

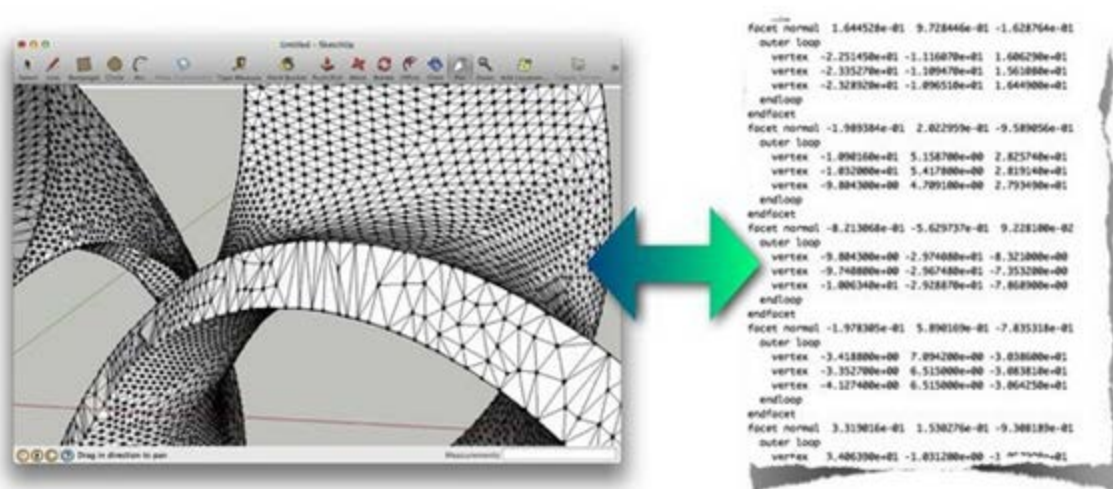


Рисунок 25 – Полигональная сетка модели формата stl и её текстовый вид

Стандартная процедура нарезки, исходя из вышеописанного, приблизительно такова:

- запустите программу слайсер на главном компьютере;
- загрузите STL-файл модели;
- преобразовывайте/масштабируйте/вращайте модель, пока она не

будет правильно позиционирована на рабочей платформе;

- введите все параметры необходимые для правильной печати;
- начните процесс нарезки и ждите, пока не будет создан весь g-код;
- отправьте g-код принтеру через USB соединение.

Первые два шага вполне очевидны, но третий может потребовать некоторой дополнительной информации.

Программа нарезки сконфигурирована со всеми параметрами 3D принтера, которые могут понадобиться, поэтому она знает размеры печатной платформы и может продемонстрировать расположение модели относительно ее.

Пользователь может переставлять модель в трех осях, пока она не будет центрирована, и не будет располагаться точно на поверхности основания (она не должна быть «подвешена в воздухе»), а также вращать ее, если нужно.

Возможность масштабировать модель также очень полезна, потому что в файле STL единица длины никогда не определяется, поэтому может получиться так, что программа моделирования будет использовать сантиметры, в то время как слайсер ожидает миллиметры, и в результате получится модель в 10 раз меньше, поэтому необходимо учитывать этот фактор.

Другая причина немного увеличить масштаб модели (примерно на 0.5 % для ABS, еще меньше для PLA) – это сжатие пластмассы при остывании при комнатной температуре (тепловой коэффициент расширения ABS обычно около $75 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{K}^{-1}$, при условии его затвердевания при 100°C и охлаждения до 25°C , которое дает фактор сжатия примерно 0.5%).

На пятом шаге наша 3D-модель "нарезается" на множество горизонтальных слоев (рисунок 26), превращаясь в стопку тонких деталей, каждая из которых обрабатывается отдельно, чтобы рассчитать лучший путь сопла при укладке расплавленной пластмассы в нужных местах; повторяя этот маршрут, печатающая головка практически проделывает такую же работу (т.е. слой за слоем).

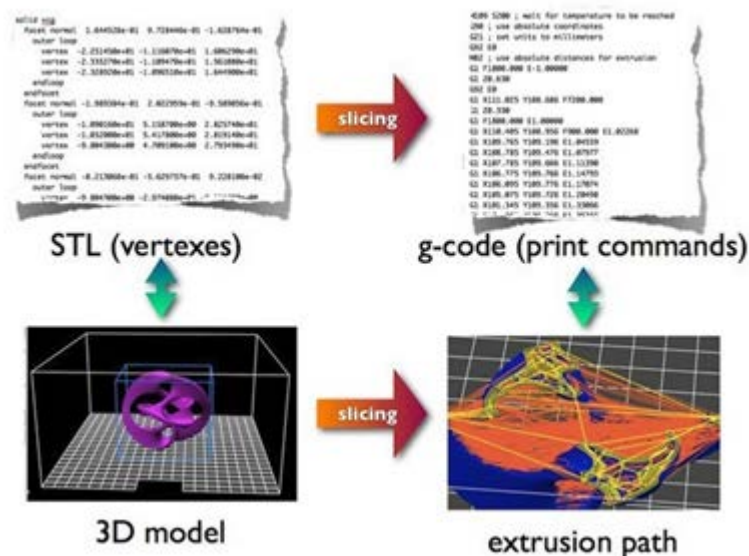


Рисунок 26 – Преобразование 3D-модели в изделие

Это самая ответственная часть целого процесса печати, потому что заключительное качество напечатанного объекта определяется почти полностью правильным выбором значений для множества различных параметров нарезки. Поэтому четвертый шаг действительно важен, и мы должны изучить значение, по крайней мере, самых важных параметров нарезки. К сожалению, они по-разному названы и определены в различных доступных программах нарезки.

3.2 G-code

G-код - условное именование языка программирования устройств с числовым программным управлением (ЧПУ). Был создан компанией Electronic Industries Alliance в начале 1960-х. Финальная доработка была одобрена в феврале 1980 года как стандарт RS274D. Комитет ISO утвердил G-код, как стандарт ISO 6983-1:1982. Госкомитет по стандартам СССР - как ГОСТ 20999-83. В отечественной технической литературе G-код обозначается, как код ИСО 7-бит (ISO 7-bit). Производители систем управления используют G-код в качестве базового подмножества языка программирования, расширяя его по своему усмотрению [1].

Программа, написанная с использованием G-кода, имеет жесткую структуру. Все команды управления объединяются в кадры - группы, состоящие из одной или более команд. Кадр завершается символом перевода строки (CR/LF). Кадр состоит из команд (слов), формируемых с помощью алфавитно-цифрового набора. Управляющую программу рекомендуется составлять таким образом, чтобы в кадре записывалась только та геометрическая, технологическая и вспомогательная информация, которая изменяется по отношению к предыдущему кадру. Значения графических и управляющих символов должны соответствовать указанным в таблице 2.

Таблица 2 – Значения графических и управляющих символов

Символ	Значение
Значения символов адресов	
F	Функция подачи
G	Подготовительная функция
I	Параметр интерполяции параллельно оси X
J	Параметр интерполяции параллельно оси Y
M	Вспомогательная функция
N	Номер кадра
X	Первичная длина перемещения, параллельно оси X
Y	Первичная длина перемещения, параллельно оси Y
E	Первичная длина перемещения, параллельно оси E (Экструдер)
Значения управляющих символов и знаков	
;	Знак, обозначающий, что следующая за ним информация не обрабатывается
+	Математический знак плюс
-	Математический знак минус
Значения цифровых символов	
0	Цифра 0
1	Цифра 1
2	Цифра 2
3	Цифра 3
4	Цифра 4
5	Цифра 5
6	Цифра 6
7	Цифра 7
8	Цифра 8
9	Цифра 9

Примечание: в программе графического интерпретатора параметры интерполяции по осям X, Y соответственно I и J это координаты центра круга относительно начала дуги, по тем же осям, в дальнейшем будем придерживаться последнего определения данных символов. Графическая интерпретация выполняется только в плоскости XY.

Номер кадра управляющей программы указывается для удобства программиста (не учитывается станком), затем следует кадр с соответствующим номером (таблица 2). Управляющая программа должна заканчиваться символом «Отключение двигателей» (таблица 3)

Таблица 3 – Пример управляющей программы

Программа	Значение
N1 G90 G1 X0 Y-150 E2 F1500	Первый кадр программы с соответствующим номером
; N2 G90 G1 X50	Комментарии, которые не будут обрабатываться станком
N3 G91 G3 X0 Y50 I0 J5 E4 F20	Круговая интерполяция против часовой стрелки
N4 G90 G1 X0 Y40 E4.5 F50 M84	Отключение двигателей «M84»

Кадр управляющей программы

Каждый кадр управляющей программы должен содержать:

- слово (команду) «Номер кадра», можно опустить;
- информационные слова (команды) или слово (команду).

Порядок команд в кадре строго не оговаривается, но традиционно предполагается записывать в следующей последовательности:

- слово (или слова) «Подготовительная функция»;
- слово «Функция подачи», может относиться как к определенному кадру или кадрам программы, так и ко всей программе в целом, (таблицы 2 и 3);
- слова «Размерные перемещения», рекомендуется записывать в последовательности символов X затем Y;
- слова «Координаты центра круга», рекомендуется записывать в последовательности символов I затем J;
- слово «Размерные перемещения», параллельно оси E (Экструдер);

- слово «Вспомогательная функция».

В пределах одного кадра программы не должны повторяться слова «Размерные перемещения» и «Координаты центра круга».

В пределах одного кадра управляющей программы не должны использоваться слова «Подготовительная функция», входящие в одну группу.

Слова управляющей программы

Каждое слово (команда) в кадре управляющей программы должно состоять из:

- символа адреса (латинская прописная буква);
- математического знака «Плюс» или «Минус» (при задании размеров, как в абсолютных значениях, так и в приращениях, математический знак «Плюс» в словах (командах) «Размерные перемещения» допускается опускать).

Слова в управляющей программе должны быть записаны одним из двух способов:

- без использования десятичного знака (подразумеваемое положение десятичной запятой);
- с использованием десятичного знака (явное положение десятичной запятой).

При записи слов с использованием десятичного знака слова, в которых десятичный знак отсутствует, обрабатываются программой как целые числа.

При записи слов с использованием десятичного знака могут быть опущены незначащие нули, стоящие до и (или) после знака.

Размер представленный одними нулями, должен быть выражен, по крайней мере, одним нулем.

Размерные слова (команды):

Все размерные перемещения задаются в абсолютных значениях или приращениях. Способ управления выбирается одним из следующих слов «Подготовительная функция»:

- G90 – «Абсолютный размер»;
- G91 – «Размер в приращениях».

Все перемещения при выполнении работы выражаются в величинах, соответствующих размерностям 3D-принтера, то есть в миллиметрах после получения задания/чертежа детали или шаблона, выраженного в сантиметрах для лабораторной работы, необходимо перевести размерности из сантиметров в миллиметры.

Если программа реализуется с заданием размеров в абсолютных значениях, положительных или отрицательных, в зависимости от начала системы координат, то математический знак («Плюс» или «Минус») является составной частью слова «Размерное перемещение» и предшествует первой цифре каждого размера.

Если программа реализуется с заданием размеров в приращениях, математический знак («Плюс» или «Минус») должен предшествовать первой цифре каждого размера, указывая направление перемещения.

При задании размеров, как в абсолютных значениях, так и в приращениях, математический знак «Плюс» в словах «Размерные перемещения» допускается опускать.

Безразмерные слова:

- слово «Номер кадра» должно состоять из цифр;
- слово (или слова) «Подготовительная функция» выражается кодовым числом;
- функция (скорость) подачи кодируется числом, количество разрядов которого указано в формате управляющей программы. Скорость подачи программируется в мм/мин;
- слово (или слова) «Вспомогательная функция» выражается кодовым числом.

Алгоритмы интерполяции

Интерполяцию производят на определенной части заданной, траектории. Интерполируемая часть траектории называется участком интерполяции и может быть записана в одном или нескольких кадрах управляющей программы.

Функциональный характер интерполируемого участка траектории (прямая, окружность) определяется соответствующей подготовительной функцией.

Начальная точка каждого участка интерполяции совпадает с конечной точкой предыдущего участка, поэтому в новом кадре она не повторяется.

Каждой последующей точке, лежащей на этом участке интерполяции и имеющей определенные координаты, соответствует отдельный кадр информации с адресами перемещений X, Y.

Для задания параметров интерполяции применяются адреса I, J используемых для определения геометрических характеристик кривой (центра дуги окружности).

В том случае, когда вместе с параметрами интерполяции необходимо записать математический знак («Плюс» или «Минус»), он должен следовать за адресным символом и перед цифровыми символами. Если знак отсутствует, подразумевается знак «Плюс».

Линейная интерполяция

Прямолинейный участок интерполяции задается в одном кадре, который должен содержать следующую информацию:

- подготовительную функцию «G1 —Линейная интерполяция», если она не была запрограммирована перед этим;
- координаты конечной точки, которые задаются в абсолютных значениях или в приращениях с соответствующими адресами перемещений X и Y;
- величина экструзии E;
- функцию подачи F.

Круговая интерполяция

Дугу окружности, лежащую в координатной плоскости, нужно программировать в одном кадре управляющей программы.

При программировании дуги окружности в одном кадре он содержит следующую информацию:

- подготовительную функцию - «G2 - Круговая интерполяция по часовой стрелке» (или «G3 — Круговая интерполяция против часовой стрелки»), если она не была запрограммирована перед этим;

- координаты конечной точки, которые должны быть заданы в приращениях с соответствующими адресами перемещений, например X и Y;
- параметры интерполяции с адресами I и J, которые определяют координаты центра дуги окружности (координаты центра круга относительно начала дуги) в выбранной плоскости;
- величина экструзии E;
- функцию подачи F.

Интерполяционные слова (I, J) нужно программировать только в приращениях от начальной точки к центру окружности.

Формат управляющей программы

Формат управляющей программы должен записываться с соблюдением следующих правил:

- символ «Пропуск кадра», т.е. комментарии;
- за адресом каждого слова «Размерное перемещение» следуют цифры, соответствующие размерности 3D-принтера, т.е. в миллиметрах, левая часть от десятичной запятой записывается четырьмя числами, а правая часть тремя.

Если абсолютные размеры всегда положительные, то между адресом и следующим за ним числом не ставят никакого знака.

Пример записи формата:

; N4 G2 F1200 X4300.043 Y4300.034 I43 J43 M0.

В примере приведена запись управляющей программы для 3D-принтера, воспринимающего явную десятичную запятую:

- N4 - четырехзначный номер кадра;
- G2 - двухзначная подготовительная функция (таблица 4);
- X4300.043 - перемещение по оси X, четыре цифры слева от десятичной запятой и три цифры справа;
- Y4300.034 - то же для оси Y;
- F1200 - скорость подачи, четыре цифры слева от десятичной запятой;
- M0 - вспомогательная функция, три цифры слева от десятичной запятой (таблица 5).

Подготовительные и вспомогательные функции

Таблица 4 – Значения подготовительных функций

Подготовительная функция	Наименование	Значение
G0	Ускоренное перемещение	Код используется для ускоренного перемещения. Ускоренное перемещение, или позиционирование, необходимо для быстрого перемещения инструмента к позиции обработки или безопасной позиции.
G1	Линейная интерполяция	Вид управления, при котором обеспечивается постоянное отношение между скоростями по осям координат, пропорциональное отношению между расстояниями, на которые должен переместиться исполнительный орган станка по двум или более осям координат одновременно.
G2, G3	Круговая интерполяция	Вид контурного управления для получения дуги окружности, при котором векторные скорости по осям координат, используемые для образования дуги, изменяются устройством управления
G2	Круговая интерполяция. Движение по часовой стрелке	Круговая интерполяция, при которой движение исполнительного органа направлено по часовой стрелке, если смотреть со стороны положительного направления оси, перпендикулярной к обрабатываемой поверхности
G3	Круговая интерполяция. Движение против часовой стрелки	Круговая интерполяция, при которой движение исполнительного органа направлено против часовой стрелки, если смотреть со стороны положительного направления оси, перпендикулярной к обрабатываемой поверхности
G4	Выдержка	Команда на выполнение выдержки (паузы) с заданным временем. Этот немодальный код программируется Вместе с S- или P-адресом, который указывает длительность времени выдержки.
G21		Ввод метрических данных
G28		Автоматический возврат в нулевую точку
G29		Регулировка нагревательной платформы по 3 или более точкам
G90	Абсолютный размер	Отсчет перемещения производится относительно выбранной нулевой точки
G91	Размер в приращениях	Отсчет перемещения производится относительно предыдущей запрограммированной точки
G92	Установка нуля отсчета	Изменение состояния абсолютных накопителей положения. При этом движение исполнительных органов не происходит.

Таблица 5 – Значения вспомогательных функций

Вспомогательная функция	Наименование	Значение
M0	Программируемый останов	Останов без потери информации по окончании обработки соответствующего кадра.
M17		Включение/Выключение всех шаговых двигателей
M80	Включить питание	Включить питание станка
M81	Выключить питание	Выключить питание станка
M82	Абсолютный размер для оси E	Отсчет выдавленного материала производится относительно нуля
M84	Отключение двигателей по истечению времени	Отключить шаговые двигатели по истечению тайм-аута: S<секунды>
M104	Установить температуру экструдера	Установить температуру экструдера: S<температура>, S0 - отключение нагрева
M105	Просмотр температуры	Просмотр текущей температуры с датчиков
M106	Включение вентилятора	Включение вентилятора для охлаждения детали
M107	Выключение вентилятора	Выключение вентилятора для охлаждения детали
M109	Ожидание нагрева экструдера	Ожидание нагрева экструдера до заданной температуры: S<температура>
M112	Экстренная остановка	Экстренная остановка станка
M114	Просмотр текущей позиции	Просмотр текущей позиции X, Y, Z, E
M119		Просмотр состояния концевиков
M140	Установить температуру стола	Установить температуру стола: S<температура>, S0 - отключение нагрева
M190	Ожидание нагрева стола	Ожидание нагрева стола до заданной температуры: S<температура>
M218	Установить смещение экструдера	Установить смещение экструдера (в мм): T<номер экструдера> X<смещение по оси X> Y<смещение по оси Y>
M220	Установить скорость перемещения по осям в процентах	Установить скорость перемещения по осям в процентах: S<от 0 до 100>
M221	Установить выдавливание в процентах	Установить выдавливание в процентах: S<от 0 до 100>
M400		Завершение всех текущих задач и очищение буфера
M428	Выбор нуля отсчета	Установка начальной позиции основываясь на текущей позиции
M600	Пауза для смены материала	Пауза для смены материала X<поз> Y<поз> Z<поз> E<втягивание> L<длина удаления после втягивания>
M999	Перезапуск после остановки по ошибке	Перезапуск УП после остановки по ошибке с последнего выполненного кадра

3.3 Алгоритм получения модели

В процессе воплощения модели вовлечено много разных вещей, которые должны взаимодействовать и слаженно работать:

- первый шаг – это создание 3D-модели нашей идеи, цифрового двойника объекта, который мы хотим напечатать (этап цифрового моделирования);
- второй шаг – создание файла правильного формата (обычно «STL»), содержащего всю геометрическую информацию, необходимую для отображения нашей цифровой модели (этап экспортирования);
- также можно загрузить цифровую модель из интернета (например, из Thingiverse);
- если наша модель была спроектирована не особо тщательно, в ней могут быть дефекты. Мы должны попытаться исправить их при помощи программы (этап восстановления полигональной сетки);
- третий шаг – преобразование цифровой модели (технически это трёхмерный образ цельной поверхности (сетки), ячейками которой являются треугольники) в список инструкций (G-код), которые понимает 3D-принтер (этап нарезки или «slicing»), или написать инструкции вручную;
- четвёртый шаг – дать принтеру список инструкций, например, через USB соединение с ПК (этап соединения);
- пятый шаг – запустить 3D-принтер, начать печатать и ждать результата (печать);
- шестой шаг – снять только что созданный объект с рабочей платформы, удалить вспомогательные части (т.е. поддерживающие опоры и/или подложку – если они есть), очистить его поверхности (этап конечной обработки).

Есть ещё несколько моментов, которые тоже нужно учесть, чтобы результат был успешным: калибровка 3D-принтера, тип и качество пластиковой нити, тип поверхности печатной платформы [22].

4. ЭКОНОМИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

Целью данного раздела является определение временных и экономических затрат на разработку демонстрационного стенда.

Преимущества данной системы управления:

- малые габариты;
- малое потребление энергии;
- повышение точности регулирования;
- малое количество обслуживающего персонала.

Для наглядности хода работы составим сетевой график выполнения работ, который представлен на рисунке 27.

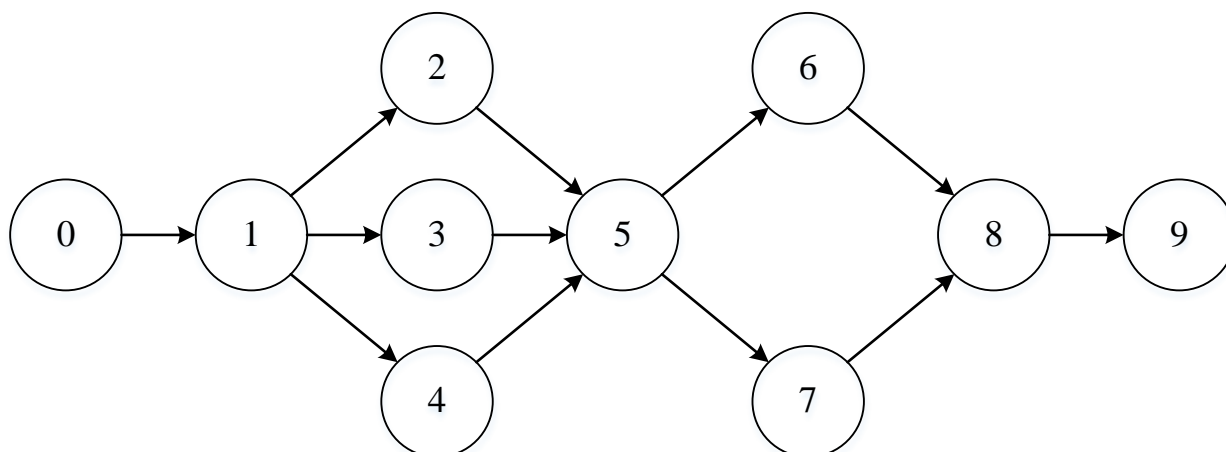


Рисунок 27 – Сетевой график хода работ

Расшифровка этапов сетевого графика:

0. Разработка технического задания – определяется основная цель, ставятся задачи, формируются исходные данные.

1. Разработка технического проекта – разработка хода работы, выделение основных компонентов разработки, разработка схемы.

2. Выбор способа регулирования – исследование возможных способов, анализ, выбор и обоснование наиболее подходящего.

3. Выбор схемы управления – исследование возможных компоновок схемы, и их возможностей, выбор и обоснование подходящей.

4. Выбор объекта управления – выбор и обоснование подходящего двигателя.

5. Выполнение контрольной схемы – разработка схемы системы управления, включающую все ранее выбранное.

6. Составление руководства по эксплуатации – составляется сводка правил работы с устройством.

7. Руководство при изготовлении – управление, контроль хода выполнения сборки изделия.

8. Наладка – настройка рабочей схемы, приведение к необходимым характеристикам.

9. Оформление работы – обобщение всей проделанной работы, создание законченного изделия.

Дополним сетевой график диаграммой Ганта, представленным в таблице 6. Она поможет показать последовательность, и продолжительность действий.

Таблица 6 – Диаграмма Ганта

Вид работы	День										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Работа 1	■										
Работа 2		■									
Работа 3		■	■	■							
Работа 4				■							
Работа 5					■	■					
Работа 6						■	■	■			
Работа 7						■	■	■			
Работа 8									■	■	
Работа 9											■

Определение затрат на разработку

Затраты на разработку учебных стендов складываются из расходов по оплате труда разработчиков (с отчислениями на социальные нужды), расходов на материалы и расходов на потребляемую электроэнергию. Ключевыми моментами при разработке учебных стендов являются сборка электрической схемы, монтаж и наладка.

Расходы на оплату труда разработчиков учебных стендов определяются путем умножения трудоемкости создания продукта на среднюю часовую оплату разработчика (по факту затрат времени на каждом этапе).

Трудоемкость разработки определяется по факту затрат времени на каждом этапе и вносится в таблицу 7.

Таблица 7 – Расходы на оплату труда разработчиков

Наименование этапа	Трудоемкость, чел-час.	Средняя часовая оплата, руб.	Затраты на этапе, руб.
1.Схематическое описание задачи	6	200	1200
2. Исследование литературы	30	300	9000
3. Составление перечня необходимых материалов	12	200	2400
4.Сборка электрической схемы	6	400	2400
5. Корректировка	8	200	1600
6. Монтаж	10	200	2000
7. Наладка	5	400	2000
ИТОГО:	77	1900	20600

Определение затрат на монтаж

Затраты на монтаж складываются из з/п работника, расходных материалов и потребленной электроэнергии.

Затраты на изделия и комплектующие определяются по сайту «Пульс цен» и приведены в таблице 8 [20].

Таблица 8 – Затраты на основные комплектующие и основные изделия

п/п	Наименование основных материалов и комплектующих изделий	Количество	Цена, руб.	Сумма затрат, руб.
1	Плата Arduino Mega	1	1170	1170
2	Плата драйвера двигателей	4	150	600
3	Силовая плата (RAMPS)	1	2000	2000
4	Блок питания формата ATX 350W	1	800	800
5	Фанера 1000x1000x8	1	500	500
6	Набор болтов М3	1	28	28
7	Набор гаек М3	1	25	25
8	Печатные детали из пластика	1	2500	2500
9	Оргстекло 70x30	1	1200	1200
10	Направляющие валы 1500x8	1	1500	1500
11	Строительная шпилька	1	100	100
12	Шаговые двигатели	4	700	2800
13	Линейные подшипники	12	80	960
14	Нагревательная платформа с термистором	1	1200	1200
15	Экструдер в сборе с керамическим нагревательным элементом и термистором	1	500	500
16	Концевики	3	50	150
Итого		35	12503	16033

Расходы на электроэнергию определяются исходя из трудоемкости работы по монтажу схемы и стоимости кВт/ч, определяются по формуле:

$$C = M * C_{эл}$$

где C – расходы на электроэнергию;

M – трудоемкость работы по монтажу схемы;

$C_{эл}$ – стоимость 1кВт/ч.

$$C = 10 * 2,41 = 24,1 \text{ руб.}$$

Определение затрат на наладку

Затраты на наладку складываются из расходов на оплату труда и потребленной электроэнергии.

Расходы на оплату труда учтены в таблице 7.

Расходы на электроэнергию определяются исходя из трудоемкости работы по наладке схемы и стоимости кВт/ч.

$$C = H * C_{эл},$$

где C – расходы на электроэнергию;

H – трудоемкость работы по наладке схемы;

$C_{эл}$ – стоимость 1кВт/ч.

$$C = 5 * 2,41 = 12,05 \text{ руб.}$$

В таблице 9 приведены суммарные затраты на разработку учебного стенда. Основная статья затрат связана с оплатой заработной платы. При самостоятельной работе возможно значительное сокращение расходов.

Таблица 9 – Суммарные затраты на разработку учебного стенда

Статьи затрат	Всего по статьям, руб.
Заработная плата основная	20600
Дополнительная заработная плата (15% от основной)	3090
Страховые взносы (30% от всей з/п)	7107
Материалы	16033
Расходы на электроэнергию	36,15
Прочие затраты (5% от суммы предыдущих затрат)	2433,26
ИТОГО	49299,41

Таким образом, суммарные затраты на разработку и создание демонстрационного стенда составят 49299,41 рублей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной выпускной квалификационной работе был разработан, собран и запрограммирован 3D принтер на основе микроконтроллера ATmega2560.

Так же была широко раскрыта тема 3D печати, ее виды в различных сферах применения, востребованность в образовательной сфере.

В процессе работы была выбрана и описана элементная база:

- Микроконтроллер – ATmega2560;
- силовую часть – RAMPS 1.4;
- драйвера двигателей – Allegro A4988;
- шаговые двигатели – 17HS4401;
- нагревательные элементы – Керамический нагревательный элемент;
- терморезисторы – термистор на 100 кОм;
- направляющие валы – полированная закаленная сталь диаметром 8мм;
- линейные подшипники – HIWIN LM8UU;
- высокотемпературная полиамидная лента;
- нить-материал для изготовления различных форм предметов.

Рассмотрена программа-слайсер для подготовки модели перед печатью.

Подробно разобран язык программирования g-code, приведены графические управляющие символы, подготовительные и вспомогательные функции, используемые в стенде.

Приведен алгоритм действий для преобразования виртуальной модели в физическую.

Произведен расчет расходов на оплату труда разработчиков, затрат на основные комплектующие и основные изделия, рассчитаны затраты на электроэнергию и суммарные затраты на разработку учебного стенда.

Приведены схемы и параметры всех используемых элементов, использованные в сборке стенда.

На данном учебном стенде есть возможность проводить: исследовательские работы по изучению языка программирования g-code, проводить демонстрационные работы.

По данной работе был снят демонстрационный видеоролик.

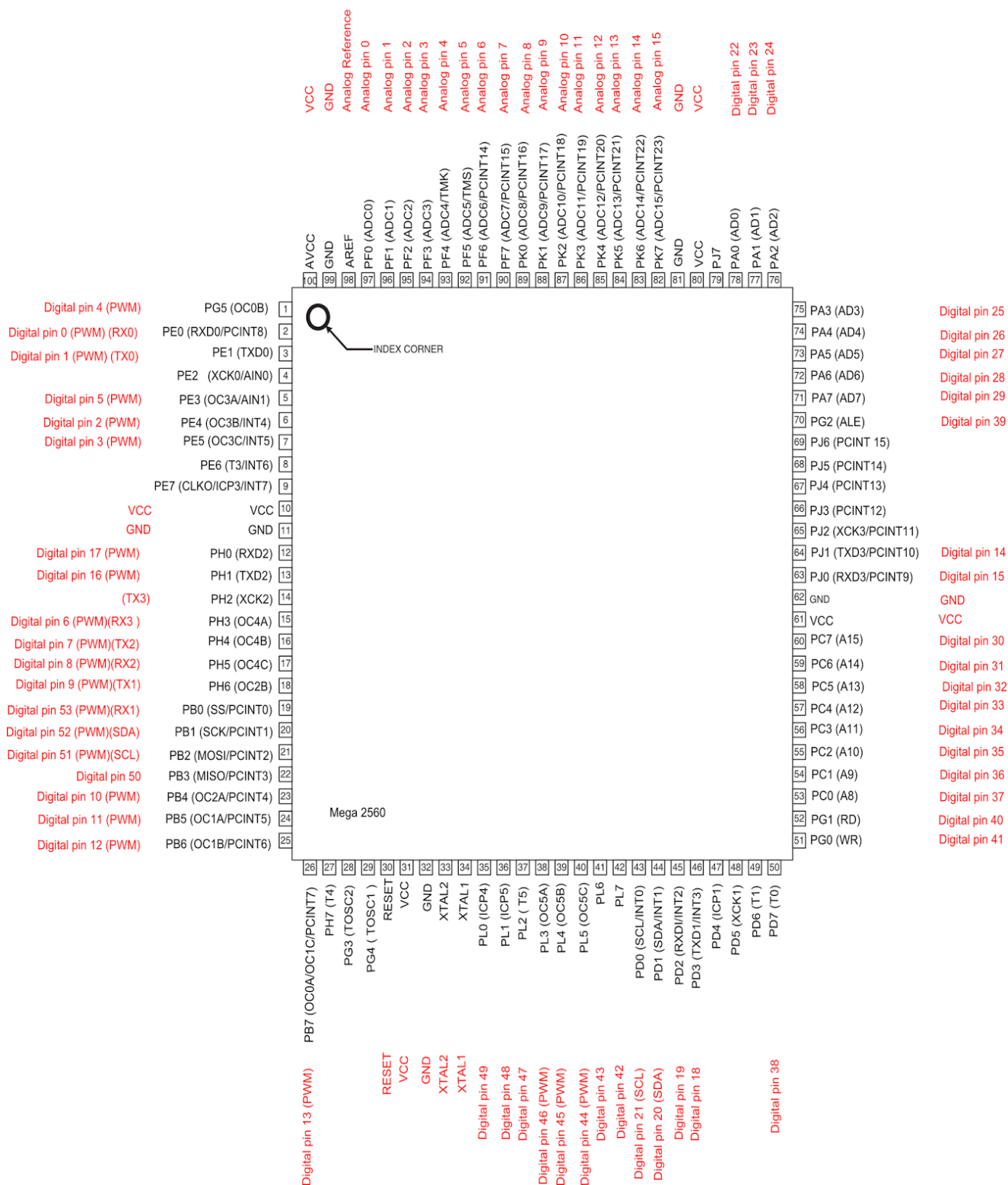
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. ГОСТ 20999-83. Устройства числового программного управления для металлообрабатывающего оборудования. Кодирование информации управляющих программ [Текст]. – Введ. 1983.03.28. – М.: Госстандарт России: Изд-во стандартов, 1983. – 29 с.
2. Баранов В.Н. Применение микроконтроллеров AVR: схемы, алгоритмы, программы [Текст] / В.Н. Баранов. – М.: Издательский дом «Додэка-XXI», 2006. – 288 с.
3. Евстифеев А.В. Микроконтроллеры AVR семейств Tiny и Mega фирмы ATMEL, 6-е изд., стер. [Текст] / А.В. Евстифеев. – М.: Издательский дом «Додэка XXI», 2012. – 560 с.
4. Емельянов А.В. Шаговые двигатели: учеб. пособие [Текст] / А.В. Емельянов, А.Н. Шипин. – Волгоград: ВолГТУ, 2005. – 80 с.
5. Ильин Ю. 3D принтеры: что и зачем [Текст] / Ю. Ильин // САПР и графика – 2016. – № 2. – С. 12–16.
6. Канеса И. Доступная 3D печать для науки, образования и устойчивого развития [Текст] / И. Канеса С. Фонда, М. Зенаро – М.: Университетская книга, 2013. – 192 с.
7. Кристофер Б. 3D печать: третья индустриальная революция [Текст] / Б. Кристофер – М.: АГРАФ, 2013. – 258 с.
8. Лейбов А.М. Применение технологий 3D-прототипирования в образовательном процессе [Текст] / А.М. Лейбов // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 5. – С. 93.
9. Малышева В. Л. Возможности 3D принтера в строительстве [Текст] / В. Л. Малышева // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. – 2013. – № 12. – С. 28–41.
10. Михайлова А. Е. 3D принтер – технология будущего [Текст] / А. Е. Михайлова // Молодой ученый. – 2015. – №20. – С. 40–44.

11. Мокеева О. Д. 3D–печать архитектурных макетов и перспективы оснащения их инженерными системами в процессе печати [Текст] / О. Д. Мокеева // Молодой ученый. – 2016. – №7. – С. 128–131.
12. Мустафин Н.Ш. Новейшие технологии в строительстве. 3D принтер [Текст] / Н.Ш. Мустафин // Региональное развитие. – 2015. – № 8. – С 30–34.
13. Ревич Ю.В. 3D в натуре [Текст] / Ю. В. Ревич // Компьютерра. – 2009. – № 8. – С. 37–41.
14. Эванс Б. Практические 3D–принтеры: наука и искусство 3D–печати [Текст] / Б. Эванс. – СПб.: Apress, 2012. – 212 с.
15. Floyd J. 3D Printing: Build Your Own 3D Printer and Print Your Own 3D Objects. – CA.: Que Publishing, 2013. – 192 с.
16. Jesse H. 3D CAD with Autodesk 123D: Designing for 3D Printing, Laser Cutting, and Personal Fabrication. – CA.: Maker Media, 2016. – 118 с.
17. Kimberly S. 3D Printing – Unabridged Guide. – CA.: Tebbo, 2013. – 174 с.
18. 3D принтер [Электронный ресурс] – Режим доступа: www.printbox3d.ru
19. 3D принтеры [Электронный ресурс] – Режим доступа: www.magnum3d.ru
20. Пульс цен [Электронный ресурс] – Режим доступа: www.ekb.pulscen.ru
21. 3Dtoday.ru – портал о 3D печати [Электронный ресурс] – Режим доступа: www.3dtoday.ru/wiki/
22. Mir3D.ru – портал о 3D технологиях [Электронный ресурс] – Режим доступа: www.mir3d.ru

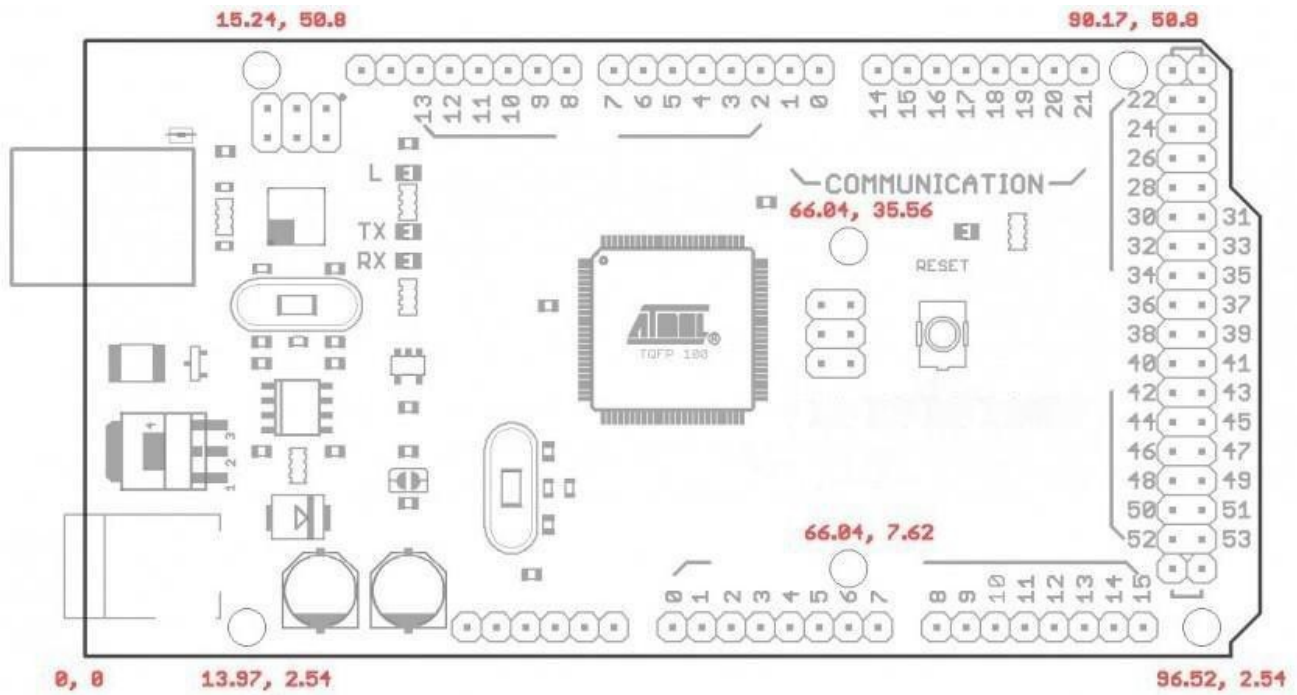
ПРИЛОЖЕНИЕ А

Схема выводов микроконтроллера ATmega2560 и их обозначение на плате



Расположение элементов на отладочной плате Arduino Mega

Принципиальная схема отладочной платы Arduino Mega



Перечень элементов отладочной платы Arduino Mega

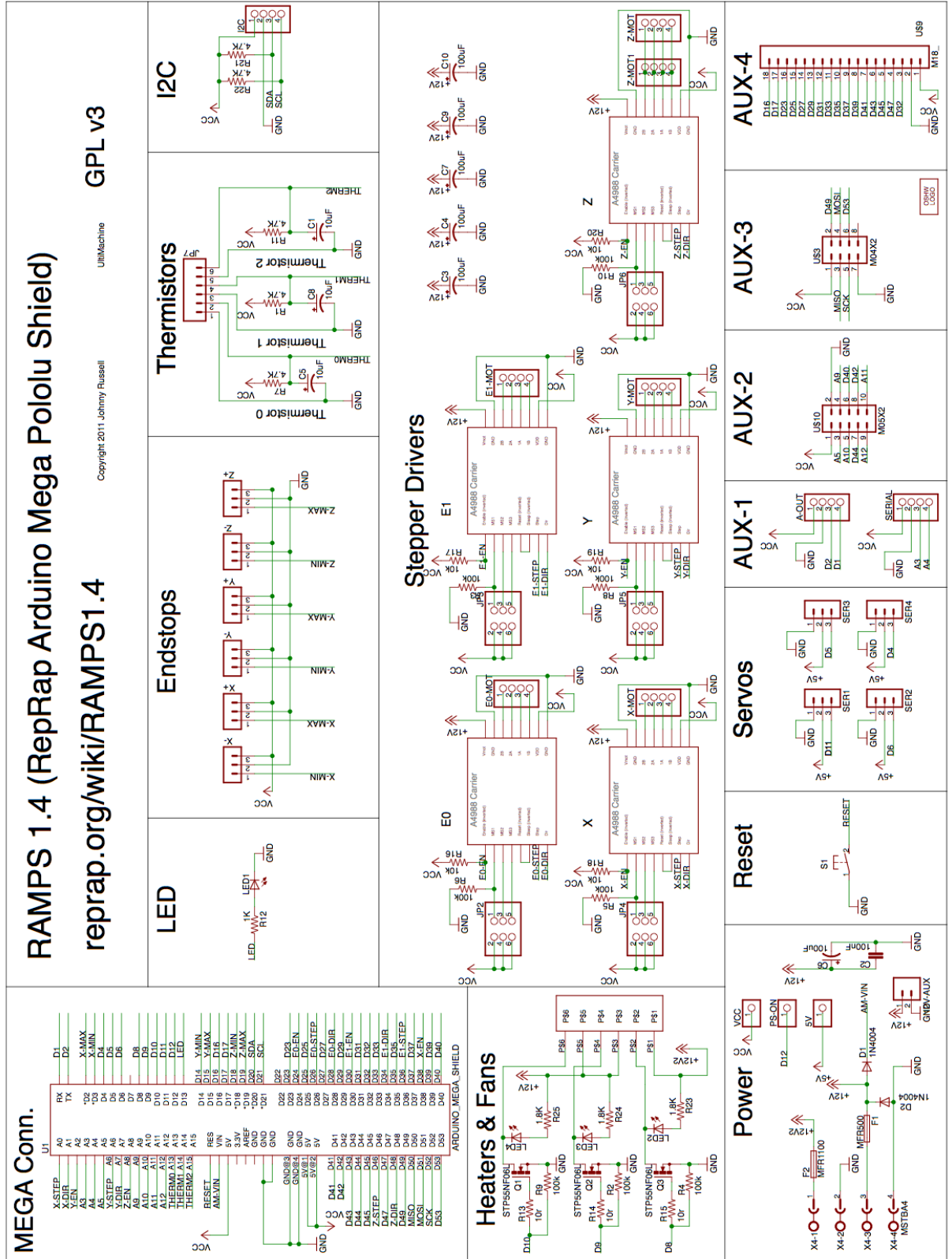
Кол-во	По схеме	Описание	Значение	Подробности	Маркировка
2	C1, C2	Керамические конденсаторы	22пФ		
4	C3, C4, C6, C7	Керамические или плёночные конденсаторы	100нФ		
2	C5, C8	Электролитические конденсаторы	100мкФ	16вольт (или более: 25в)	
1	C9	Электролитический конденсатор	10 мкФ	16вольт (или более: 25в)	

1	D1	Диод	1N4004		
2	D2, D3	Диоды	1N4148		
1	DC1	2.1мм гнездо питания			
1	IC1	АТМЕГА8 (или АТМЕГА168)		В DIP-корпусе	
1	IC2	Интегральный стабилизатор	7805С или КР145ЕН5		
1	ICSP	Гребёнка “папа”	2x3		
2	J1, J3	Гребёнки “мама”	1x8	Шаг 2.54 мм	
2	J2, POWER	Гребёнки “мама”	1x6	Шаг 2.54 мм	
1	JP0	Гребёнка угловая “папа”	1x3	Шаг 2.54 мм	

1	JP4	Гребёнка угловая “папа”	1x2	2.54 мм	
1	L1	Индуктивность	100мкГн		(серебр)кор, чёр, кор, ЗОЛОТ
4	LED0, LED1, LED13, LED14	Светодиоды	3 мм	Произвольных цветов	
1	Q1	16 МГц кварцевый резонатор			
5	R1, R2, R3, R4, R6	Резисторы	1кОм	0,25 Ватт, ±5%	кор, чёр, крас, ЗОЛОТ
1	R9	Резисторы	4,7кОм	0,25 Ватт, ±5%	жёлт, фиолет, крас, ЗОЛОТ
5	R5, R7, R8, R10, R11	Резисторы	10кОм	0,25 Ватт, ±5%	кор, чёр, оранж, ЗОЛОТ
1	S1	Тактовая кнопка	6x6 мм, 4 вывода		
1	T1	Транзистор	BC547	NPN общего назначения	
1	T2	Транзистор	BC557	PNP общего назначения	
1	X1	Разъём D-SUB	9 - выводный угловой, на плату, “мама”	Разъём DE-9	
2	Jumpers	Джамперы для 2.54 мм гребёнки		2.54 мм	

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Принципиальная схема силовой платы



GPL v3

Copyright 2011 Johnny Russell

reprap.org/wiki/RAMPS1.4

utilMachine

