

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
«Тольяттинский государственный университет»

Институт машиностроения  
(наименование института полностью)

---

Кафедра «Промышленная электроника»  
(наименование)

11.03.04 Электроника и нанoeлектроника  
(код и наименование направления подготовки/ специальности)

---

Электроника и робототехника  
(направленность (профиль) / специализация)

---

## ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА)

на тему Система подогрева и поддержания температуры воздуха в 3d-принтере

Студент

А.Р. Гайсин

---

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

А.К. Кудинов

---

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

Консультант

к.т.н., доцент М.М. Бажутина

---

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

Тольятти 2022

## Аннотация

Объем 56 с., 23 рис., 2 табл., 30 источников

3d принтер, 3d печать, релейный алгоритм, пид-регулирование.

Объектом исследования являются алгоритмы управления нагревательными установками.

Цель работы: Разработка системы подогрева и поддержания температуры воздуха в 3d-принтере.

Задачи работы:

1. Обзор состояния вопроса
2. Анализ исходных данных и существующих решений
3. Разработка электрической принципиальной схемы
4. Написание программы для микроконтроллера
5. Проведение экспериментальных исследований, тестирование различных алгоритмов поддержания температуры и выбор наилучшего.

Степень внедрения: теоретически рассчитаны параметры системы, разработаны схемы и выбраны элементы, написана программа для микроконтроллера. Экспериментально апробированы различные алгоритмы поддержания температуры, произведен их сравнительный анализ.

В данной работе происходит разработка системы подогрева и поддержания температуры воздуха в 3d-принтере. Выполнен обзор возможных способов улучшения печати и существующих принтеров, имеющих термокамеру. Разработана электрическая принципиальная схема, написана программа для микроконтроллера. Опробованы различные алгоритмы управления.

В процессе выполнения ВКР была модернизирована программа управления лабораторным стендом по нагреву, используемому в дисциплине «Электротехнические материалы».

## **Abstract**

The title of the graduation work is «System for heating and maintaining air temperature in a 3d printer ».

The senior paper consists of an introduction, 3 parts, a conclusion, 23 picture, 2 tables, list of references including 7 foreign sources and the graphic part on 6 A1 sheets.

The object of research is system for heating and maintaining air temperature in a 3d printer.

The aim of the graduation work is to develop of a system for heating and maintaining air temperature in a 3d printer.

We start with the statement of the problem and then logically pass over to its possible solutions. We then analyze the literature concerning our problem.

We give a review of possible solutions and choose the most suitable ones, develop an electrical circuit diagram, carry out theoretical calculations and select elements.

The key issue of the graduation work is the experimental study of various control algorithms and selection of the best.

In conclusion we'd like to stress that theoretically calculated system parameters, developed a scheme, selected elements and a program for the microcontroller was written. The operation of the program for the microcontroller and the output of information to a personal computer has been experimentally tested.

During the implementation of the graduation work, the control program of the laboratory stand for heating used in the discipline "Electrical Materials" was modernized.

This work is of interest to students and teachers of the Department of Industrial Electronics and readers involved in electronics.

## Содержание

|  |    |
|--|----|
| Введение.....  | 5  |
| 1 Состояние вопроса .....  | 6  |
| 1.1 Формулирование актуальности, цели и задач проекта.....             | 6  |
| 1.2 Обзор существующих решений .....                                   | 6  |
| 1.3. Выводы по обзору и выбор параметров разрабатываемой системы. .... | 24 |
| 1.4. Расчет необходимой тепловой мощности.....                         | 24 |
| 1.5. Возможности проведения экспериментальных исследований. ...        | 27 |
| 2 Разработка электрической принципиальной схемы.....                   | 29 |
| 2.1 Исходные данные для расчетов .....                                 | 29 |
| 2.2. Разработка функциональной схемы .....                             | 29 |
| 2.3. Разработка электрической принципиальной схемы .....               | 30 |
| 2.4. Выбор компонентов.....  | 31 |
| 3. Программная часть .....   | 37 |
| 4. Экспериментальная часть.....  | 45 |
| Заключение .....   | 53 |
| Список используемой литературы .....                                   | 54 |

## Введение

3D – принтер – это устройство с числовым программным управлением, позволяющее печатать объемные детали. Как правило, печать ведется различными пластиками. Самыми распространёнными являются пластики типа PLA и ABS. Они отличаются друг от друга свойствами, в том числе необходимыми тепловыми режимами. Для подстройки под тепловые режимы 3D-принтеры позволяют задавать температуру печатающей головки, осуществляющей расплавление пластика, и температуру стола, на который пластик прилипает.

Самые дешевые принтеры обладают открытым столом, который может обдуваться случайными потоками воздуха, сквозняками, имеющими разную температуру. Такой случайный обдув ухудшает качество печати и уменьшает повторяемость изделий. Поэтому более дорогие модели принтеров обладают закрытым столом. То есть имеют стенки, ограничивающие пространство печати от посторонних воздушных потоков. Из-за подогретого стола и нагретого сопла температура воздуха внутри такого принтера более стабильна и немного больше температуры окружающего воздуха. Это благоприятно сказывается на качестве печати. Одной из проблем печати на принтерах является уменьшение линейных размеров напечатанной модели в ходе ее остывания. Из-за этого происходит искажение геометрии модели (ее «ведет») и отслоение модели от стола (полностью или приподнятие углов). Для дополнительной возможности настройки печати будет хорошо иметь возможность регулировать температуру воздуха внутри зоны печати. Температура воздуха будет влиять на качество печати, в частности, на искажение геометрии модели и ее отслоение от стола. Большинство продаваемых принтеров такой возможности не имеют.

В данной ВКР предполагается разработать систему подогрева воздуха внутри принтера с возможностью задания необходимой температуры.

# **1 Состояние вопроса**

## **1.1 Формулирование актуальности, цели и задач проекта**

3D печать и улучшение ее качества является актуальным направлением развития современной техники. Настройка тепловых режимов значительно влияет на результат печати. В данной ВКР предполагается разработать систему подогрева воздуха внутри принтера с возможностью задания необходимой температуры.

Цель работы: Разработка системы подогрева и поддержания температуры воздуха в 3d-принтере.

Задачи работы:

1. Обзор состояния вопроса
2. Анализ исходных данных и существующих решений
3. Разработка электрической принципиальной схемы
4. Написание программы для микроконтроллера
5. Проведение экспериментальных исследований, тестирование различных алгоритмов поддержания температуры и выбор наилучшего.

## **1.2 Обзор существующих решений**

В данной ВКР производится разработка системы подогрева и поддержания температуры воздуха в 3d-принтере. Назначение этой системы – возможность регулировки тепловых режимов печати изделий из пластика на 3d-принтере с целью улучшения качества печати.

Одной из проблем печати на принтерах является уменьшение линейных размеров напечатанной модели в ходе ее остывания. Из-за этого

происходит искажение геометрии модели (ее «ведет») и отслоение модели от стола (полностью или приподнятые углы). Самые дешевые принтеры обладают открытым столом, который может обдуваться случайными потоками воздуха, сквозняками, имеющими разную температуру. Такой случайный обдув ухудшает качество печати и уменьшает повторяемость изделий. Поэтому более дорогие модели принтеров обладают закрытым столом. То есть имеют стенки, ограничивающие пространство печати от посторонних воздушных потоков. Примером такого принтера является 3D принтер Flashforge Adventurer 3, имеющийся на кафедре «Промышленная электроника» Тольяттинского государственного университета (рисунок 1).

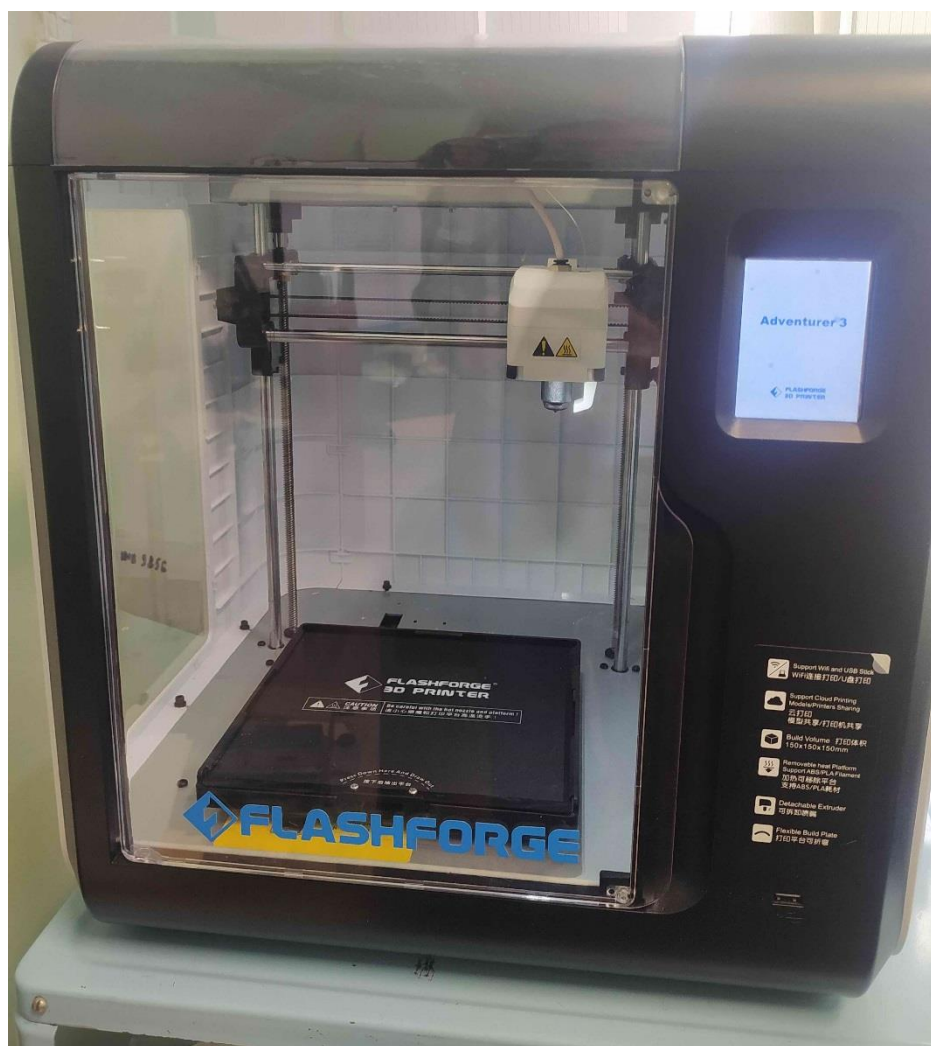


Рисунок 1. 3D – принтер Flashforge Adventurer 3

Из-за подогретого стола и нагретого сопла температура воздуха внутри такого принтера более стабильна и немного больше температуры окружающего воздуха. Это благоприятно сказывается на качестве печати.

Существуют различные пластики, применяемы для печати. Самыми распространёнными являются пластики типа PLA и ABS. Они отличаются друг от друга свойствами, в том числе необходимыми тепловыми режимами.

Самым удобным для печати и «не капризным» является пластик PLA. Он менее склонен к искажению размеров, усадке и отслоению от стола по сравнению с ABS и другими видами пластика. Однако, как показала практика, даже при печати PLA пластиком закрытого корпуса не всегда достаточно для получения геометрически верных моделей. На рисунке 2. изображено отслоение краев модели от стола.



Рисунок 2. – Отслоение углов модели, напечатанной PLA пластиком на 3D принтере Flashforge Adventurer 3



Еще больше проблем с отслоением моделей наблюдается при попытках печатать пластиком ABS. Этот пластик более прочный, но обладает двумя главными недостатками

- При печати издает неприятный и вредный запах.
- Подвержен большой термдеформации при остывании, в следствии чего отслаивается от стола сильнее, чем PLA.

Явление отлипания углов модели от стола называют деламинацией.

Существуют различные способы борьбы с ней, например использование скотча, наклеенного на стол [15].

«При печати изделий большого размера на 3д принтере возникает явление, получившее название деламинация. отлипание углов детали от стола. Это явление тормозит появление 3д принтеров большого размера, т.к. производитель рассуждает так - зачем делать стол большого размера - все равно деталь будет отлипать. и делают большой размер по оси Z а X Y редко когда превосходят 200x200мм. Пользователи борются с деламинацией применением различных сильных клеевых составов, которые частично решают проблему, но возникает новая проблема - отделение детали от стола. Чем сильнее адгезия вашего состава тем больше шансов испортить саму деталь и даже поломать стекло при отделении детали. Предлагаю простой и эффективных способ печати деталей любого размера по XY на обычный желтый скотч без применения лаков для волос и смесей ABS+ацетон и тому подобное» [20].

Как мы знаем пластик имеет усадку. В среднем усадка по линейным размерам составляет от 0.3 до 2% в зависимости от типа пластика который мы используем. Усадка есть уменьшение линейных размеров детали после остывания пластика. Поскольку наша деталь приклеена к столу, стол не меняет своих размеров, то он препятствует этому процессу усадки, и возникает сила (назовем  $F$  для больших деталей и  $f$  для малых деталей)

Если деталь не большая, то сила  $f$  не достаточна для отделения детали от стола, и деламации не происходит. При превышении определенного размера сила  $f$  становится достаточно большой  $F$  и ее силы уже хватает для того чтобы отлепить от стола углы детали (рисунок 3).

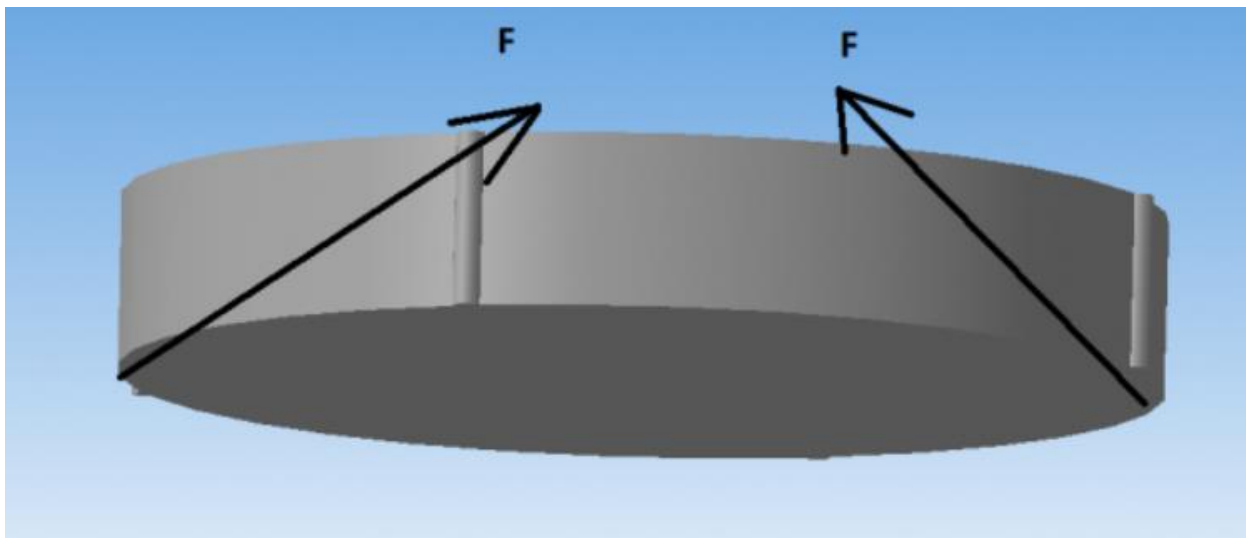


Рисунок 3 – Пояснение деламации.

Как бороться. Очень просто. Мы надсекаем нижнюю плоскость детали линиями толщиной 0.1 или 0.3мм на глубину 5-8мм (рис.4).

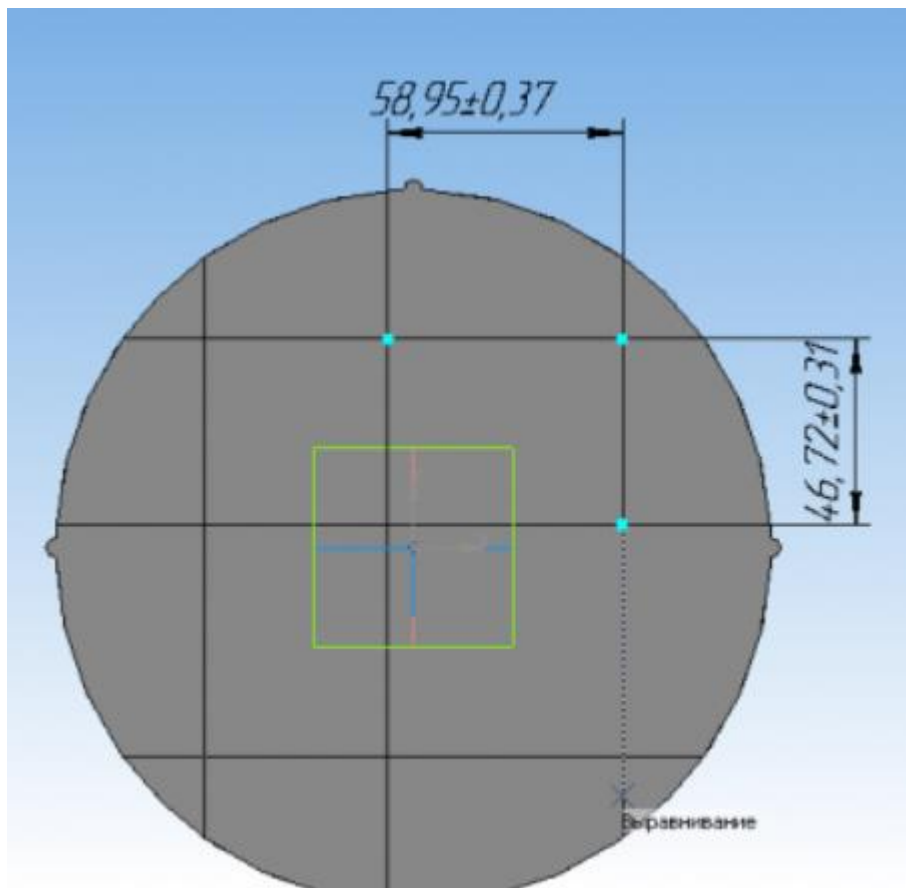


Рисунок 4 – Надсечение нижней части модели.

Деталь печатается как много мелких деталей на высоту 5-8мм и дальше они объединяются в целую деталь – на такой высоте уже процессы усадки у поверхности стола «устаканиваются» и деляминации не происходит.

В зависимости от размера детали толщину щели имеет смысл менять в диапазоне 0.1-0.3мм и глубину прорези так же от 5 до 8-10мм чем шире щель чем глубже прорез – тем лучше будет держаться деталь.

Этот и другие способы имеют ряд недостатков: необходимость смазывания стола клеем либо нанесения на него двустороннего скотча или изменением модели и ее прочности.

Для дополнительной возможности настройки печати будет хорошо иметь возможность регулировать температуру воздуха внутри зоны печати.

Температура воздуха будет влиять на качество печати, в частности, на искажение геометрии модели и ее отслоение от стола. Предположительно, это поможет уменьшить скорость остывания модели и ее деформацию.

В данной ВКР рассматривается способ уменьшения термоусадки модели методом подогрева воздушного пространства. Такое решение называют «Термокамера».

Согласно информации из интернет-форумов, посвященным 3D печати, рекомендуется изолировать внутренний объём и подогревать его примерно до 60-70С для уменьшения термоусадки и борьбы с деламинацией.

Самым простым способом организации термокамеры в домашних условиях является следующий:

- Оградить зону печати любыми поверхностями, если это еще не сделал производитель. Люди используют пластиковые листы или делают каркас и обматывают его полиэтиленовой пленкой.
- Подогреть воздух внутри термокамеры, например, направив внутрь обычный фен.

Конечно, при таком способе сложно регулировать температуру внутри, что приводит к недостаточной эффективности способа и повторяемости результата.

Для повышения повторяемости иногда используют самостоятельно собранные схемы терморегуляторов. Рассмотрим опыт человека, самостоятельно создавшего такую термокамеру. [23]

В качестве источника тепла был использован фен, подключенный через такую коммутационную схему, подключенную к микроконтроллеру (рисунок 5)

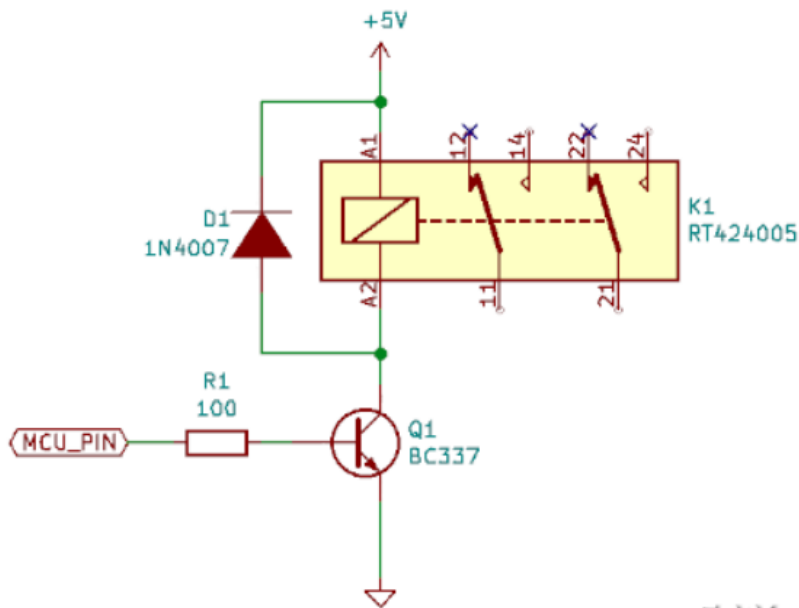


Рисунок 5 – Схема коммутации нагревателя.



Рисунок 6. – Микроконтроллерный блок

Для регулирования температуры внутри камеры было собрано небольшое устройство, которое можно видеть на переднем плане в корпусе из белого пластика. Неплохие результаты были получены при поддержании температуры  $45 \pm 2$  °С. При этом важно понимать, что регулятор температуры не решает проблему сворачивания. Сворачивание возникает из-за разности температур между разными слоями модели. То есть, для решения этой

проблемы нам пришлось бы поддерживать температуру в камере порядка 100 градусов, что не только не по силам фену, но и не полезно для шаговых двигателей 3D-принтера, да и для всех остальных его частей тоже. На самом деле, основная роль регулятора температуры — получение повторяемых результатов. Если модель удалось напечатать один раз, вы можете быть абсолютно уверены, что ее удастся напечатать всегда, независимо от того, какая сейчас температура за окном, включено ли отопление, открыты ли окна в доме, и так далее.

Измерение температуры осуществляется при помощи термопары К-типа и модуля на базе MAX6675 (даташит [PDF]), которые легко найти на eBay. Если температура ниже заданной, при помощи реле включается фен, который нагревает воздух в камере. Если же температура выше заданной — фен выключается. Для гистерезиса используется окно в несколько градусов, которое, как и целевую температуру, можно изменить при помощи кнопок.

Итак, опытным путем выяснили, что для успешной печати ABS'ом температура стола должна быть 110 градусов, температура сопла — 240 градусов, температуру воздуха следует поддерживать в районе 45 градусов, следует использовать gaft и обезжиривать стол перед началом печати.

Существуют модели принтеров для высокотемпературной печати, уже имеющие термокамеру с подогревом. Например, 3D принтер Industry F340 стоимостью 1 718 335 руб (рисунок 7).



Рисунок 7 - 3D принтер Industry F340

Ссылка для покупки: <https://era-3d.ru/3d-printery/3dgence/printer-industry-f340>

Производитель: 3DGence (Польша)

Категория: Профессиональный

Область печати (мм): 260 × 300 × 340

Технология печати: FDM

Материал печати: Пластиковая нить

Точность печати (мкм): 10

Вес (без упаковки) 130 кг

Размеры (без упаковки) 945 × 748 × 918 мм

Основные сведения:

Технология печати FDM/FFF

Разрешение слоя, микрон 150

Диаметр нити, мм 1.75

Тип материала ABS, PLA, PETG, Flex, Nylon (Нейлон), PEEK, другие

Размер области построения, мм 260 × 300 × 340

Материал корпуса Сталь с порошковым покрытием

Количество экструдеров (печатающих головок) 2

Точность позиционирования по оси XY, микрон 6

Точность позиционирования по оси Z, микрон 0,4

Температура подогрева площадки, °C 140-160

**Температура в печатной камере, °C Макс. 85**

Температура в отсеке для пластика, °C Макс. 70

Диаметр сопла (мм) 0,4

Рабочая температура экструдера, °C Pro: 265; HT: 340; HT max: 500

Подогреваемая платформа Да

Интерфейс подключения SD, USB

Программное обеспечение 3DGence Slicer

Операционные системы Mac OSX, Windows

Поддерживаемые форматы файлов STL, OBJ

Температура хранения, °C 0–32

Печатная платформа Керамическая

Температура окружающей среды, °C 15-32

Электропитание 240V AC ~11A 50/60Hz

Промышленный 3D принтер Industry F340, печатающий 2-мя экструдерами, от польской корпорации 3DGence оснащен



усовершенствованной системой управления печатью. Industry F340 был разработан именно для промышленного применения, где наиболее важны точность, скорость, комфорт и безопасность процесса печати.

Что отличает Industry F340 от других 3D принтеров?

Точные и прочные отпечатки, достигаемые с помощью нагреваемого отсека для пластика сбоку

Полностью автоматическая система калибровки и автокомпенсация

Смарт-система контроля и управления материалом

Встроенные воздушные фильтры, защищающие в том числе и от запаха, для безопасной работы

Электроника, соответствующая всем мерам безопасности

Полуавтоматический загрузчик материала

Экструдер с системой прямого привода

Широкий диапазон материалов

Industry F340 печатает широким диапазоном материалов, в том числе и промышленными PEEK, PC и пр. для изготовления прочных и высокотемпературных деталей.

В качестве опций для принтера было разработано 3 экструдера с 2-мя соплами для печати разными материалами:

PRO для печати ABS, PET, Nylon, PLA, ASA, PP / поддержки из HIPS и BVON

HT для печати PC, PC-ABS, PC-ESD

HT max для печати PEEK

Smart-система управления филаментом. Это интеллектуальная система управления материалом и процессом печати, обеспечивающая оптимальные условия работы.

Как это работает? NFC-сканер считывает все данные о материале, используемом для печати: вес, тип, цвет, количество оставшегося материала в %, поступающего на конкретное сопло, максимальную скорость.

Вес материала измеряется с погрешностью 5 г. Данные сравниваются с информацией о требуемом количестве пластика, необходимого для завершения процесса печати.

Помимо этого, смарт-система осуществляет контроль расхода и подачи материала, а также автоматическую загрузку.

Камера для печати. Печатная камера с подогревом гарантирует высокое качество и низкую усадку моделей. Использование воздушного фильтра позволяет работать с принтером и на производстве, и в офисе.

Нагреваемый отсек для материала. Система нагрева отделения для филамента позволяет поддерживать оптимальные условия содержания загруженного материала, снижая уровень влажности до минимума.

Датчик точности печати. Система подачи филамента включает в себя датчики, расположенные на экструдерах. Она предназначена для постоянного контроля точности в процессе печати. В случае превышения погрешности принтер автоматически остановить печать.

Слайсер 3DGence. Фирменное ПО для работы с принтерами 3DGence выполняет множество функций и призвано упростить работу с принтером.

### 3D принтер ANYFORM 650-PRO v.3

Существуют и другие принтеры, например, промышленный 3д принтер Anyform 650-PRO – это машина из новой линейки 3д принтеров от компании TotalZ, работающих по технологии FDM(FFF). (рисунок 8)



Рисунок 8 - 3д принтер Anyform 650-PRO

Ссылка для покупки: <https://era-3d.ru/3d-printery/total-z/printer-ayform-650-pro-v3>

Производитель: Total Z (Россия)

Категория: Профессиональный

Область печати (мм): 650 x 500 x 650

Технология печати: FDM

Материал печати: Пластиковая нить

Точность печати (мкм): 100

3D принтеры серии PRO являются современным, высокотехнологичным продуктом не уступающим, а в чем то и превосходящий, по своим характеристикам зарубежные аналоги.

Промышленные 3D принтеры Anyform являются Российской разработкой и способны решать задачи прототипирования габаритных моделей современными материалами (инженерными пластиками).

3D принтер оснащен термостатированной камерой, с возможностью контроля температурного режима, что необходимо при печати габаритных моделей высокотемпературными полимерными материалами.

Печатающая головка (экструдер), разработанная компанией TotalZ, изготовлена из материалов стойких к абразивным пластикам (ESD, Carbon и тд), а также оснащена системой двойной подачи. Еще одной не мало важной особенностью экструдера является способный печатать как жесткими так и гибкими пластиками (резина, силикон и тд), что значительно расширяет область применения промышленного 3D принтера.

Для работы с высокотемпературными инженерными пластиками, такими как :Полифенилсульфон (PPSU), Полисульфон (PSU), Полиэфиримид (PEI), Компания TotalZ выпускает 3D принтер с маркировкой HOT+.

Использование данной технологии позволяет значительно сократить расходы на создание прототипов и разработку новой продукции, а также сократить количество отходов производства, которые неизбежно появляются при реализации данных задач методом фрезеровки.

Операционные системы Windows, Linux

Электропитание ~200-240 В. / 350-420 В.

Размеры, мм 1850x1500x1900

Вес, кг 491

Материал корпуса сталь

Количество экструдеров 1 (2 опция)

Подогрев стола есть

Рабочая камера 650x500x650 мм

Температура в камере до 100°C (базовая комплектация), до 300°C (версия Hot+)

Температура печатного стола до 110°C (базовая комплектация), до 200°C (версия Hot+)

Температура экструдера до 300°C (базовая комплектация), до 500°C (версия Hot+)

Технология печати FDM

Толщина слоя от 50 мкм

Точность позиционирования XY: 6,25 мкм, Z: 1,6 мкм

Поддерживаемые материалы ABS, ASA, PLA, FLEX, RUBBER, NIPS, CAST, PC-ISO, Nylon 12, ULTEM 9085, ULTEM 1010, ULTRAN 630CF, PPSU, PSU, PEI

Диаметр нити 1,75

Диаметр сопла, мм 0,2

Дисплей Сенсорный 17"

Интерфейсы USB 2.0 , LAN

Платформа Стекло

Скорость печати 62 см<sup>3</sup>/ч

## 3D принтер AON-M2

Это принтер для высокотемпературной печати (рисунок 9)



Рисунок 9 - 3D принтер AON-M2

Ссылка для покупки: <https://era-3d.ru/3d-printery/aon3d/printer-aon-m2>

Производитель: AON3D (Канада)

Категория: Профессиональный

Область печати (мм): 457 x 457 x 635

Технология печати: FDM

Материал печати: Пластиковая нить

Точность печати (мкм): 25

Электропитание 208-240VAC 50/60Hz

Размеры, мм 1450x955x965

Вес, кг 265

Программное обеспечение Simplify3D

Подогреваемая платформа да

Рабочая камера 457x457x635 мм

Специализация Аэрокосмическая промышленность; Автомобильная промышленность

Температура в камере 120°C

Температура печатного стола 200°C

Температура экструдера 450°C

Технология печати FDM

Толщина слоя от 50 мкм

Точность печати 0.025/0.001 мм

Поддерживаемые материалы PEEK, Ultem

Диаметр нити 1,75

Диаметр сопла, мм 0,6 (опционально 0.25-1.2)

Дисплей LCD сенсорный

Интерфейсы WiFi, Ethernet

Количество печатающих головок 2

Скорость печати 500 мм/с

Совместимые операционные системы Win7/Win8/Win10

### **1.3. Выводы по обзору и выбор параметров разрабатываемой системы.**

Обобщим произведенный обзор.

Чаще всего термокамеры применяются при различных пластиках. Промышленно изготавливаемые принтеры предназначены для промышленной высокотемпературной печати и очень дороги. Максимальные температуры в камере составляют 85...100...120 С. Эти температуры слишком велики чтобы пытаться модернизировать до них камеры принтеров, не разработанных для работ при таких температурах.

Иногда люди, покупающие бюджетные принтеры организуют для них термокамеру с целью печати пластиком со значительными термоусадками, например ABS. В этом случае они задают температуры внутри камеры в пределах 45...70 С.

Следует помнить, что внутри зоны печати принтера расположены шаговые двигатели, вентиляторы, печатающая головка, видеокамера и другие элементы, которые греются во время работы. При дополнительном подогреве воздуха их температура еще больше увеличится и необходимо провести ряд экспериментальных замеров и убедиться в отсутствии перегрева.

Исходя из этого, выберем значение максимальной температуры в камере, равным 70 С. И предусмотрим систему регулирования температуры, позволяющую выставить и поддерживать любую другую температуру (от температуры без подогрева до 70 С).

### **1.4. Расчет необходимой тепловой мощности**

Для выбора геометрических размеров термокамеры будем опираться на реальные размеры 3D принтера Flashforge Adventurer 3, имеющего зону



печати 150x150x150мм. При такой зоне печати принтер имеет габаритные размеры печатной камеры:

Высота  $h=35$  см, ширина  $b=30$  см, глубина  $a=35$ см

Итоговый объем:

$$V = h \cdot b \cdot a = 35 \cdot 30 \cdot 35 = 36750 \text{ см}^3 \approx 37 \text{ л} \quad (1.1)$$

Масса воздуха в таком объеме составит

$$m = V \cdot \rho = 37 \cdot 1.2 = 45 \text{ г, где} \quad (1.2)$$

$\rho = 1.2 \frac{\text{г}}{\text{л}}$  – плотность воздуха при температуре 20 С. (при повышении температуры до 70 С плотность воздуха уменьшается до 1.0 г/л).

Полученная масса воздуха 45г очень пала по сравнению с массой пластиковых ограждающих деталей и иных элементов, имеющих внутри принтера. Поэтому основной теплоемкостью будут обладать именно элементы принтера, а не сам воздух.

Основные потери мощности будут приходиться на теплопередачу наружу принтера, происходящую сквозь его пластиковые поверхности. Для передачи тепла воздух нагреет пластиковые ограждающие поверхности, а затем они будут отдавать тепло во внешнюю среду.

Таким образом, тепловое сопротивление будет складываться из:

1. R1 - Теплового сопротивления внутренний воздух – пластик
2. R2 Тепловое сопротивление толщины пластика
3. R3 Тепловое сопротивление пластик – внешний воздух.

Толщина самих пластиковых поверхностей составляет в среднем 3мм.

Для проведения теплового расчета воспользовались специализированным программным пакетом MathCAD. Скриншот расчета приведен на рисунке 10.

Тепловое сопротивление пластиковой коробки 35x35x30 см с толщиной стенок 3мм

$$h := 0.35 \quad a := 0.3 \quad b := 0.35 \quad d := 0.003 \quad m$$

Температура внутри камеры T1 и наружного воздуха T3  $T1 := 70 \quad T3 := 20 \quad C$

Площадь поверхности  $S := (h \cdot a + h \cdot b + b \cdot a) \cdot 2 = 0.665 \quad m^2$

Коэффициент конвективной теплоотдачи воздуха  $\alpha := 8.7 \quad \frac{Вт}{m^2 \cdot K}$

Степень черноты пластика  $\beta := 0.85$

Постоянная Стефана — Больцмана  $\sigma := 5.67 \cdot 10^{-8} \quad \frac{Вт}{m^2 \cdot K^4}$

Удельная теплопроводность пластика  $\lambda := 0.2 \quad \frac{Вт}{m \cdot K}$

1. Тепловое сопротивление воздух-внутренняя поверхность  $R1 := \frac{1}{\alpha \cdot S} = 0.173 \quad \frac{K}{Вт}$

2. Тепловое сопротивление толщины пластика  $R2 := \lambda \cdot \frac{d}{S} = 9.023 \times 10^{-4} \quad \frac{K}{Вт}$

3. Тепловое сопротивление пластик - внешняя поверхность

3.1. Тепловое сопротивление конвективной теплоотдаче  $R3' := \frac{1}{\alpha \cdot S} = 0.173 \quad \frac{K}{Вт}$

3.2. Тепловое сопротивление излучению.

Для первой итерации расчета зададимся температурой поверхности пластика, средней между температурой воздуха внутри и воздуха снаружи  $T2 := \frac{T1 + T3}{2} = 45 \quad C$

После проведения расчета из п.6 возьмем уточненную температуру T2'  $T2' := 39 \quad C$

Тепловой поток, излучаемый поверхностью

$$Q3 := S \cdot \beta \cdot \sigma \cdot [(T2 + 273)^4 - (T3 + 273)^4] = 67.49 \quad Вт$$

Тепловое сопротивление  $R3'' := \frac{T2 - T3}{Q3} = 0.282 \quad \frac{K}{Вт}$

Тепловое сопротивление пластик - внешняя поверхность  $R3 := \frac{R3' \cdot R3''}{R3' + R3''} = 0.107 \quad \frac{K}{Вт}$

4. Суммарное полное тепловое сопротивление  $R := R1 + R2 + R3 = 0.281 \quad \frac{K}{Вт}$

5. Мощность потерь в окружающую среду  $Q := \frac{(T1 - T3)}{R} = 178.036 \quad Вт$

6. Выполним проверочный расчет.

Температура пластика (тепловым сопротивлением толщины пластика пренебрежем)  $T2' := T1 - Q \cdot R1 = 39.227 \quad C$

Температура наружного воздуха  $T3' := T2' - Q \cdot R3 = 20.161 \quad C$

Температура T3' получена равной температуре окружающего воздуха, значит проверка сошлась.

Рисунок 10. - Тепловой расчет в программном пакете MathCAD.

В результате расчета было получено значение тепловой мощности потерь в окружающую среду  $Q=178$  Вт. Если разрабатываемая система будет иметь такую мощность, то максимальная температура будет стремиться к заданной  $70^{\circ}\text{C}$ . Но установится за очень длительны промежутки времени. Поэтому разрабатываемая система должна иметь запас по мощности. В таких системах рекомендуется иметь запас в 30..50 %. Примем мощность нагревателя  $P = 240$  Вт, что на 35 % больше, чем  $Q=178$  Вт.

### 1.5. Возможности проведения экспериментальных исследований.

В предыдущие годы для лабораторных работ по электротехническим материалам студентами под руководством преподавателя была изготовлена печка с управлением на Arduino (рисунок 11), имеющая электрическую схему (рисунок 12).

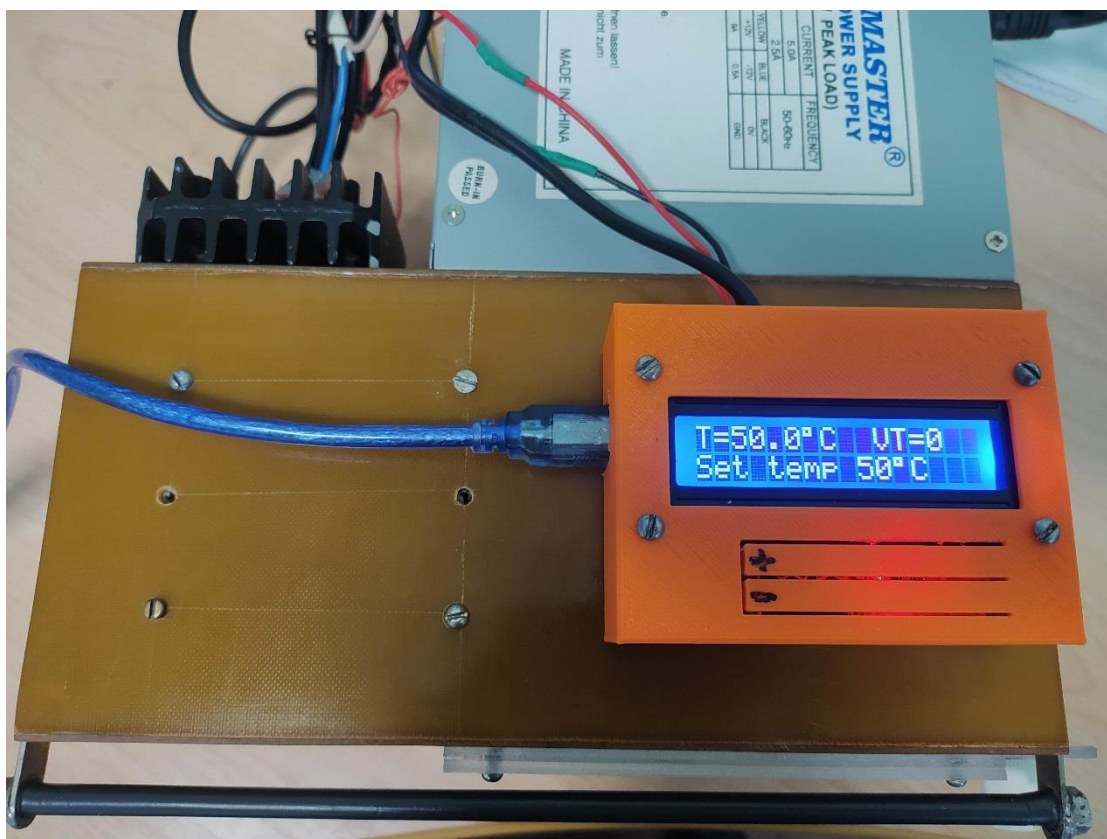


Рисунок 11 - Печка с управлением на Arduino для ЛР по ЭТМ.

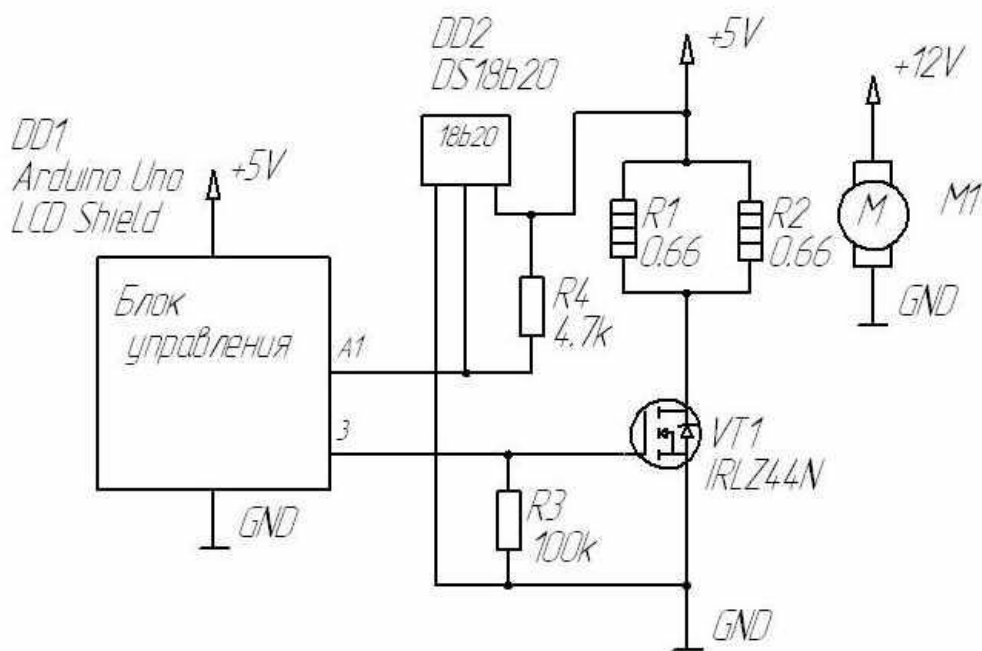


Рисунок 12 - Электрическая принципиальная схема печки с управлением на Arduino для лабораторных работ по ЭТМ.

Эта печка имела простую программу управления, реализующую только один простейший пороговый алгоритм управления. Было решено использовать эту печку для проведения экспериментальных исследований различных алгоритмов управления нагревом.

### Выводы

В данном разделе рассмотрено состояние вопроса, сформулированы актуальность, цели и задачи проекта, произведен расчет необходимой мощности нагрева, рассмотрена возможность проведения экспериментальных исследований.

## 2 Разработка электрической принципиальной схемы

### 2.1 Исходные данные для расчетов

Исходными данными для расчета будут являться:

Максимальная температура  $T_1=70$  С (выбрана в п.1.4)

Мощность нагрева  $P=240$  Вт (выбрана в п.1.4)

### 2.2. Разработка функциональной схемы

Была разработана функциональная блок-схема системы подогрева воздуха. (рисунок 13)

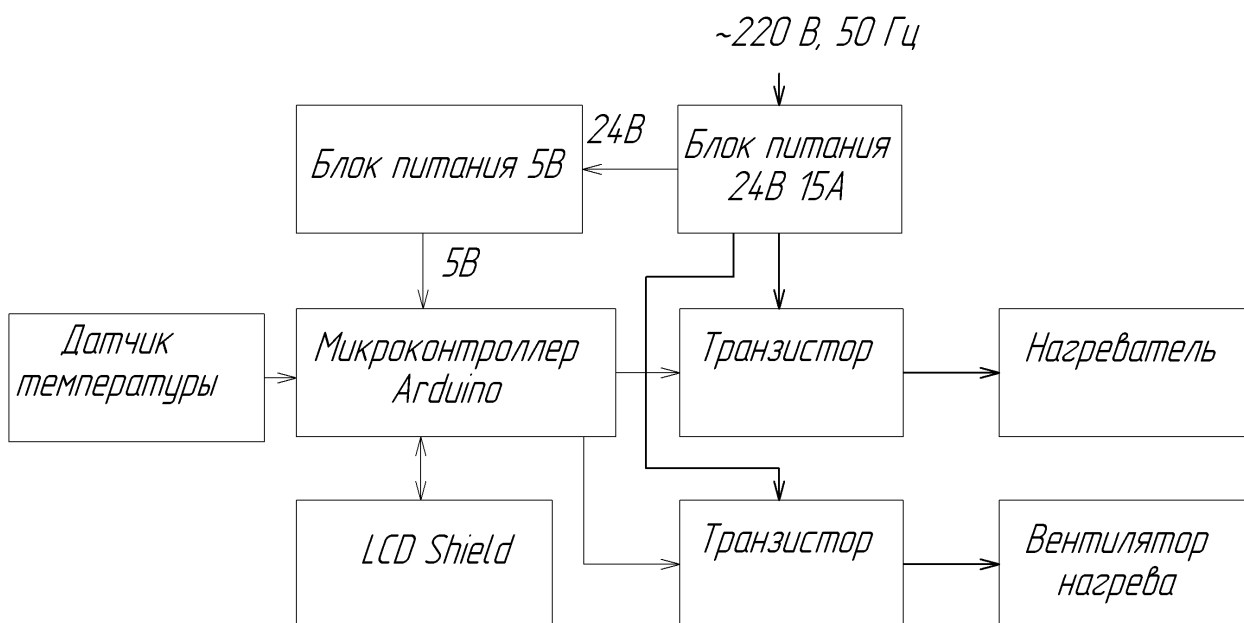


Рисунок 13 – Система подогрева воздуха. Схема функциональная.

Центральным элементом является микроконтроллер Ардуино. Он получает информацию с датчика температуры и управляет транзисторами, коммутируя подачу напряжения на нагревательный элемент и вентилятор. Задание необходимой температуры и индикацию достигнутой осуществляется модулем дисплея с кнопками LCD Shield, подключенным непосредственно к Ардуино.

Силовая часть схемы запитывается от блока питания 24 В. Ардуино напряжением 5В. Датчик температуры и LCD Shield запитаны от Ардуино напряжением 5В.

### 2.3. Разработка электрической принципиальной схемы

На основе блок-схемы была разработана электрическая принципиальная схема (рисунок 14).

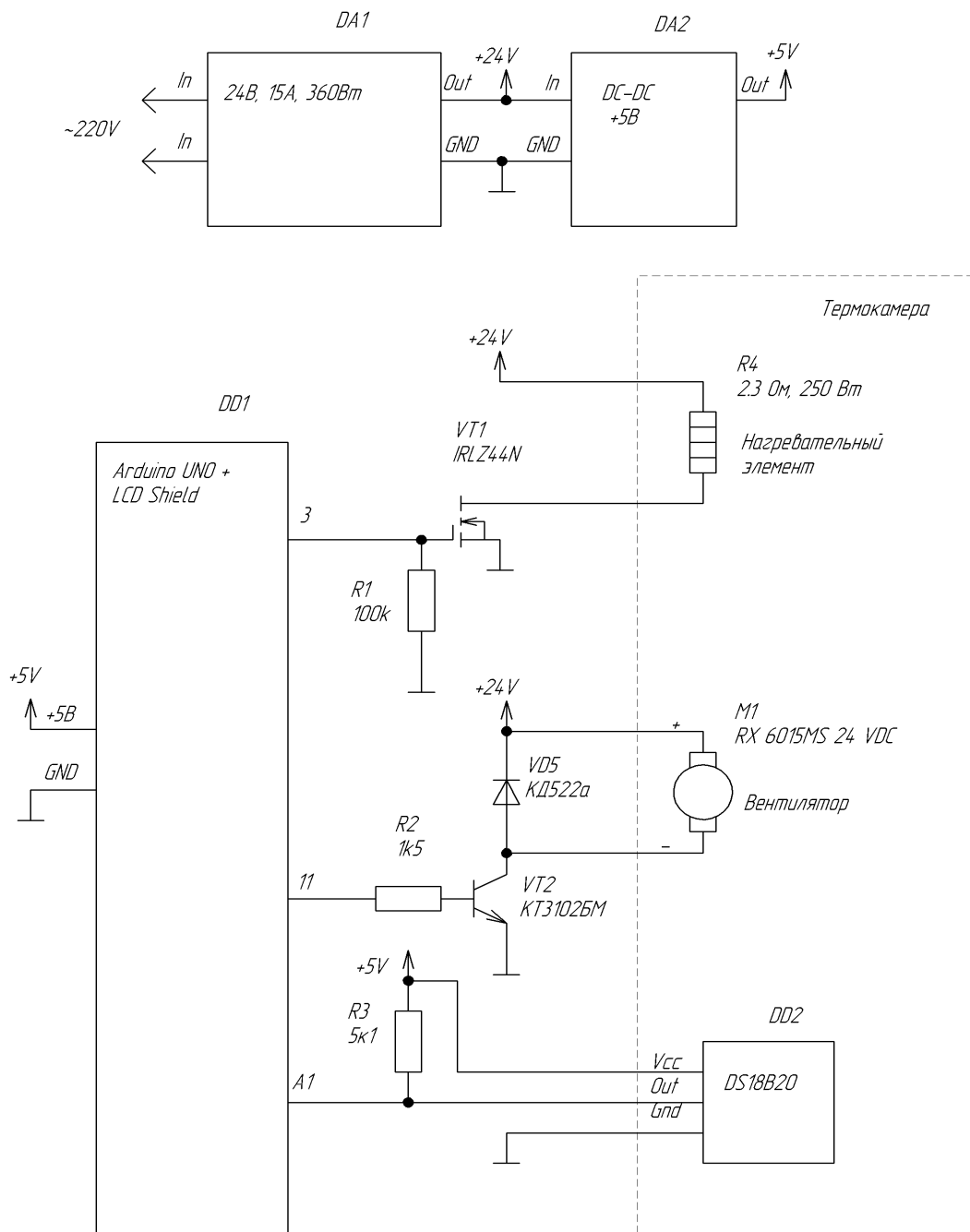


Рисунок 14 – Электрическая принципиальная схема.

При выборе нумерации выводов подключения к силовому транзистору и датчику температуры выбрали выводы, совпадающие с уже имеющимися на схеме печки (см. рис. 14).

Схема работает следующим образом. Центральным элементом является микроконтроллер Ардуино DD1. Он получает информацию с датчика температуры DD2 и управляет транзисторами VT1, VT2, коммутируя подачу напряжения на нагревательный элемент R3 и вентилятор M1. Задание необходимой температуры и индикацию достигнутой осуществляется модулем дисплея с кнопками LCD Shield, воткнутый непосредственно в Ардуино.

Силовая часть схемы запитывается от блока питания DA1 24 В. Ардуино напряжением 5В от DA2. Датчик температуры и LCD Shield запитаны от Ардуино напряжением 5В.

При разработке схемы пользовались информацией, приведенной в [22, 24, 28,29].

#### **2.4. Выбор компонентов**

Исходя из необходимого напряжения 24 В и тока 10 А с полуторократным запасом выбрали блок питания. Блок питания, 24В, 15А, 360Вт. [2]. Полуторократный запас по току необходим для случая, если мы ошиблись при расчете мощности и понадобится ее увеличить. В этом случае для увеличения мощности будет достаточно просто добавить еще одну нихромовую нить в нагреватель [17].

Это 24-вольтный блок питания постоянного тока со стабилизацией напряжения с параметрами

Выходное напряжение: 24 В.

Выходной ток: 15 А

Тип: импульсный

Защита от: перенапряжения, перегрузки по току, короткого замыкания

Цена (на 18.04.2022) 2 069 руб.

Остальные технические характеристики блока сведены в табл. 1.

Таблица 1 – Технические характеристики блока питания, 24В, 15А, 360Вт.

| <b><i>Характеристики источника питания</i></b> |                                 |
|--|---------------------------------|
| Выходное напряжение                            | 24 В                            |
| Выходной ток                                   | 15 А                            |
| Мощность                                       | 360 Вт                          |
| Входное напряжение                             | АС 85-264 В                     |
| Входная частота                                | 47-63 Гц                        |
| Эффективность                                  | 84%                             |
| Пульсация и шум                                | 80 мВ                           |
| Допустимое отклонение напряжения               | ± 1%                            |
| Стабилизация                                   | по напряжению                   |
| Защита от                                      | перегрузки                      |
|  | перенапряжения                  |
|  | короткого замыкания             |
| <b><i>Общие характеристики</i></b>             |                                 |
| Рабочая температура                            | 0°C ~ 45°C                      |
| Температура хранения                           | -20°C ~65°C                     |
| Охлаждение                                     | пассивное, активное(вентилятор) |
| Относительная влажность                        | < 90%                           |
| Габариты                                       | 215 x 112 x 50 мм               |
| Вес нетто                                      | 830 г                           |
| <b><i>Комплектация</i></b>                     | Блок питания 24В, 360Вт – 1 шт  |

Нагревательный элемент R3 в случае практической реализации проекта предполагается изготовить из нихромовой проволоки. Проволоку можно взять из неисправных проволочных резисторов [25, 30]. Например, имеется проволока диаметром 1.2 мм (замерено штангенциркулем с точностью



0.1мм), имеющая погонное сопротивление  $\alpha=0.46$  Ом/м (определено экспериментально).

Был проведен практический эксперимент по исследованию параметров этой проволоки (рис. 15).



Рисунок 15 – Практический эксперимент по исследованию проволоки.

Длина проволоки составила 15 м. На проволоку подали напряжение 24 В, протекающий ток составил 3.5 А. При плотной намотке она нагрелась до 127С (при температуре воздуха 26С). Это соответствует перепаду температур в 101С. Если воздух вокруг проволоки будет температурой 70 С, то сама проволока при этом токе нагреется до 170 С. Нихром способен

выдерживать и большие температуры (например, 500С), однако если он коснется пластика – то может его расплавить или повредить. Поэтому нагревательную проволоку лучше термически изолировать от пластиковых элементов. Например, можно поместить проволоку внутрь цилиндрического каркаса, на который она намотана. И продувать сквозь каркас воздух вентилятором. Такое решение позволит создать аналог фена.

Для получения мощности  $P=240$  Вт от напряжения  $U=24$  В необходимо потреблять ток  $I = P / U = 240 / 24 = 10$ А. Для получения такого тока необходимо сопротивление нагревателя  $R=U/I=24 / 10 = 2.4$  Ом. При использовании проволоки с погонным сопротивлением  $\alpha=0.46$  Ом/м можно взять проволоку длиной  $l=R/ \alpha = 2.4 / 0.46 = 5.22$  м.

Закрепили отрезок проволоки в висящем положении. Пропустили через проволоку ток 10 А. Достоверно температуры замерить не удалось. Температура значительно превышала 100С (при касании мокрым пальцем раздавалось характерное шипение). Красного свечения не наблюдалась и при прикосновении бумагой – бумага не темнела. Отсюда следует вывод, что температура проволоки была больше 100С и меньше 450 С (температура воспламенения бумаги).

Таким образом, внутри каркаса проволока будет значительно разогреваться и остановка вращения обдувающего вентилятора будет недопустима.

Внутренний диаметр каркаса составляет 51мм, внешний 63 мм. Исходя из этих значений выберем вентилятор. В качестве вентилятора М1 выбрали вентилятор RX 6015MS 24 VDC с параметрами:

Напряжение: 24 VDC

Ток: 0,08 А

Размер: 60x60x15 мм

Тип подшипника: скольжения

Мощность: 1,92 Вт

Объем: 15,50 CFM

Обороты: 4200 RPM

Уровень шума: 28 Дб

Вес: 30 г

Выводы: провода

Лопастей: 11

Внешний размер вентилятора чуть меньше внешнего диаметра каркаса. Поэтому диаметр лопастей будет примерно равен внутреннему диаметру каркаса, что нас устраивает [9, 10, 11]

Важным элементом системы будет являться полевой транзистор VT1. Это должен быть полевой транзистор с малым сопротивлением канала в открытом состоянии и допускающий управление логическим уровнем (5В) [7, 8]. Транзистор будет необходимо закрепить на радиаторе и экспериментально убедиться в отсутствии перегрева. Выбрали типа IRLZ44N – это N-канальный МОП транзистор, выполненный в корпусе TO-220. Данный транзистор рассчитан на напряжение сток-исток 55В, и на ток сток-исток 47А, кроме того напряжение насыщения у него соответствует логической единице поступающей с системы управления(5В) [27]. .  
Остальные параметры приведены на рисунке 16.

Для создания тока 80 мА при  $h_{21e}=200$  минимально необходим ток базы  $80\text{мА}/200 = 0.4 \text{ мА}$ . Для гарантированного насыщения зададимся током базы 3 мА. Тогда токоограничительный резистор  $R2 = 5 \text{ В} / 3 \text{ мА} = 1.66 \text{ кОм}$ . Выбрали резистор типа МЛТ номиналом 1.5кОм [9,10,11,16,19].

## Electrical Characteristics @ $T_J = 25^\circ\text{C}$ (unless otherwise specified)

|                                 | Parameter                            | Min. | Typ.  | Max.  | Units               | Conditions  |
|---------------------------------|--------------------------------------|------|-------|-------|---------------------|---|
| $V_{(BR)DSS}$                   | Drain-to-Source Breakdown Voltage    | 55   | —     | —     | V                   | $V_{GS} = 0V, I_D = 250\mu A$   |
| $\Delta V_{(BR)DSS}/\Delta T_J$ | Breakdown Voltage Temp. Coefficient  | —    | 0.070 | —     | V/ $^\circ\text{C}$ | Reference to $25^\circ\text{C}, I_D = 1\text{mA}$                           |
| $R_{DS(on)}$                    | Static Drain-to-Source On-Resistance | —    | —     | 0.022 | $\Omega$            | $V_{GS} = 10V, I_D = 25A$ ①   |
|                                 |                                      | —    | —     | 0.025 |                     | $V_{GS} = 5.0V, I_D = 25A$ ②  |
|                                 |                                      | —    | —     | 0.035 |                     | $V_{GS} = 4.0V, I_D = 21A$ ③  |
| $V_{GS(th)}$                    | Gate Threshold Voltage               | 1.0  | —     | 2.0   | V                   | $V_{DS} = V_{GS}, I_D = 250\mu A$   |
| $g_{fs}$                        | Forward Transconductance             | 21   | —     | —     | S                   | $V_{DS} = 25V, I_D = 25A$   |
| $I_{DSS}$                       | Drain-to-Source Leakage Current      | —    | —     | 25    | $\mu A$             | $V_{DS} = 55V, V_{GS} = 0V$   |
|                                 |                                      | —    | —     | 250   |                     | $V_{DS} = 44V, V_{GS} = 0V, T_J = 150^\circ\text{C}$                        |
| $I_{GSS}$                       | Gate-to-Source Forward Leakage       | —    | —     | 100   | nA                  | $V_{GS} = 16V$  |
|                                 | Gate-to-Source Reverse Leakage       | —    | —     | -100  |                     | $V_{GS} = -16V$   |
| $Q_g$                           | Total Gate Charge                    | —    | —     | 48    | nC                  | $I_D = 25A$   |
| $Q_{gs}$                        | Gate-to-Source Charge                | —    | —     | 8.6   |                     | $V_{DS} = 44V$  |
| $Q_{gd}$                        | Gate-to-Drain ("Miller") Charge      | —    | —     | 25    |                     | $V_{GS} = 5.0V$ , See Fig. 6 and 13 ④                                       |
| $t_{d(on)}$                     | Turn-On Delay Time                   | —    | 11    | —     | ns                  | $V_{DD} = 28V$  |
| $t_r$                           | Rise Time                            | —    | 84    | —     |                     | $I_D = 25A$   |
| $t_{d(off)}$                    | Turn-Off Delay Time                  | —    | 26    | —     |                     | $R_G = 3.4\Omega, V_{GS} = 5.0V$  |
| $t_f$                           | Fall Time                            | —    | 15    | —     |                     | $R_D = 1.1\Omega$ , See Fig. 10 ④   |
| $L_D$                           | Internal Drain Inductance            | —    | 4.5   | —     | nH                  | Between lead,<br>6mm (0.25in.)<br>from package<br>and center of die contact |
| $L_S$                           | Internal Source Inductance           | —    | 7.5   | —     |                     |   |
| $C_{iss}$                       | Input Capacitance                    | —    | 1700  | —     | pF                  | $V_{GS} = 0V$   |
| $C_{oss}$                       | Output Capacitance                   | —    | 400   | —     |                     | $V_{DS} = 25V$  |
| $C_{rss}$                       | Reverse Transfer Capacitance         | —    | 150   | —     |                     | $f = 1.0\text{MHz}$ , See Fig. 5  |

## Source-Drain Ratings and Characteristics

|          | Parameter                                 | Min.  | Typ. | Max. | Units | Conditions  |
|----------|---|---|------|------|-------|---|
| $I_S$    | Continuous Source Current<br>(Body Diode) | —   | —    | 47   | A     | MOSFET symbol<br>showing the<br>integral reverse<br>p-n junction diode. |
| $I_{SM}$ | Pulsed Source Current<br>(Body Diode) ①   | —   | —    | 160  |       |   |
| $V_{SD}$ | Diode Forward Voltage                     | —   | —    | 1.3  | V     | $T_J = 25^\circ\text{C}, I_S = 25A, V_{GS} = 0V$ ②                      |
| $t_{rr}$ | Reverse Recovery Time                     | —   | 80   | 120  | ns    | $T_J = 25^\circ\text{C}, I_F = 25A$                                     |
| $Q_{rr}$ | Reverse Recovery Charge                   | —   | 210  | 320  | nC    | $di/dt = 100A/\mu s$ ③  |
| $t_{on}$ | Forward Turn-On Time                      | Intrinsic turn-on time is negligible (turn-on is dominated by $L_S+L_D$ ) |      |      |       |   |

Рисунок 16 – Параметры транзистора IRLZ44N.

Выберем транзистор VT2 исходя из напряжения 24В и тока вентилятора 80 мА. В качестве транзистора VT2 выбрали биполярный транзистор КТ3102БМ, типа NPN, 50В, 0.2А, 0.25Вт, 200МГц,  $h_{21e}=200\dots 500$  в корпусе TO-92 [6, 18, 21].

## Выводы

В данной главе разработаны функциональная схема и электрическая принципиальная схема. Выбраны компоненты.

### 3. Программная часть

Проведение экспериментальных исследований было решено использовать уже имеющуюся печку, предназначенную для лабораторных работ. Задачей экспериментальных исследований является исследование возможных алгоритмов стабилизации температуры и выбора наиболее подходящего. Для этого была разработана блок-схема алгоритма программы (БСА) (изображена на рисунке 17) и написана программа для микроконтроллера, позволяющую реализовать различные алгоритмы управления.

```
#include <LiquidCrystal.h>
LiquidCrystal lcd(8, 9, 4, 5, 6, 7);    // Задаем адрес и размер дисплея
#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>
#define ONE_WIRE_BUS A1
OneWire oneWire(ONE_WIRE_BUS);
DallasTemperature sensor(&oneWire);
DeviceAddress Thermometer0; //переменная для адреса 1го датчика
byte res = 11; //Разрешение датчика
byte Tz = 20; //Заданная температура
float T ; //Считанная температура и температура в предыдущем цикле
float Tlast, dT, Tr; //Температура в предыдущем цикле, изменение
температуры, скорректированная температура
int VT_PIN = 3;
int VT; //Состояние транзистора
int period = 1000; //Период расчета ПИД и вывода данных в монитор порта
int M_PIN = 11; //Вывод для подключения вентилятора. Остутствует в печке
для лабораторных работ
```

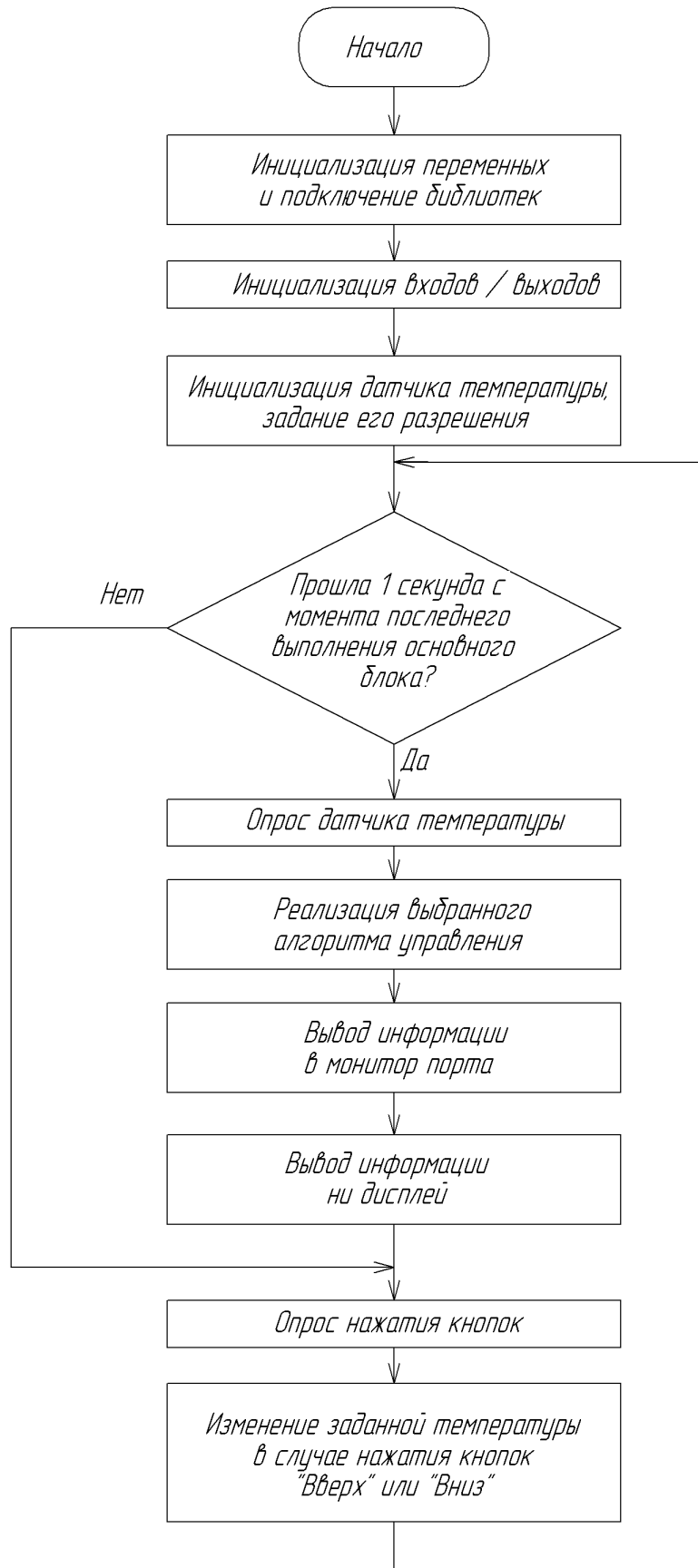


Рисунок 17 – БСА программы управления.

```

float kDp = 12; //10 Дифференциальный коэффициент для порогового
алгоритма
float kP = 50, kI = 0.6, kD = 800; //ПИД коэффициенты для ПИД
регулирования
//float kP = 50, kI = 0, kD = 0; //ПИД коэффициенты для пропорционального
алгоритма
int constrI = 100; //ограничение интеграла сверху
float pid, PID = 0; //расчетный и ограниченный 0..100 % уровень заполнения
нагревом
float err = 0, errLast = 0; //разница между заданным и реальным значением
float dif = 0; //дифференциальная составляющая разницы
float integral = 0; //интегральная составляющая

int button, buttonLast;
const int BUTTON_NONE = 0;
const int BUTTON_RIGHT = 1;
const int BUTTON_UP = 2;
const int BUTTON_DOWN = 3;
const int BUTTON_LEFT = 4;
const int BUTTON_SELECT = 5;

int getPressedButton() {
    int buttonValue = analogRead(0); // считываем значения с аналогового
входа(A0)
    if (buttonValue < 60) return BUTTON_RIGHT; //0
    else if (buttonValue < 200) return BUTTON_UP; //131
    else if (buttonValue < 400) return BUTTON_DOWN; //307
    else if (buttonValue < 600) return BUTTON_LEFT; //481

```

```

else if (buttonValue < 900) return BUTTON_SELECT;//722
return BUTTON_NONE; //1023
}

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  pinMode(VT_PIN, OUTPUT);
  //pinMode(M_PIN, OUTPUT); //Вывод для подключения вентилятора.
  Остутствует в печке для лабораторных работ
  //digitalWrite (M_PIN, HIGH); //Включим и больше не будем выключать.
  lcd.begin(16, 2); lcd.clear();

  sensor.begin(); // Запуск библиотеки, по умолчанию 10 бит, то есть кратность
  0.25 градуса
  //int numberOfDevices = sensors.getDeviceCount(); //число подключенных
  датчиков
  sensor.getAddress(Thermometer0, 0); //присвоить Thermometer0 - адрес
  первого термометра.
  sensor.setResolution(Thermometer0, res);
  sensor.requestTemperatures();
  T = sensor.getTempCByIndex(0);
  sensor.requestTemperatures();
  Tlast = T; //обнуляем дифференциальную составляющую
  errLast = Tz - T;
}

void loop() {
  static uint32_t tmr;

```



```

if (millis() - tmr >= period) { //содержимое таймера будет выполняться 1 раз в
period
    tmr += period; // таймер не будет уходить, но сработает 2 раза подряд, если
программа будет задержана больше, чем на period

    T = sensor.getTempCByIndex(0);
    sensor.requestTemperatures();

    err = Tz - T; //ошибка по температуре
    integral = integral + err;
    integral = constrain (integral, 0, constrI); //ограничим значение интеграла
    float deltaErr = err - errLast; //изменение ошибки по сравнению с
предыдущим периодом
    errLast = err;
    dif = dif * 0.8 + deltaErr * 0.2; // фильтрованная (с тау = 4 циклов) диф.
составляющая
    pid = kP * err + kI * integral + kD * dif;
    PID = constrain (pid, 0, 100);
    // analogWrite(VT_PIN, PID * 2.55); //ПИД алгоритм управления

    //Релейный алгоритм
    // if (T >= (Tz + 1)) VT = 0;
    // if (T <= (Tz - 1)) VT = 1;

    // VT = (Tz > T ? 1 : 0); //Пороговый алгоритм управления

    //Порогово-дифференциальный алгоритм управления
    dT = dT * 0.8 + (T - Tlast) * 0.2; //Скорость нарастания температуры,
фильтрованная (с тау = 4 циклов)

```

```

Tlast = T;
Tr = T + kDp * dT;
VT = (Tz > Tr ? 1 : 0); //Порогово-дифференциальный алгоритм управления
digitalWrite(VT_PIN, VT); //Управлене релейными алгоритмами

SerialPortPlotter (); //выведем показания в программу Serial Port Plotter
// SerialPortPlotterPID (); //выведем показания в программу Serial Port Plotter
LCD_Print (); //Выведем показания на дисплей
}

button = getPressedButton();
if (buttonLast == BUTTON_NONE) { //Если кнопка только что нажата
  switch (button) {
    case BUTTON_RIGHT:    break;
    case BUTTON_LEFT:    break;
    case BUTTON_UP: //Меняем температуру только в 1м режиме
      if (Tz <= 80) Tz = Tz + 10;
      delay (100); //подавление дребезга
      break;
    case BUTTON_DOWN:
      if (Tz >= 20) Tz = Tz - 10;
      delay (100); //подавление дребезга
      break;
    case BUTTON_SELECT:
      break;
  }
}
buttonLast = button;
}

```

```

void SerialPortPlotter () { //выведем показания в программу Serial Port Plotter
  Serial.print("$"); //начальный символ
  Serial.print(T);
  Serial.print(" "); //Пробел - разделитель
  Serial.print(Tz);
  Serial.print(" ");
  Serial.print(VT * 10); //Для релейных алгоритмов
  // Serial.print(PID / 10.0); //Для ПИД алгоритмов
  Serial.print(" ");
  Serial.print(kDp * dT);
  Serial.println(";"); //завершающий символ
}

```

```

void SerialPortPlotterPID () { //выведем показания в программу Serial Port
Plotter
  Serial.print("$"); //начальный символ
  Serial.print(T);
  Serial.print(" "); //Пробел - разделитель
  Serial.print(Tz);
  Serial.print(" "); Serial.print(kP * err, 0);
  Serial.print(" "); Serial.print(kI * integral, 0);
  Serial.print(" "); Serial.print(kD * dif, 0);
  Serial.print(" "); Serial.print(pid / 10.0);
  Serial.print(" "); Serial.print(PID / 10.0);
  Serial.println(";"); //завершающий символ
}

```

```

void LCD_Print () {
  lcd.setCursor(0, 0); // Устанавливаем курсор на 1 строку, ячейка 2

```

```

lcd.print("T="); // Выводим текст
lcd.print(T, 1); // Выводим показания температуры
lcd.print((char)223); //символ °
lcd.print("C VT=");
lcd.print(VT);

lcd.setCursor(0, 1);
lcd.print("Set temp ");
lcd.print(Tz);
lcd.print((char)223); //символ °
lcd.print("C ");
}

/*
Точность и время преобразования температуры
Разрядность АЦП - Шаг в градусах - Время расчета ( время выполнения
sensors.requestTemperatures();
9 - 0.5 - 125 мс
10 - 0.25 - 220
11 - 0.125 - 406
12 - 0.0625 - 780
*/

```

### Выводы

В данной главе происходит разработка управляющей программы для микроконтроллера.

## 4. Экспериментальная часть

Экспериментальные исследования производили на печке с управлением на Arduino для лабораторных работ по ЭТМ. Было разрешено изменять ее программу. Это дало возможность проверить различные алгоритмы управления. Необходимый алгоритм управления включается в программе комментированием (выключением) всех остальных алгоритмов расчета. Дискретность замера температур датчиком составляла  $1/16 \text{ }^\circ\text{C} = 0.0625 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Для выбора наилучшего алгоритма управления было решено произвести экспериментальную апробацию нескольких алгоритмов для стабилизации температуры на уровне  $50 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Релейный алгоритм.

Самым простым алгоритмом управления считается релейный алгоритм. Выбирается ширина гистерезиса, например,  $\Delta T = 1 \text{ }^\circ\text{C}$ . Получаются два пороговых значения заданной температуры. Например, верхний  $T_v = T_z + \Delta T = 51 \text{ }^\circ\text{C}$  и нижний  $T_n = T_z - \Delta T = 49 \text{ }^\circ\text{C}$ . Если реальная температура ниже нижнего значения  $T_n$  – включается нагрев. При достижении верхнего  $T_v$  осуществляется выключение нагрева. Временные диаграммы работы печки согласно этому алгоритму приведены на рисунке 18.

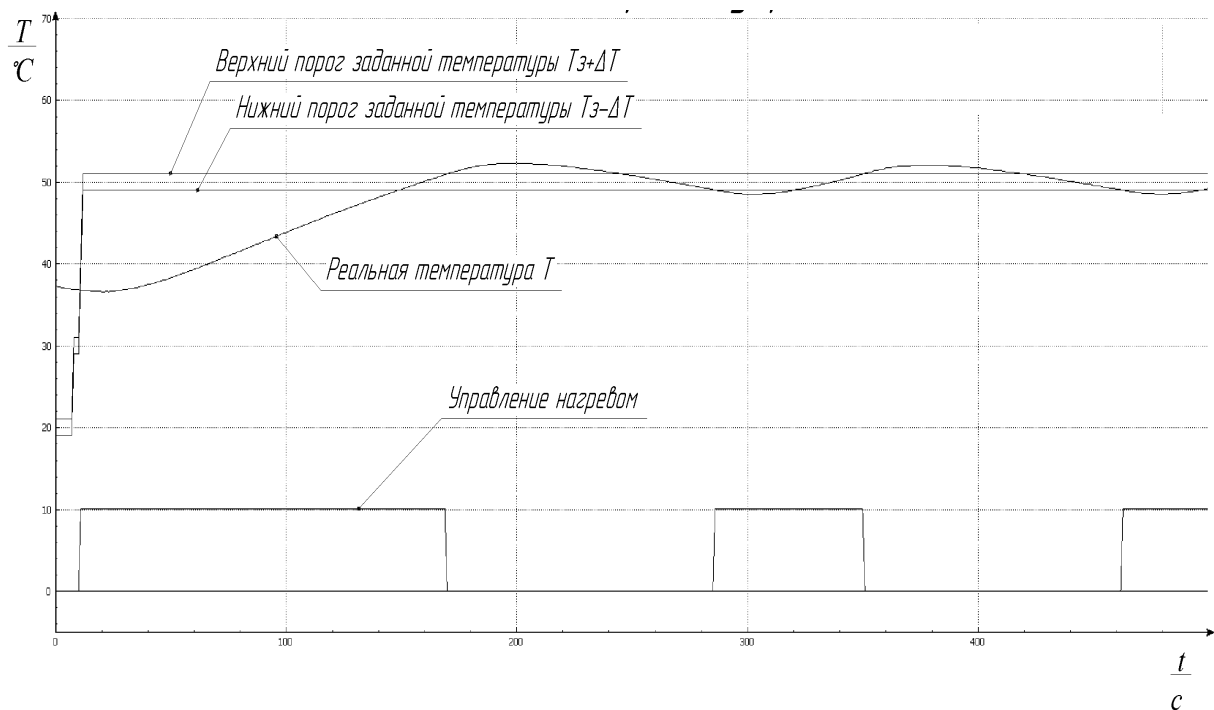


Рисунок 18 - Временные диаграммы работы при релейном алгоритме.

#### Пороговый алгоритм.

При релейном алгоритме шириной гистерезиса можно регулировать частоту включения транзистора. Однако в нашем случае нет транзистор можно включать и выключать часто, поэтому можно принять ширину гистерезиса, равной нулю  $\Delta T=0$ . В этом случае релейный алгоритм превращается в пороговый алгоритм. По сравнению с релейным пороговый обладает большей частотой коммутации транзистора, но и меньшей величиной нестабильности температуры.

Временные диаграммы работы печи согласно этому алгоритму приведены на рисунке 19.

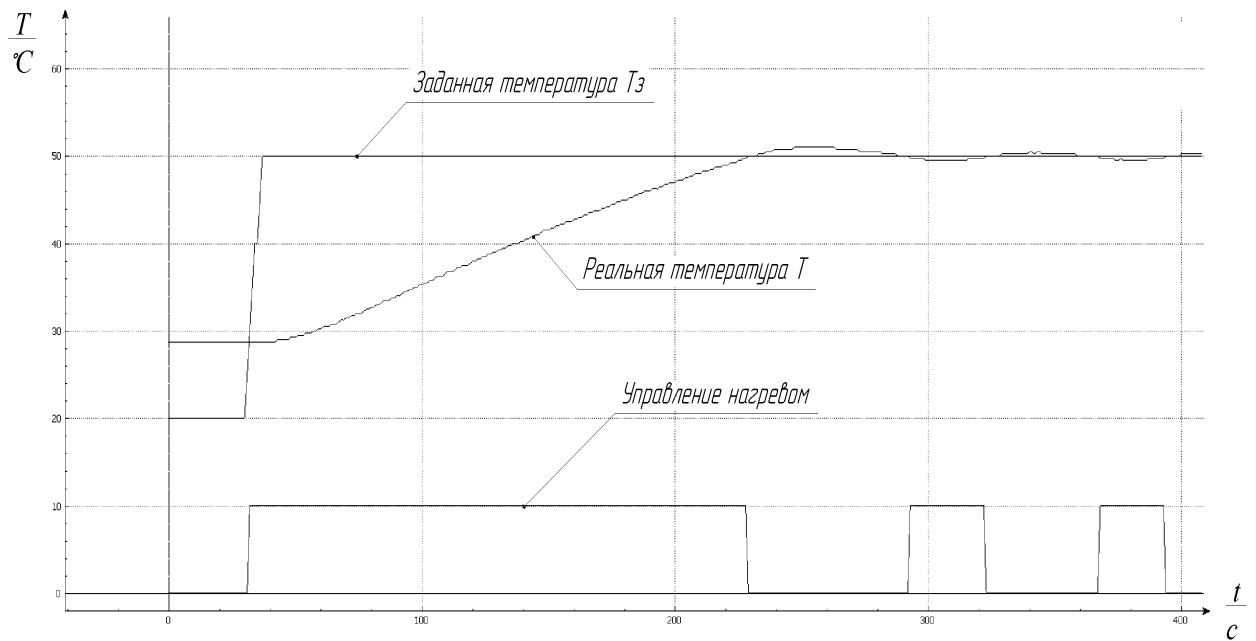


Рисунок 19 - Временные диаграммы работы при пороговом алгоритме.

Пороговый алгоритм с дифференциальной составляющей.

При пороговом алгоритме наблюдается небольшое перерегулирование по температуре. При достижении заданной температуры нагрев выключается, однако по инерции температура повышается еще на 1.5 градуса. Для уменьшения этого эффекта можно отключать нагрев немного заранее до достижения заданной температуры. Для этого посчитать скорость нарастания температуры и помножить его на некоторый коэффициент  $k_{Dr}$ . Полученное значение называется дифференциальной составляющей (рисунок 20). Его прибавляют к реальной температуре  $T$  и уже полученное значение сравнивают с заданной температурой. Таким образом, отключение нагрева происходит немного раньше и перегрев становится меньше.

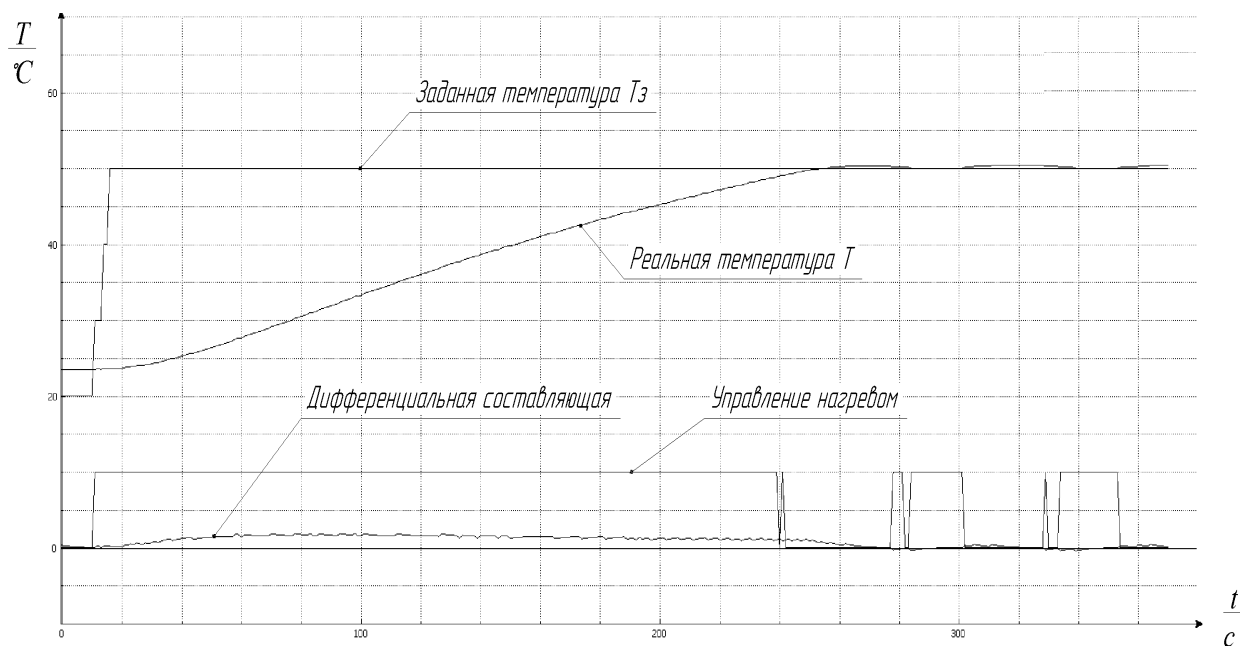


Рисунок 20 - Временные диаграммы работы при пороговом алгоритме с дифференциальной составляющей.

#### Пропорциональный алгоритм.

Все выше опробованные алгоритмы предусматривали регулирование нагрева в 2х состояниях: полностью включен и полностью выключен. Существует возможность плавного регулирования нагрева с помощью ШИМ регулирования. То есть периоды нагрева чередуются с периодами отсутствия нагрева. В ардуино такое управление реализуется командой `analogWrite` (рисунок 21).





Рисунок 21 – Организация ШИМ в ардуино.

В простейшем случае сигнал для ШИМ управления можно получать как разницу между заданной и реальной температурой, умноженную на некоторый коэффициент:

$$\text{ШИМ} = (T_z - T) \cdot k_P \quad (4.1)$$

К недостаткам пропорционального алгоритма можно отнести наличие перерегулирования и меньшее значение установившейся температуры по сравнению с заданным. Временные диаграммы работы печи согласно этому алгоритму приведены на рисунке 22.

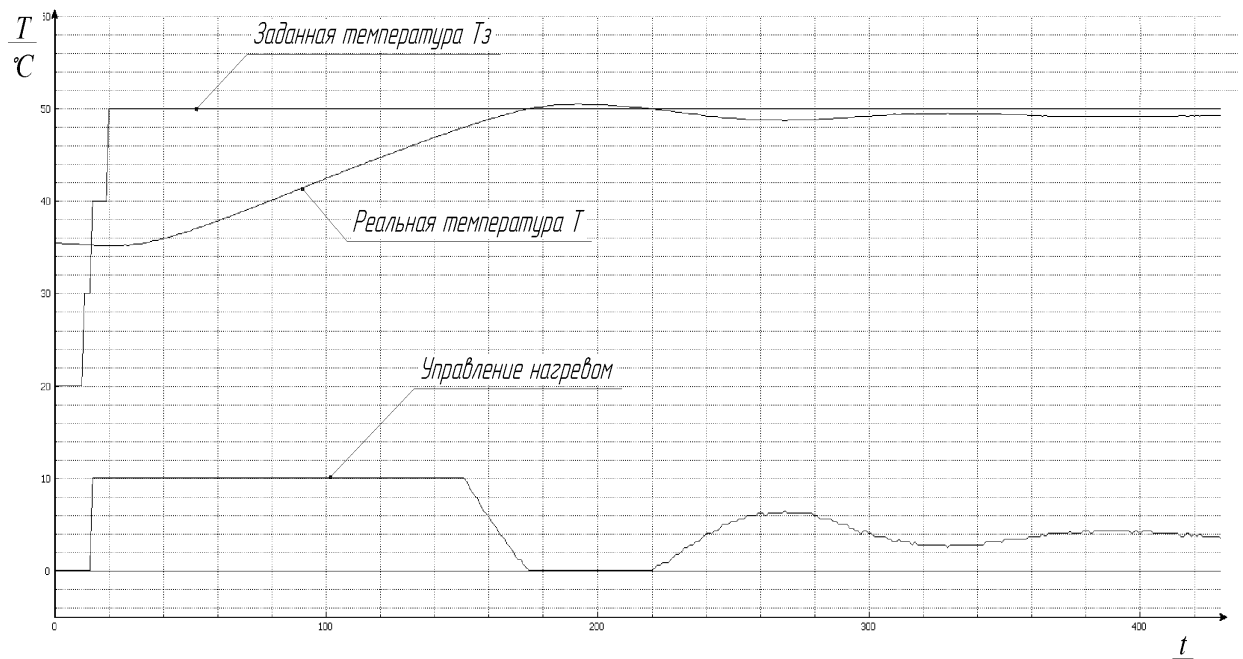


Рисунок 22. Временные диаграммы работы при пропорциональном алгоритме.

ПИД – регулирование.

Наилучшими характеристиками обладает пропорционально-интегрально-дифференциальный алгоритм регулирования. В нем управляющее воздействие формируется следующим образом:

$$\text{ШИМ} = k_P \cdot \text{Err} + k_I \cdot \int \text{Err} \cdot dt + k_D \cdot \frac{d\text{Err}}{dt} \quad , \quad (4.1)$$

где  $\text{Err} = (T_z - T)$  – ошибка регулирования (разница между заданной и реальной температурой).

$k_P$ ,  $k_I$ ,  $k_D$  – соответственно коэффициенты для пропорциональной, интегральной и дифференциальной составляющих. Подбираются экспериментально.

$\int \text{Err} \cdot dt$  – Интегральное значение ошибки. Обычно его ограничивают сверху некоторой величиной  $I_{\max}$ .

$\frac{d\text{Err}}{dt}$  – Скорость изменения ошибки

Временные диаграммы работы печки согласно этому алгоритму приведены на рисунке 23.

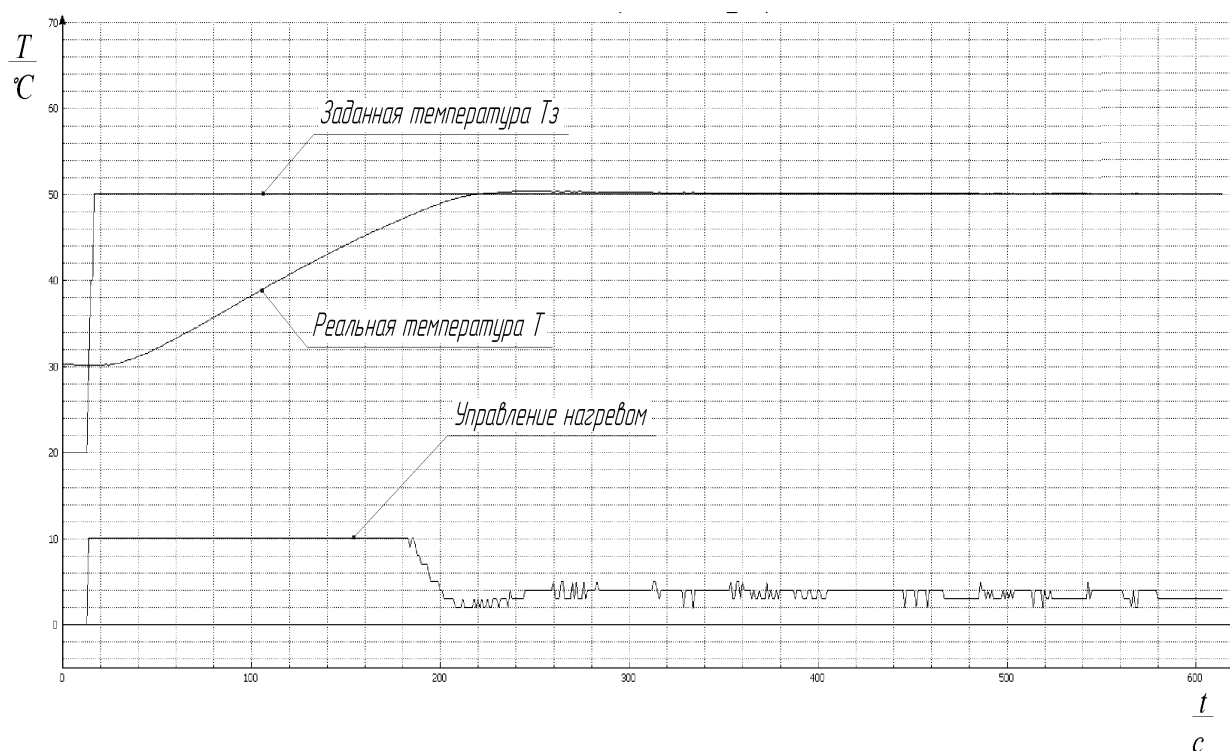


Рисунок 23. Временные диаграммы работы при ПИД алгоритме.

Было замечено, что при использовании пропорционального или ПИД регулирования печка издает пищаний звук. Это связано с частой коммутацией транзистора.

Результаты экспериментальной апробации всех пяти перечисленных алгоритмов сведены в таблицу 2.

Таблица 2 – Результаты работы алгоритмов.

| Название алгоритма               | Заданная температура $T_z, ^\circ\text{C}$ | Коэффициенты   | Максимальная температура, $^\circ\text{C}$ | Перерегулирование, $^\circ\text{C}$ | Температуры в установившемся режиме, $^\circ\text{C}$ | Погрешность в установившемся режиме, $^\circ\text{C}$ |
|----------------------------------|--|--|--|-------------------------------------|---|---|
| 1.Релейный                       | 50   | $\Delta T=1 ^\circ\text{C}$                          | 52.2                                       | +2.2                                | 48.5...51.9   | -1.5...+1.9   |
| 2.Пороговый                      | 50   | ---  | 51.4                                       | +1.4                                | 49.6...50.6   | -0.4...+0.6   |
| 3.Пороговый с дифф. составляющей | 50   | $kDp=12$   | 50.4                                       | +0.4                                | 50.0...50.4   | 0...+0.4  |
| 4.Пропорциональный               | 50   | $kP=50$  | 50.5                                       | +0.5                                | 48.7...49.2   | -1.3...-0.8   |
| 5.ПИД                            | 50   | $kP=50,$<br>$kI=0.6,$<br>$I_{\max}=100,$<br>$kD=800$ | 50.5                                       | +0.5                                | 50...50.06  | 0...+0.06   |
| 3.Пороговый с дифф. составляющей | 40   | $kDp=12$   | 40.5                                       | +0.5                                | 40.0...40.5   | 0...+0.5  |
| 3.Пороговый с дифф. составляющей | 60   | $kDp=12$   | 60.1                                       | +0.1                                | 59.0...60.1   | -0.4...+0.1   |
| 3.Пороговый с дифф. составляющей | 70   | $kDp=12$   | 70.0                                       | 0                                   | 69.6...70.0   | -0.4...0  |
|                                  |  |  |  |                                     |   |   |

### Выводы.

Алгоритм с ПИД регулированием обладает самой большой точностью, однако при его реализации раздается пищащий звук, что неприятно. В то же время пороговый алгоритм с дифференциальной составляющей обладает вполне достаточной точностью установления температуры  $0...+0.4$ , поэтому он был выбран для окончательной практической реализации. Далее было проведено исследование этого алгоритма по стабилизации на других температурах (от 40 до 70  $^\circ\text{C}$ ), результаты сведены в таблицу 2. По результатам было выявлено, что выбранный алгоритм так же хорошо работает и во всем температурном диапазоне.

## Заключение

В данной ВКР была разработана система подогрева и поддержания температуры воздуха в 3d-принтере.

Для достижения цели работы были решены следующие задачи:

1. Обзор состояния вопроса
2. Анализ исходных данных и существующих решений
3. Разработка электрической принципиальной схемы
4. Написание программы для микроконтроллера
5. Проведение экспериментальных исследований, тестирование различных алгоритмов поддержания температуры.

Центральным элементом разработанной схемы является микроконтроллер Ардуино. Он получает информацию с датчика температуры и управляет транзисторами, коммутируя подачу напряжения на нагревательный элемент и вентилятор. Задание необходимой температуры и индикацию достигнутой осуществляется модулем дисплея с кнопками LCD Shield, подключенным непосредственно к Ардуино.

В экспериментальной части было практически апробировано 5 различных алгоритмов управления и подобраны коэффициенты к ним. Результаты были сравнены между собой. Наилучшим для наших задач был выбран пороговый алгоритм с дифференциальной составляющей, позволяющий регулировать температуру до 70 °С с максимальной погрешностью -0.4...+0.5 °С во всем диапазоне регулирования.

Согласно полученному алгоритму управления была модернизирована программа для микроконтроллера, управляющая нагревательным стендом, который используется при проведении лабораторных работ по дисциплине «Электротехнические материалы».

Работа оформлена в соответствии с требованиями [1, 3, 4, 5, 12, 13, 14, 23].

## Список используемой литературы

1. Александров А.А. Электротехнические чертежи и схемы / Александров К.К., Кузьмина Е.Г. - М.: Энергоатомиздат, 1990. - 288с.
2. Блок питания, 24В, 15А, 360Вт. [Электронный ресурс] [https://supereyes.ru/catalog/Power\\_supply\\_AC\\_DC\\_converters/Blok\\_pitanija\\_24V\\_15A\\_360Vt/](https://supereyes.ru/catalog/Power_supply_AC_DC_converters/Blok_pitanija_24V_15A_360Vt/) (дата обращения 28.01.2022)
3. ГОСТ 2.105-95. Единая система конструкторской документации. Общие требования к текстовым документам [Текст]. - Введ. 1996-07-01. - М.: Госстандарт РФ: Изд-во стандартов, 1994.- 19с.: ил.
4. ГОСТ 2.702-2011. Единая система конструкторской документации. Правила выполнения схем.- Введ. 2012-01-01. - М.: Стандартиформ: Изд-во стандартов, 2011.- 22с.: ил.
5. ГОСТ 7.32-2001. Отчет о научно-исследовательской работе. Структура и правила оформления [Текст]. - Введ. 2002-07-01. - М.: Госстандарт РФ: Изд-во стандартов, 2001.- 23с.
6. Гусев В.Г., Гусев Ю.М. Электроника: Учеб. Пособие для приборостроит. Спец. Вузов. –М.: Высш. шк.1991.- 622 с.
7. Забродин Ю.С. Промышленная электроника: Учебник для вузов. –М: Высш. школа, 1982. -496 с.: ил.
8. Зиновьев, Г.С. Основы силовой электроники: учеб.пособ./ Зиновьев, Г.С. - Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2003. - 664с.
9. Интернет магазин электронных компонентов «Импульс» [Электронный ресурс]. URL: <https://www.impulsi.ru> (дата обращения 04.06.2022).
10. Каталог электронных компонентов [Электронный ресурс]. URL: [http:// www.platan.ru](http://www.platan.ru) (дата обращения: 17.05.2022)
11. Каталог электронных компонентов [Электронный ресурс]. URL: [http:// www.chip-dip.ru](http://www.chip-dip.ru) (дата обращения: 17.05.2022)

12. Методические указания по оформлению выпускных квалификационных работ по программам бакалавриата, программам специалитета, программам магистратуры : [Электронный ресурс]. URL: [https://yadi.sk/d/Fs-9ts\\_VInrE3Q/BKP\\_\(Diplom\)](https://yadi.sk/d/Fs-9ts_VInrE3Q/BKP_(Diplom)) / Оформление ВКР (Дата обращения: 18.02.2021)

13. Положение о выпускной квалификационной работе: утв. решен. учен. совет. от 21.11.2019 решение №254 : [Электронный ресурс]. URL: [https://yadi.sk/d/Fs-9ts\\_VInrE3Q/BKP\\_\(Diplom\)](https://yadi.sk/d/Fs-9ts_VInrE3Q/BKP_(Diplom)) / Положение о ВКР (Дата обращения: 18.02.2021)

14. Порядок обеспечения самостоятельности выполнения письменных работ в ТГУ : [Электронный ресурс]. URL: [https://yadi.sk/d/Fs-9ts\\_VInrE3Q/BKP\\_\(Diplom\)](https://yadi.sk/d/Fs-9ts_VInrE3Q/BKP_(Diplom)) / Положение о Антиплагиате (Дата обращения: 18.02.2021)

15. Простой способ борьбы с деламацией [Электронный ресурс] URL: <https://3dtoday.ru/blogs/sergey225/a-simple-way-of-dealing-with-delamination>. (дата обращения 28.01.2022).

16. Резисторы: Справочник / В.В. Дубровский, Д.М. Иванов, Н.Я. Пратусевич и др. Под ред. И.И. Четверткова и В.М. Терехова. -2-е изд., перераб. И доп. – М.: Радио и связь, 1991.-528 с.:ил.

17. Семёнов Б.Ю. Силовая электроника: от простого к сложному. – 2 изд., испр - М.: СОЛОН-Пресс, 2015. – 416с.: ил.

18. Силовые полупроводниковые приборы. Пер. с англ. Под ред. В.В. Токарева. Первое издание. – Воронеж: «Элист», 1995 г. – 664 с.

19. Справочник разработчика и конструктора РЭА. Элементная база/ Масленников М.Ю., Соболев Е.А., Соколов Г.В. и др.; Под ред. Масленникова М.Ю. М.: Радио и связь, 1996.

20. Строим термокамеру для 3D-принтера и печатаем ABS'ом [Электронный ресурс] URL: <https://eas.me/diy-heated-build-chamber/> (дата обращения 28.01.2022).

21. Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника: Справочное руководство. Пер. с нем. – М.: Мир,1982. – 512 с.,ил.
22. Хоровиц, Хилл: Искусство схемотехники. М.: Издательство БИНОМ 2014. -704 с.,ил.
23. Электроника и наноэлектроника, управление в технических системах, электроэнергетика и электротехника. Выполнение бакалаврской работы / сост. Позднов М.В., Прядилов А.В. - Тольятти: ТГУ, 2019. - 41 с.
24. Diodes Incorporated [Электронный ресурс]. URL: <https://www.diodes.com> (дата обращения: 27.05.2022)
25. Electrical resistance [Электронный ресурс]. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Electrical\\_resistance](https://en.wikipedia.org/wiki/Electrical_resistance) (дата обращения: 17.05.2021)
26. Electrical conductance [Электронный ресурс]. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Electrical\\_conductance](https://en.wikipedia.org/wiki/Electrical_conductance) (дата обращения: 17.05.2022)
27. Electronic Components Datasheets [Электронный ресурс] URL: <http://www.datasheets.ru> (дата обращения: 17.02.2022)
28. E.S Omokere, A.O.C Nwokoye. Evaluating the performance of a single phase PWM inverter using 3525A PWM IC. International Journal Engineering Research & Technology (IJERT), Vol 1,pp. 1-4, June-2012.
29. M.IJahmeerbacus, M.KOolun, M.K.SOyjaudah. A Dual-Stage PWM DC to AC Inverter with Reduced Harmonic Distortion andSwitching Losses. Science and Technology-Research Journal,Vol 5,pp 79-91, 2000.
30. Resistor [Электронный ресурс]. URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Resistor> (дата обращения: 17.05.2022)
31. S. A. Prasad, B. S. Kariyappa, R. Nagary, S. K. Thakur, Microcontroller Based AC Power Controller, Wireless Sensor Network,Vol. 1, Issue 2, Jul 2009, pp. 76-81.