

А



Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Московский государственный технический университет  
имени Н.Э. Баумана  
(национальный исследовательский университет)»  
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

---

ФАКУЛЬТЕТ Радиоэлектроника и лазерная техника (РЛ)

КАФЕДРА Технология приборостроения (РЛ6)

# РАСЧЕТНО-ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

## *К КУРСОВОЙ РАБОТЕ*

### *НА ТЕМУ:*

### *Система управления термостатом*

Студент РЛ6-79  
(Группа)

Лобанов Д.Д.  
(Подпись, дата) (Ф.И.О.)

Руководитель курсовой работы

Семеренко Д.А.  
(Подпись, дата) (И.О.Фамилия)

2023 г.

## Оглавление

Введение.....	3
Глава 1. Обзор существующих решений .....	4
Глава 2. Функциональная и принципиальная электрическая схем устройства .....	6
Глава 3. Алгоритм работы микроконтроллера и основные узлы устройства.....	8
Глава 4. Результаты исследований .....	14
Сравнение датчиков температуры .....	14
Релейный регулятор.....	15
ПИД-регулятор .....	15
Вывод .....	16
Заключение .....	17
Литература .....	18
Приложение А.....	19
Приложение Б .....	21

## **Введение**

В работе авторы [1] привели следующую классификация термостатов:

- по способу реализации: механические, электронные, электронные программируемые;
- по диапазону температур: высокотемпературные; среднетемпературные, низкотемпературные;
- по точности поддержания температуры уставки: с большим отклонением, с средним отклонением, высокоточные.
- по количеству контуров: одноконтурные, многоконтурные.

Отмечают ряд проблем реализации термостатов, связанных с: инерционностью датчика температуры, реализацией нагревания за определенный промежуток времени, ступенчатого нагревания, взаимодействием с пользователем.

В работе необходимо выполнить:

1. сравнение различных датчиков температуры (аналоговых, цифровых);
2. сравнение алгоритмов стабилизации температуры: ПИД-регулятор, релейный;
3. реализация алгоритмов для нагрева за определённый промежуток времени, ступенчатого нагрева;
4. реализация программы для ПК.

## Глава 1. Обзор существующих решений

Все термостаты имеют схожую структуру и состоят из следующих частей: орган управления, датчики измерения температуры, регулирующий элемент, объект управления, устройство ввода, индикаторы, преобразователи интерфейсов.

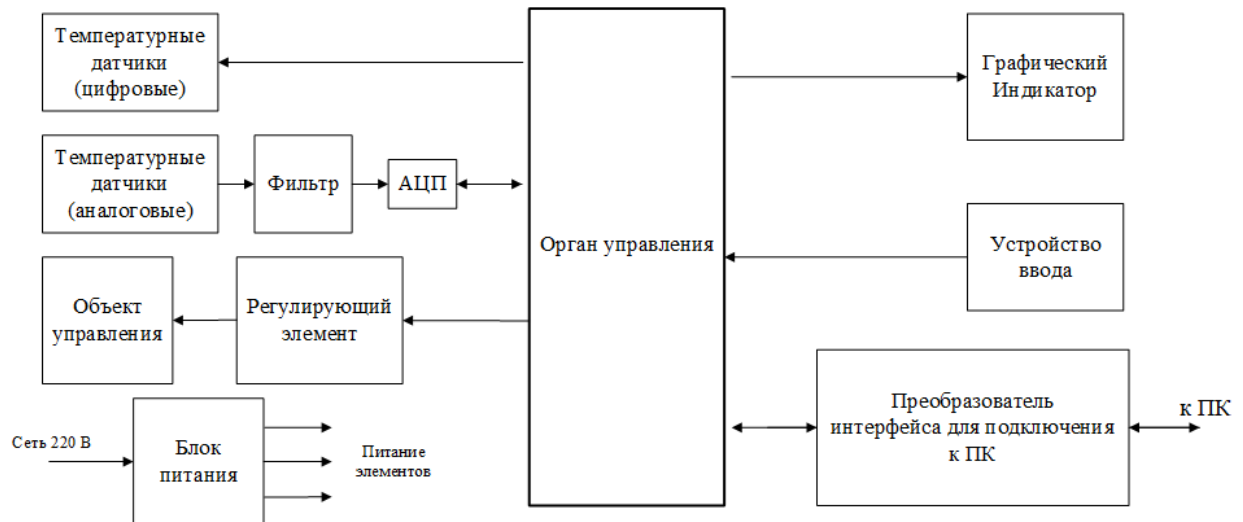


Рисунок 1 – Структурная схема термостата

Основными параметрами термостата являются: температурный диапазон работы, точность измерения температуры, точность поддержания температуры, способ регулирования.

На рисунке 2 представлена схема ПИД-регулятора:

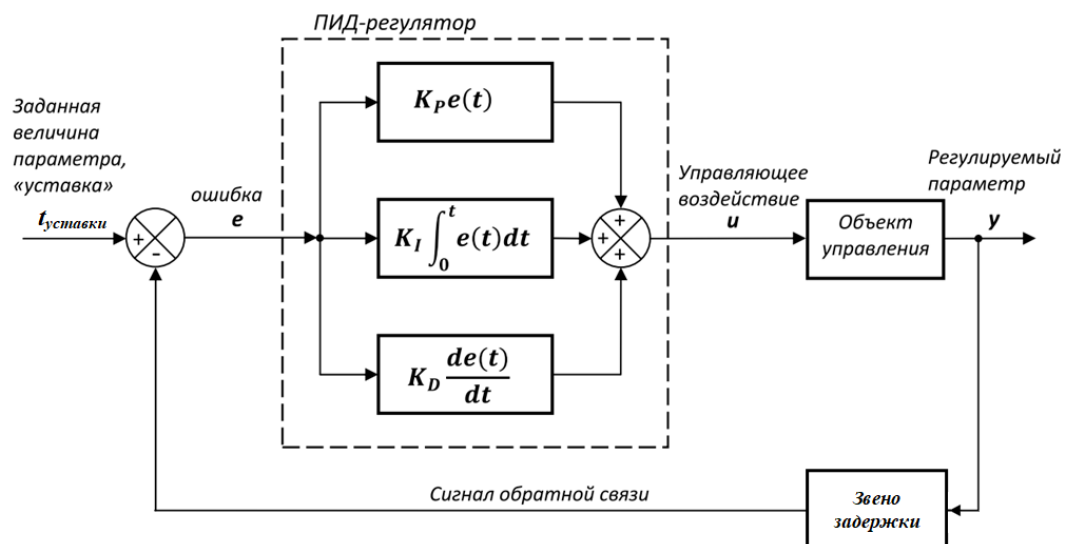


Рисунок 2 – Схема ПИД-регулятора

Автор в [2] приводит следующую характеристику элементов ПИД-регулятора:

- Пропорциональное звено мгновенно реагирует на текущую ошибку  $e = t_{\text{уставки}} - t_{\text{текущая}}$ ;
- интегральное звено накапливает предыдущие ошибки;
- дифференциальное влияет на скорость нагрева/охлаждения.

Звено задержки в сигнале обратной связи необходимо для компенсации временных задержек между изменением управляющего воздействия и реакцией системы на это воздействие.

Управляющее воздействие вычисляется по формуле:

$$I = K_p e + K_I \int e dt - K_d \frac{de}{dt}$$

Основной задачей при разработке ПИД-регулятора является подбор коэффициентов  $K_p, K_I, K_d$ .

## Глава 2. Функциональная и принципиальная электрическая схем устройства

На рисунке 2 представлена функциональная схема устройства:

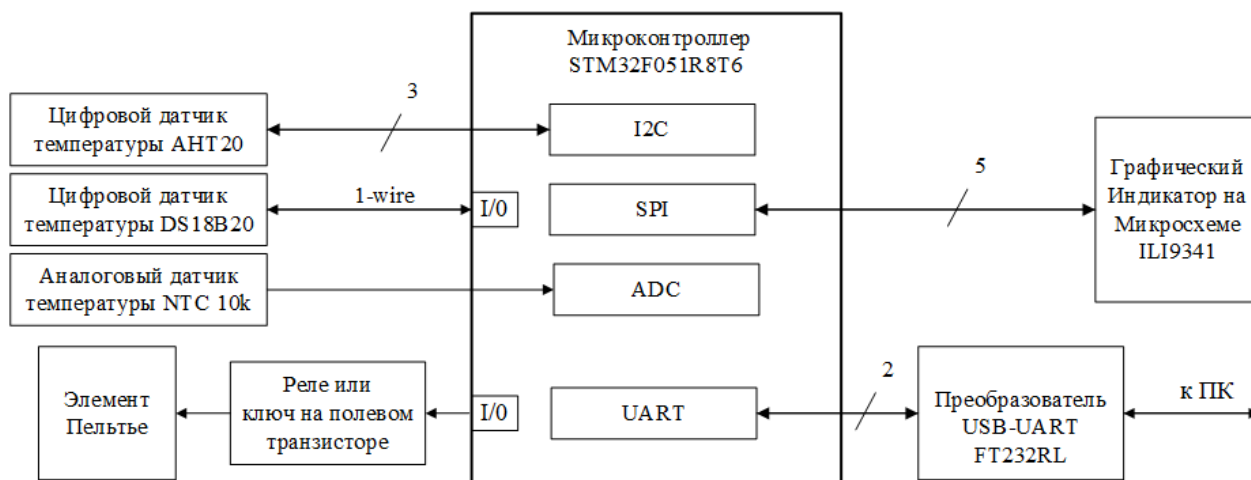


Рисунок 3 – Функциональная схема устройства

Основными элементами функциональной схемы являются:

1. Температурные датчики, подключенные к микроконтроллеру по разным интерфейсам и предназначенные для оценки точности измерения температуры представлены в таблице 1;
2. элемент Пельтье, подключенный через управляющий элемент (электромеханическое реле или ключ на полевом транзисторе);
3. графический индикатор TFT с контроллером ILI9341, подключенный по интерфейсу SPI и предназначенный для вывода текущей и целевой температур или графика;
4. преобразователь USB-UART на основе микросхемы FT232RL предназначен для передачи данных на ПК.

Таблица 1 – Характеристики датчиков температуры

№	Название	Диапазон измерения, °C	Точность измерения, °C	Интерфейс подключения	Частота измерения, Гц
1	АНТ20	-55...125	0,5/1 °C	I2C	80
2	DS18B20	-40...85	0,3/1 °C	1-Wire	750
3	NTC 10k	-60...300	0,2/1 °C	Через АЦП	С частотой АЦП

По функциональной схеме разработана электрическая принципиальная схема, представленная на рисунке 4:

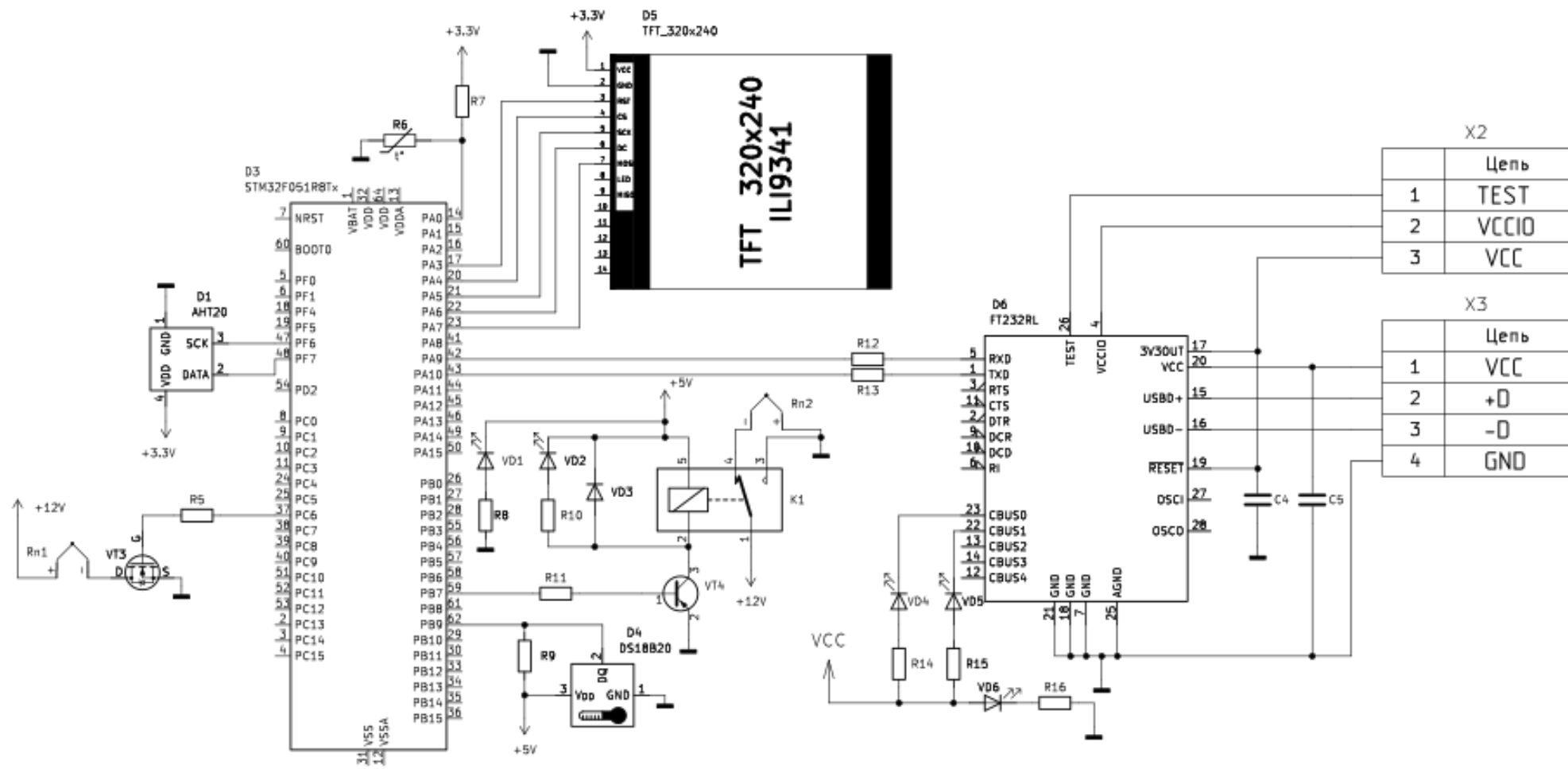


Рисунок 4 – Принципиальная электрическая схема устройства

### Глава 3. Алгоритм работы микроконтроллера и основные узлы устройства

При подключении устройства к питанию выполняется инициализация микроконтроллера, в процессе которой происходит:

- Инициализация тактовой частоты микроконтроллера – 40 МГц;
  - Инициализация периферии для датчиков температуры: GPIO, таймер для интерфейса 1-Wire, ADC с DMA для датчика NTC 10k, I2C для датчика АНТ20;
  - инициализация периферии для TFT дисплея: GPIO, SPI с DMA каналами, проверка работы дисплея с помощью команд;
  - инициализация USART с прерываниями по DMA каналу для получения команды с ПК;
  - инициализация GPIO и таймеров для релейного регулирования;
  - инициализация GPIO, таймера для формирования ШИМ ПИД-регулятора;
- На рисунке 5 представлена блок-схема main файла программы:

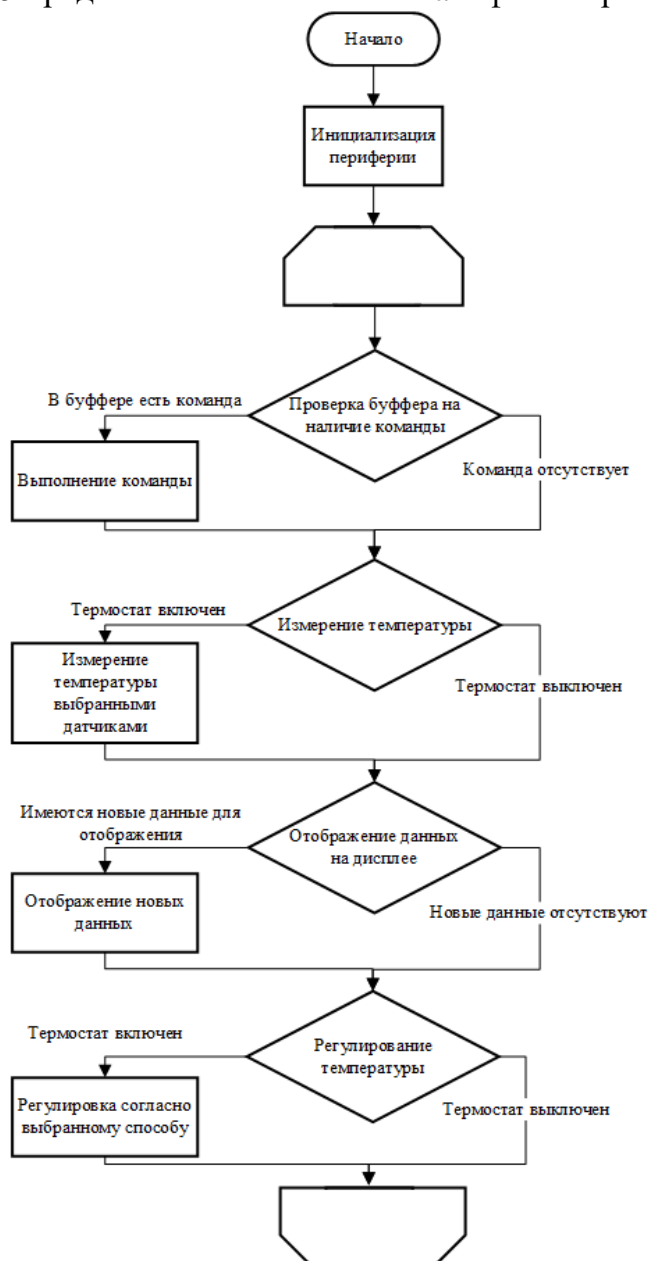


Рисунок 5 – Main файл программы



В блоке проверки команды UART происходит сравнение полученной и имеющейся в памяти микроконтроллера команд. Данные передаются в следующем формате:

Таблица 2 – Формат передачи данных

Стартовый байт	Команда	Количество передаваемых данных		Данные	Проверочный байт
0xAB	таблица 3	Количество данных в байтах		Данные	0x09
1 байт	1 байт	1 байт	1 байт	От 0 до 960 байт	1 байт

Размер данных меняется от 0 до 960 байт из-за необходимости протестировать графический дисплей для построения графиков. График размером 320x240 передаётся в чёрно-белом формате (в 1 байт записывается 8 пикселей), в результате чего полный объём данных составляет 9600 байт. Их передача осуществляется за 10 циклов с задержкой между итерациями по причинам ограниченности максимального объёма данных, принимаемых по DMA каналу и разгрузки микроконтроллера для выполнения других задач.

Список используемых команд и их структура представлены в таблицах A1 и A2.

В блоке измерения температуры происходит опрос датчиков, которые были выбраны пользователем в приложении в качестве активных.

В блоке изображения данных производится:

- вывод температуры либо графика изменения температуры на TFT дисплей в зависимости от выбора пользователя в приложении;
- отправка результатов опроса датчиков на ПК;

В блоке регулирования температуры выполняется текущая задача, заданная пользователем в приложении, а именно:

- Свободное управление: устройство в ожидании ввода температуры уставки, возможно выполнить команду установки максимального тока в течении времени (от 0 до 60 секунд);
- релейное регулирование. Электромеханическое реле имеет ограниченное количество циклов переключения, что накладывает ограничения его использования. Используя личный опыт, минимальное время открывания реле ограничено 1 секундой.

После ряда измерений в качестве среднего нагрева за 1 секунду была принята величина 0,65 °С. Были добавлены дополнительные коэффициенты

регулирования, которые будут учитывать разность текущей температуры уставки и комнатной температуры.

Время нагрева до температуры уставки:

$$\tau_{\text{нагрева}} = \frac{(t_{\text{уставки}} - t)}{0,65 - (t_{\text{уставки}} - t) \cdot 0,006}$$

Время поддержания температуры:

$$\tau_{\text{поддержания}} = 1 + (t_{\text{уставки}} - t) \cdot 0,03$$

Алгоритм релейного регулирования представлен на рисунке 6:

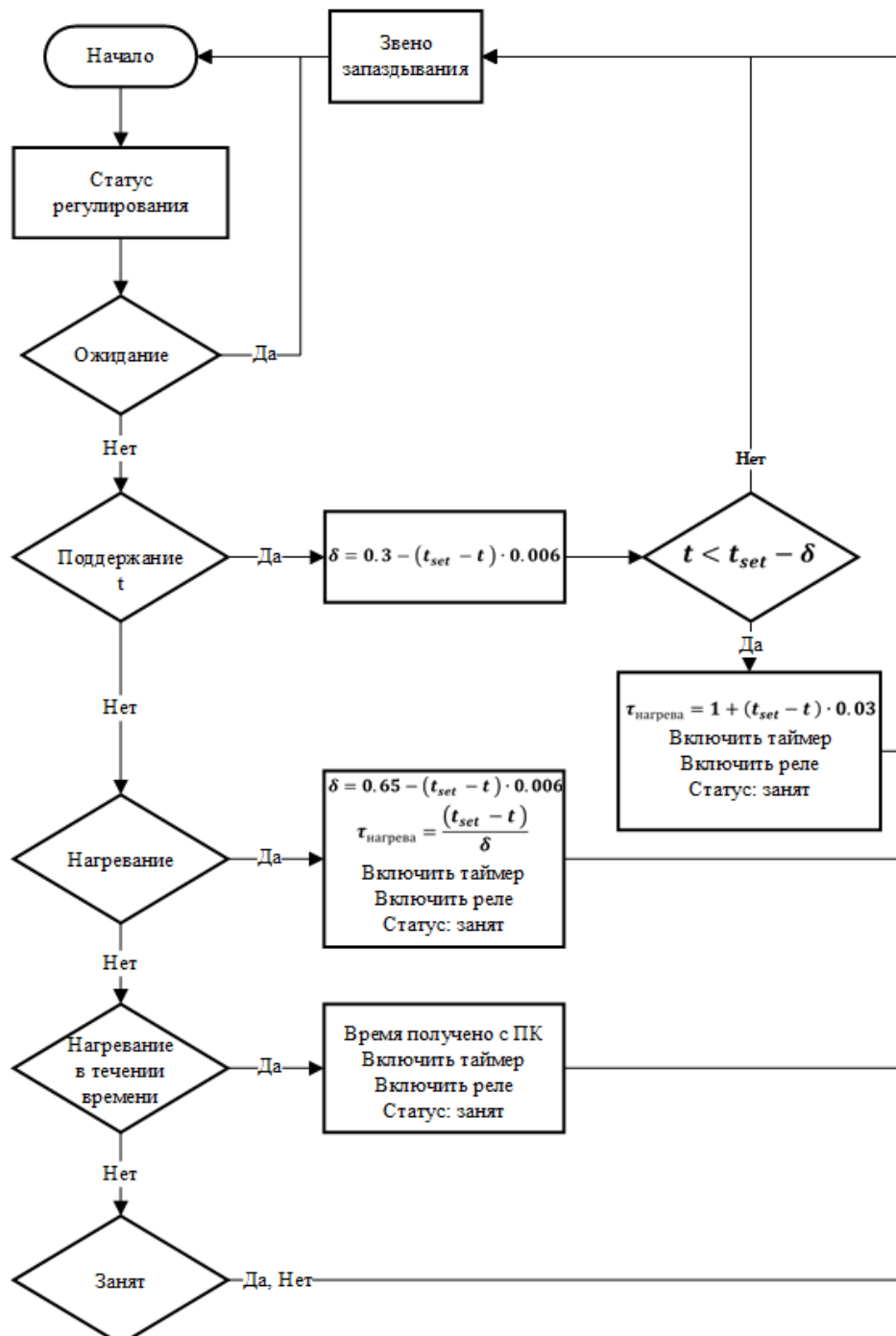


Рисунок 6 – Алгоритм релейного регулирования

Если за вычисленное время нагревания не была достигнута температура уставки, то в прерывании таймера, отсчитывающего время нагрева, вновь устанавливается статус регулирования «Нагревание» и алгоритм выполняет новый цикл.

- ПИД-регулирование.

Осуществляется вычисление заполненности ШИМ сигнала частотой 1 кГц, подаваемого на затвор полевого транзистора. Новое значение присваивается соответствующему регистру таймера и включается звено задержки для ожидания реакции системы на новое воздействие.

Алгоритм ПИД-регулирования представлен на рисунке 7:

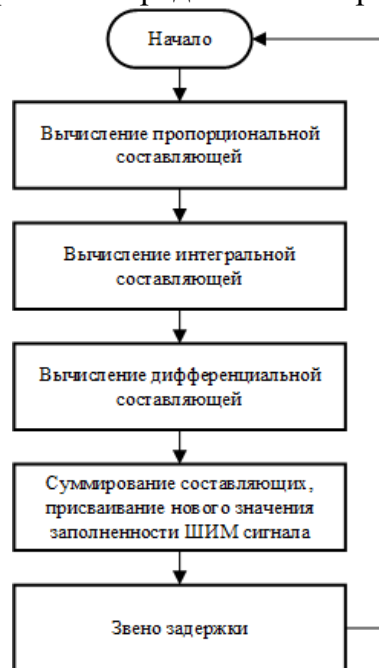


Рисунок 7 – Алгоритм ПИД-регулирования

- Ступенчатое нагревание.

Значение температуры уставки, шага нагрева и времени поддержания промежуточной температуры задаётся пользователем в приложении. В микроконтроллере используется таймер, считающий по событиям прерывания другого односекундного таймера, в результате чего максимальное время поддержания промежуточной температуры теоретически ограничено  $2^{16}$  секундами.

При старте работы алгоритма происходит вычисление первой промежуточной температуры по формуле:

$$t_{\text{промежуточная}} = t_{\text{текущая}} + t_{\text{шаг}}$$

Далее осуществляется ПИД-регулирование промежуточной температуры до тех пор, пока остаток деления счётчика таймера на время пользователя не станет равным нулю: происходит новый цикл вычисления промежуточной температуры.

На рисунке 8 представлен алгоритм ступенчатого нагрева:

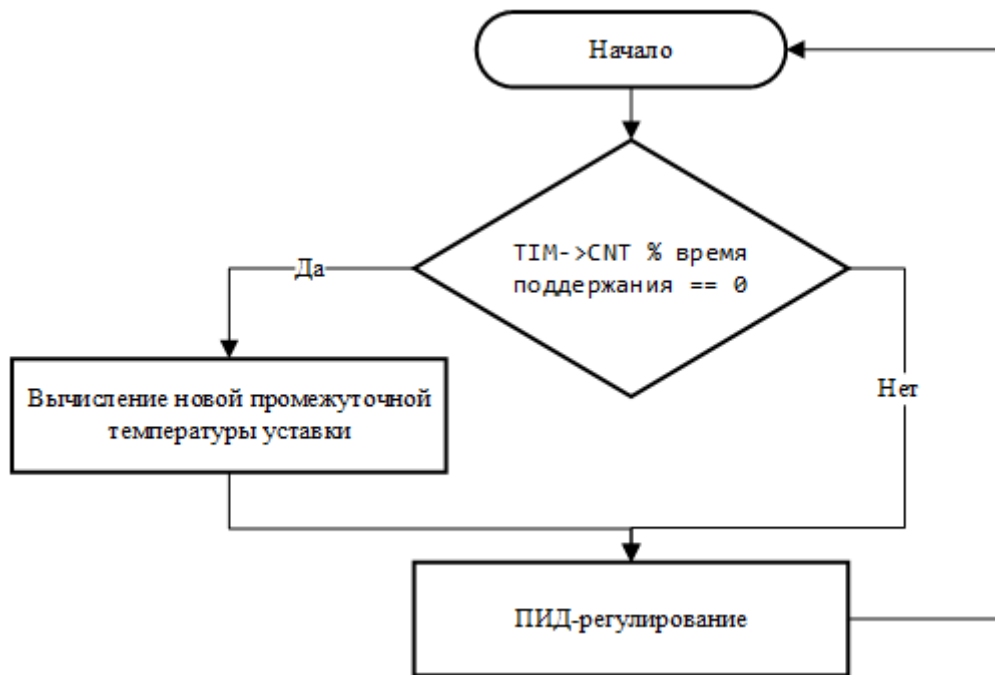


Рисунок 8 – Алгоритм ступенчатого нагрева

Температурная зависимость ступенчатого нагрева для  $t_{\text{начальная}} = 29,5^{\circ}\text{C}$ ,  $t_{\text{шаг}} = 3^{\circ}\text{C}$ ,  $t_{\text{конечная}} = 37^{\circ}\text{C}$ ,  $\tau_{\text{поддержания}} = 2$  мин. представлена на рисунке Б1.

- Нагревание за определённый промежуток времени.

Значение температуры уставки, времени нагрева и нагрева за 1 секунду в  $^{\circ}\text{C}$  задаётся пользователем в приложении. По полученным данным вычисляется необходимый средний нагрев за 1 секунду:

$$t_{1 \text{ сек необ}} = \frac{t_{\text{уставки}} - t_{\text{текущая}}}{\tau_{\text{нагрева}}}$$

Начальное значение заполненности ШИМ сигнала определяется из пропорции:

$$\frac{1 \text{ сек} - \Delta t_{1 \text{ сек}}}{x \text{ сек} - \Delta t_{1 \text{ сек необ}}} \Rightarrow x = \frac{\Delta t_{1 \text{ сек необ}}}{\Delta t_{1 \text{ сек}}} \Rightarrow \text{Duty} = x \cdot 1000$$

В цикле каждую секунду производится проверка, насколько изменилась температура за 1 секунду: если  $t_{1 \text{ сек необ}}$  не была достигнута, то заполненность увеличивается, иначе, если нагрев был перевыполнен, заполненность уменьшается.

На рисунке 9 представлен алгоритм нагрева за определённый промежуток времени:

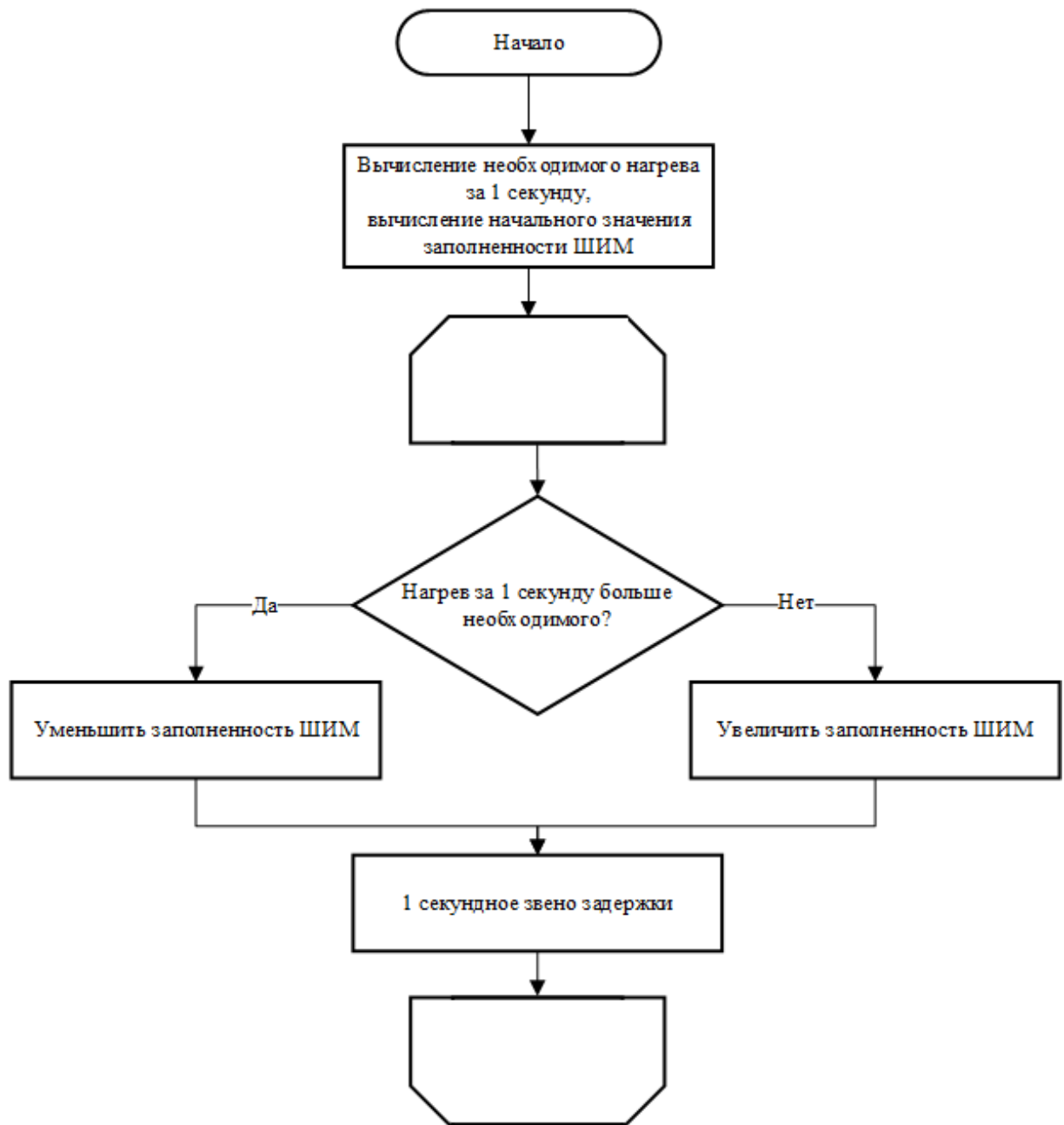


Рисунок 9 – Алгоритм нагрева за определённый промежуток времени

Температурная зависимость нагрева за время для  $t_{\text{начальная}} = 28,5^{\circ}\text{C}$ ,  $t_{\text{конечная}} = 37^{\circ}\text{C}$ ,  $\tau_{\text{нагрева}} = 5$  мин. представлена на рисунке Б2.

## Глава 4. Результаты исследований

### Сравнение датчиков температуры

Выбор датчика температуры осуществляется из показателей его точности и инерционности. Результат пропускания через элемент Пельтье максимального тока в течении 15 секунд (промежуток обозначен первыми двумя пунктирными линиями) и реакция датчиков на изменение температуры представлена на рисунке 10:

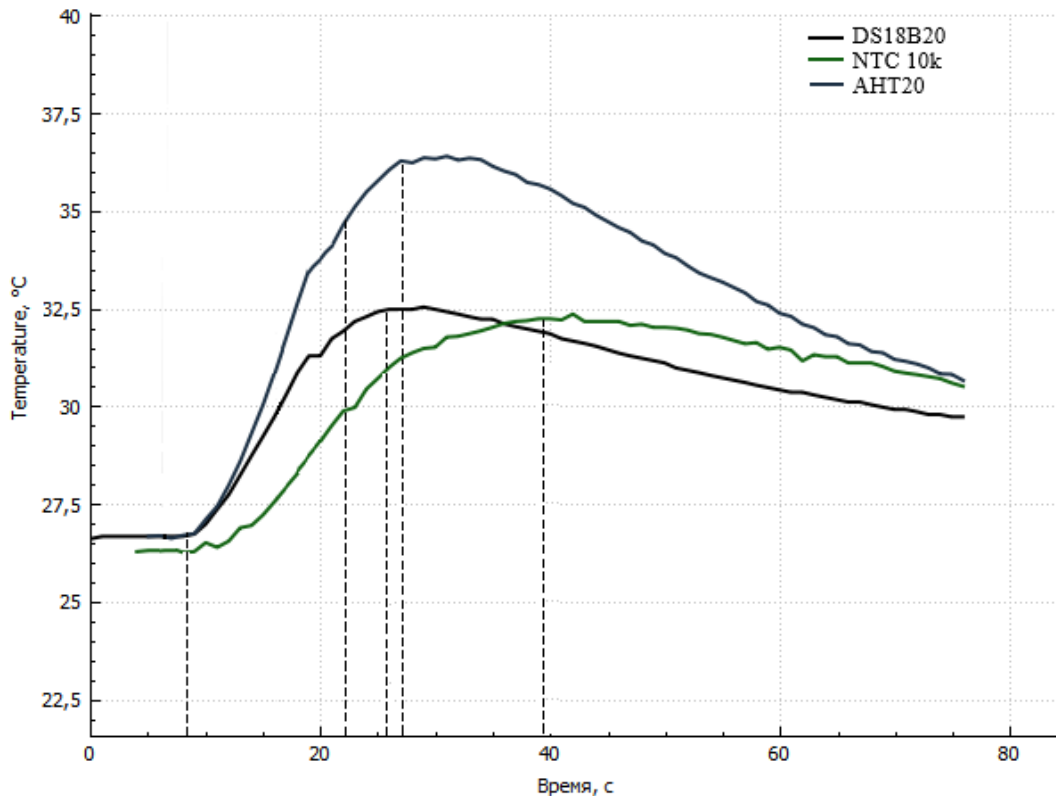


Рисунок 10 – Сравнение инерционности датчиков температуры

Наилучший показатель инерционности имеет DS18B20, обеспечивая задержку между воздействием и его результатом в 4 секунды.

Термистор имеет большую инерционность, поэтому не рекомендуется для использования в регуляторе температуры.

АНТ20 даёт точные показатели при медленном изменении температуры, но при повышении скорости изменения температуры показания сильно отличаются от действительных, что может быть вызвано дефектом датчика.

## Релейный регулятор

Температурная зависимость релейного регулятора при  $t_{\text{уставки}} = 35^{\circ}\text{C}$ :

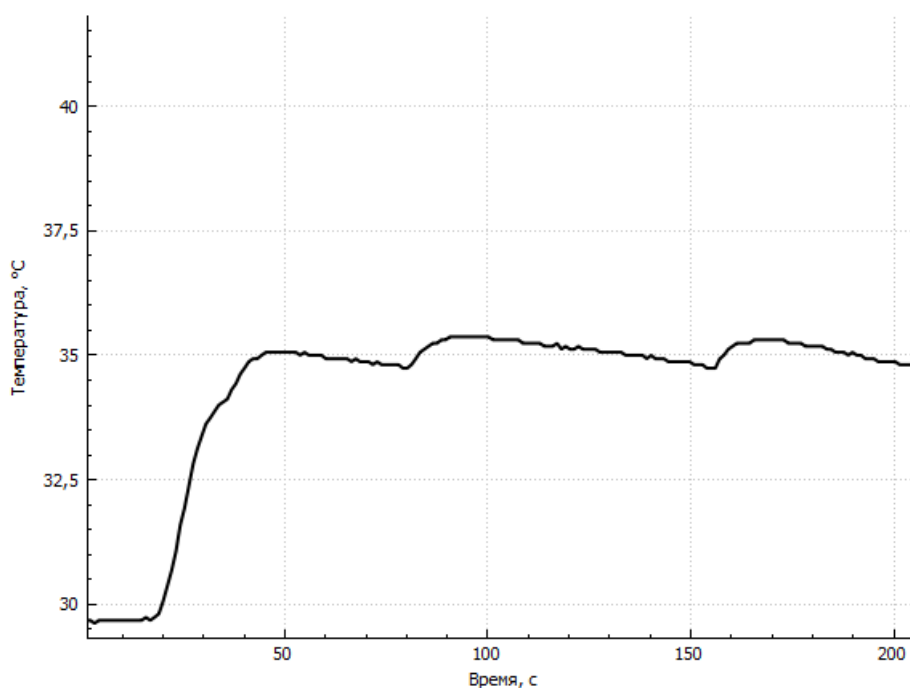


Рисунок 11 – Релейное регулирование

Алгоритм осуществил нагрев до температуры уставки за 25 секунд и поддержание температуры в пределах  $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ .

## ПИД-регулятор

Настройка ПИД регулятора проведена путём последовательного подбора каждого из коэффициентов.

Температурная зависимость ПИД-регулятор при  $t_{\text{уставки}} = 35^{\circ}\text{C}$  приведена на рисунке 12:

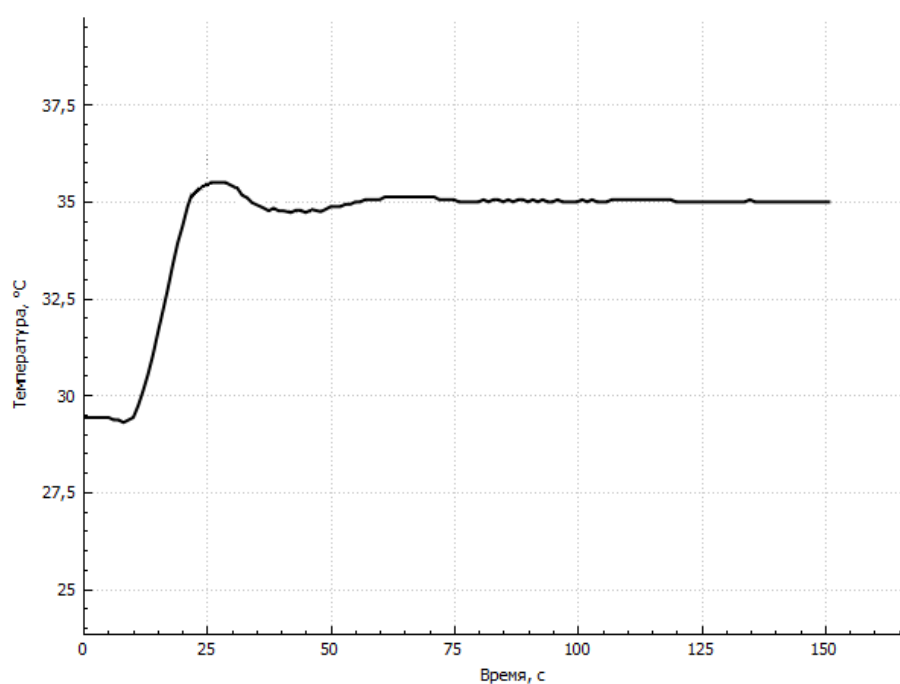


Рисунок 12 – ПИД-регулирование

ПИД-регулятор осуществил нагрев до температуры уставки за 15 секунд и поддержание в пределах  $\pm 0.06$  °C, то есть с максимально возможным разрешением DS18B20.

### **Вывод**

В результате исследования двух типов регуляторов выявлены их достоинства и недостатки, которые представлены в таблицах 3 и 4.

Таблица 3 - Достоинства релейного и ПИД-регуляторов

Релейный регулятор	ПИД-регулятор
Простота конструкции	Высокая точность поддержания температуры
Простота программной реализации	Быстрый выход на температуру уставки

Таблица 3 - Недостатки релейного и ПИД-регуляторов

Релейный регулятор	ПИД-регулятор
Низкая точность поддержания температуры	Сложность настройки
Долгий выход на температуру уставки	Чувствительность к изменениям в системе, вследствие чего необходимость перенастройки при изменениях в системе



## **Заключение**

В результате исследований были выявлены достоинства и недостатки основных способов, используемых в термостатах для поддержания температуры. Релейное регулирование может использоваться для решения простых, не требующих большой точности поддержания температуры, и малозатратных задач. ПИД-регулирование является более сложным способом и требует настройки перед использованием, но обеспечивает высокую точность поддержания и минимизацию статистических ошибок.

Результатами работы являются:

- Сравнение различных датчиков температуры;
- исследование и сравнение двух способов регулирования: релейного и ПИД;
- реализация алгоритмов нагрева за время и ступенчатого нагрева;
- приложение для взаимодействия с термостатом.

### **Литература**

1. Варма Т.Л., Бхатнагар Р. Устройство управления электронного цифрового термостата и электронное устройство многопозиционного регулирования температуры//Патент № 98118143.1998 Рос. Федерация: МПК7 G 05 D 23/00.

2. Поляков К.Ю. Основы теории автоматического управления: учеб. пособие. — СПб.: Изд-во СПбГУ, 2012. — 234 с.

## Приложение А

Таблица 1 – Команды

Команда	Код	Команда	Код
Включить/выключить термостат	0x10	Установка коэффициентов релейного регулятора	0x40
Запись температуры уставки	0x25	Установка коэффициентов ПИД-регулятор	0x41
Выбор алгоритма регулирования	0x26	Запись графика в память	0x43
Установка максимального тока в течение промежутка времени	0x31	Отображение данных на дисплее	0x44
Выбор датчиков температуры	0x32		

Таблица 2 – Структура команд

Стартовый байт	Команда	Количество передаваемых данных	Данные	Проверочный байт
0xAB	0x10	1 байт	0x00 – выключить 0x01 – включить	0x09
0xAB	0x25	1 байт	От 0 до 255	0x09
0xAB	0x26	1 или 3 байта	1 байт принимает значение: 0x00 – свободное управление 0x01 – релейное регулирование 0x02 – ПИД-регулирование 0x03 – ступенчатый нагрев 0x04 – нагрев за время	0x09

			2 байт принимает значение температуры уставки 3 байт принимает значение шага в °C или время нагрева	
0xAB	0x31	1 байт	От 0 до 60	0x09
0xAB	0x32	4 байта	1 байт – датчик, относительно которого идёт регулирование: 0x01 – DS18B20, 0x02 – NTC, 0x03 – АНТ20, 2 – 4 байты – принимают значение 0x00 или 0x01 в зависимости от того, включен ли соответствующий датчик в качестве дополнительного в приложении	0x09
0xAB	0x40	20 байт	5 коэффициентов в формате float	0x09
0xAB	0x41	6 байт	3 коэффициента в формате uint_16t: $K_p, K_I, K_D$	0x09
0xAB	0x43	960 байт	Запись значений пикселей в память микроконтроллера	0x09
0xAB	0x44	1 байт	0x01 – отображать температуру 0x02 – отображать график	0x09

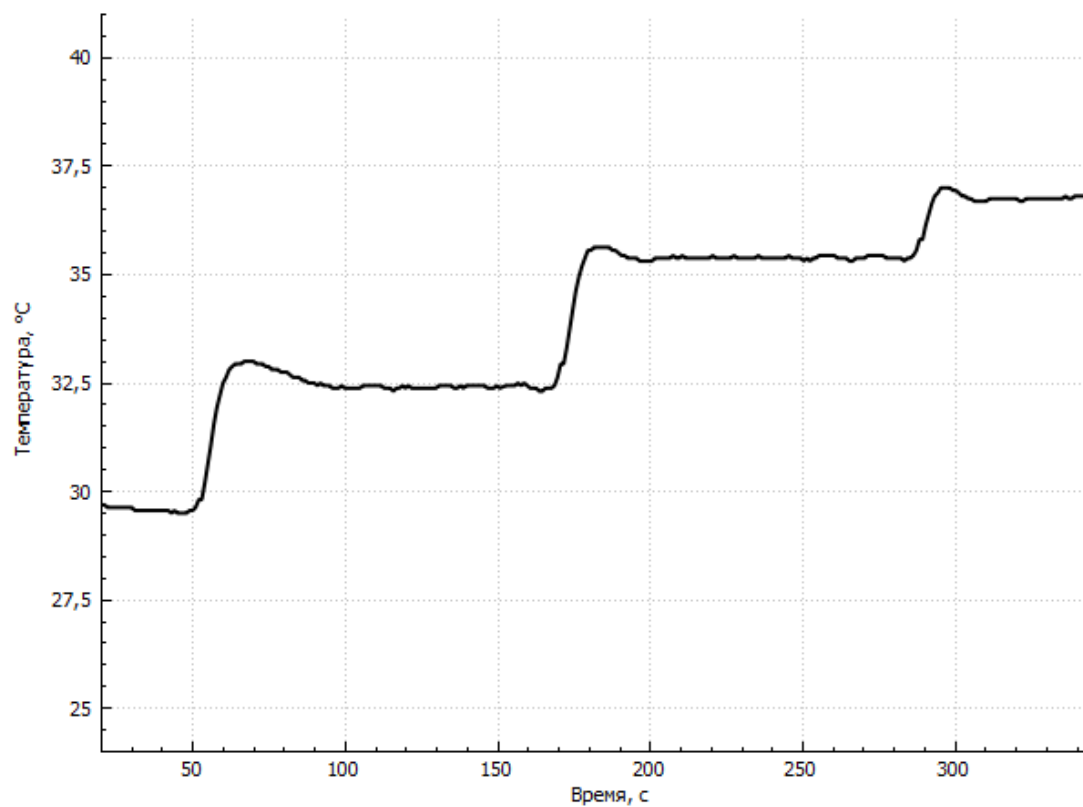


Рисунок 1 – Ступенчатый нагрев

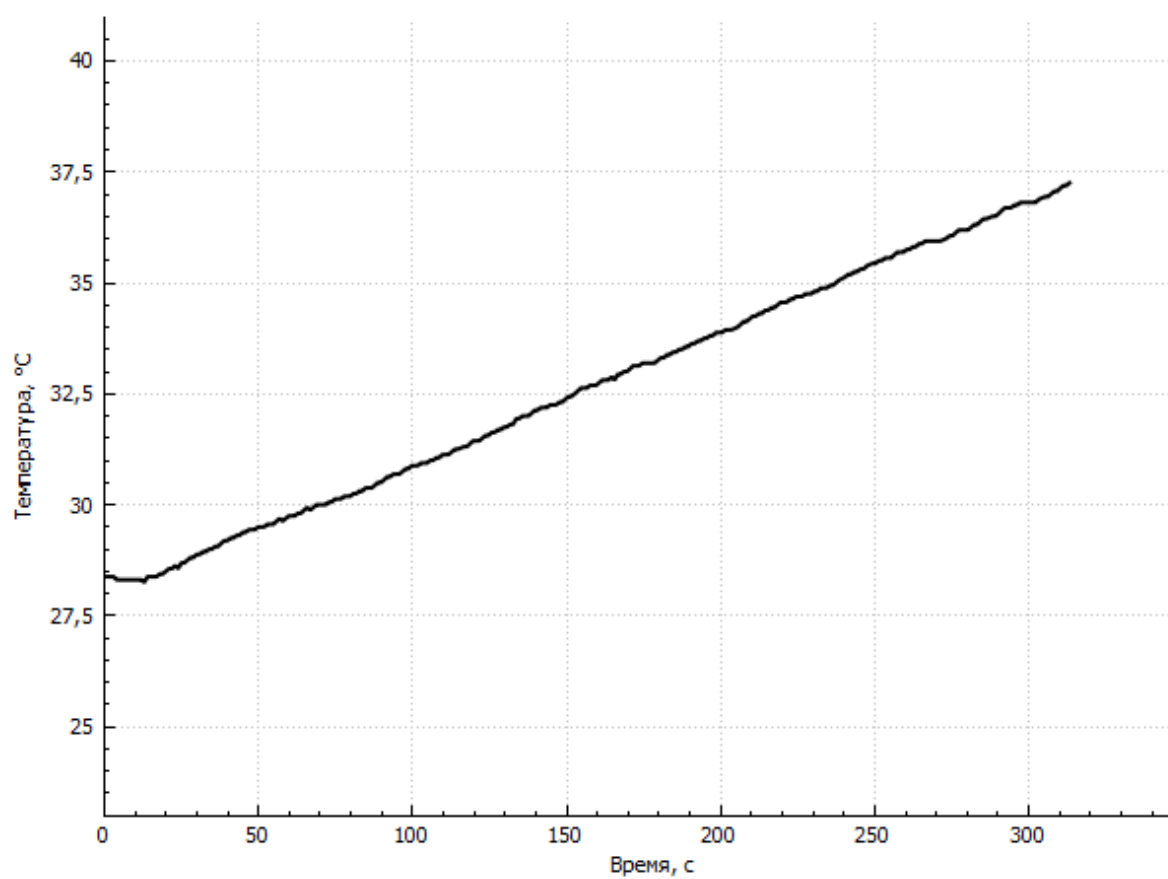


Рисунок 2 – Нагрев за время