

**Федеральное агентство по рыболовству  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«КЕРЧЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ МОРСКОЙ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

**ОТЧЕТ  
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ**

**Разработка ПИД-регулятора для восстановления  
сопротивления изоляции обмоток электродвигателя**

Руководитель темы

\_\_\_\_\_ В.А. Кучеренко

Керчь, 2025

## Реферат

Отчет 43 с., 13 рис., 3 табл., 34 источников.

**Ключевые слова:** дисперсные среды, устройство очистки, магнитное поле, эксперимент, магнитный отстойник, магнитный фильтр, магнитный гидроциклон.

**Аннотация.** В данной работе рассматривается процесс разработки пропорционально-интегрально-дифференциального (ПИД) регулятора, предназначенного для автоматического восстановления сопротивления изоляции обмоток электродвигателя. Изоляция обмоток является критически важным элементом в обеспечении надежности и долговечности работы электродвигателей. Неправильный уровень сопротивления изоляции может привести к снижению эффективности работы двигателя и его преждевременному выходу из строя. Работа включает теоретический анализ, моделирование и экспериментальную проверку предложенной системы управления.

**Целью данной работы** является создание эффективного ПИД-регулятора, который обеспечивает автоматическое поддержание оптимального уровня сопротивления изоляции обмоток электродвигателя, что в свою очередь способствует повышению надежности и безопасности его эксплуатации.

**Объектом исследования** являются обмотки электродвигателя, а именно процессы, влияющие на состояние изоляции и уровни сопротивления в этих обмотках.

**Предметом исследования** является система управления, основанная на ПИД-регуляторе, применяемая для мониторинга и восстановления сопротивления изоляции обмоток электродвигателя, а также методы и алгоритмы, используемые для реализации такого управления.

## Содержание

ВВЕДЕНИЕ.....	8
РАЗДЕЛ 1 ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ.....	9
1.1 Качество и параметры электрической изоляции .....	9
1.2 Общие сведения о сушке двигателей внешними нагревательными устройствами .....	10
РАЗДЕЛ 2 РАЗРАБОТКА УСТАНОВКИ .....	17
2.1 Разработка структурной схемы установки.....	17
2.2 Разработка устройства регулирования мощности нагрузки и принцип его работы .....	18
2.3 Выбор элементной базы .....	19
2.4 Расчет нагревательного элемента.....	25
2.5 Выбор автоматического выключателя.....	27
2.6 Разработка принципиальной схемы и схемы соединений установки ...	28
2.7 Разработка алгоритма работы установки .....	30
Выводы по разделу .....	32
РАЗДЕЛ 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ РАБОТЫ ПИД-РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ СУШКИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ .....	34
3.1 Общие сведения .....	34
3.2 Описание экспериментальной установки.....	35
3.3 Методика эксперимента .....	35
3.4 Результаты эксперимента.....	36
Выводы по разделу .....	38
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	39
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....	40

## ВВЕДЕНИЕ

Надежность работы электрической машины, прежде всего, зависит от состояния изоляции ее обмоток. При неудовлетворительном состоянии изоляции обмоток, характеризующимся резким снижением ее электрической прочности, ни одна электрическая машина работать не будет. При включении в работу электрической машины с низкой электрической прочностью изоляции может произойти пробой и машина выйдет из строя.

Электрическая прочность изоляции - способность материала сохранять свои свойства при испытании его напряжением и численно выражается значением напряжения, при котором материал разрушается и теряет изоляционные свойства. Испытания электрической прочности обычно проводятся на заводах-изготовителях.

Снижение электрической прочности изоляции, при отсутствии механических повреждений и если она не пересохла от недопустимых перегрузок током, чаще всего происходит из-за ее увлажнения. Увлажнение изоляции может произойти: при транспортировке или длительном небрежном хранении электрической машины на открытом воздухе от воздействия на нее атмосферных осадков; от попадания влаги и грязи во время монтажа и эксплуатации: при длительном пребывании в сырых помещениях.

Профилактические мероприятия по поддержанию и повышению сопротивления изоляции можно разделить на следующие: 1) сушка машины; 2) продувка и протирка; 3) промывка; 4) пропитка.

## РАЗДЕЛ 1 ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

### 1.1 Качество и параметры электрической изоляции

Сопротивление изоляции между токоведущими частями и корпусом является одним из основных показателей технического состояния судового электрооборудования.

Параметры, характеризующие качество электрической изоляции: 1) сопротивлением изоляции; 2) коэффициентом абсорбции; 3) электрической прочностью.

Измерение сопротивления изоляции производят с помощью мегомметров, выпускаемых в зависимости от значения выходного напряжения (от 100 до 2500 В) и наибольшего значения измеряемого сопротивления. Сопротивление изоляции значительно зависит от температуры, следовательно, сравнивая с нормой результаты ее измерения, следует вносить поправки (см. таблицу 1. 1).

Таблица 1.1 – Зависимость сопротивления изоляции от температуры.

Температура обмотки, °С	110-114	115-119	120-124	125-129	130
Сопротивление изоляции,% от нормы	100	80	60	40	30

Сопротивление изоляции обмоток электрических машин снижается приблизительно в 2 раза на каждые 20 электрических градусов повышения температуры сверх номинального значения.

Качество изоляции характеризуется также отношением значений сопротивления изоляции при различной длительности приложения напряжения. Для этого измеряют сопротивление изоляции мегаомметром спустя 15 и 60 с от момента приложения напряжения при одной и той же частоте вращения рукоятки и определяют отношение показаний мегаомметра

$$\frac{R_{60}}{R_{15}} = K,$$

где  $K$ - коэффициент абсорбции.

Значения  $K$  всегда больше 1 и увеличиваются по мере высыхания изоляции; при сухой изоляции они могут достичь значений 2-3. При  $K=1,25$  изоляцию необходимо сушить. Значение коэффициента  $K$  зависит и от температуры обмотки - для просушенной обмотки  $K$  уменьшается с повышением температуры. Для определения  $K$  можно использовать специальные приборы, например прибор контроля влажности ПКВ-7, с помощью которого по соотношению емкости изоляции при частотах 2 и 50 Гц судят о состоянии изоляции обмотки.

## **1.2 Общие сведения о сушке двигателей внешними нагревательными устройствами**

В процессе эксплуатации двигателей происходит снижение сопротивление изоляции обмоток двигателей . Для повышения сопротивления изоляции требуется провести техническое обслуживание. Один из способов повышения сопротивления изоляции - нагрев обмоток двигателя внешними нагревательными устройствами [].

Методом внешнего нагрева можно сушить все электрические машины. Для сильно отсыревших машин постоянного тока этот метод является единственно возможным, а для электродвигателей переменного тока наиболее целесообразным .

Сушка внешним нагревом осуществляется воздуходувками и другими нагревательными устройствами, такими как: печи сопротивления, лампы накаливания или инфракрасного излучения, и применяется как самостоятельный метод или в качестве дополнительного при комбинированной сушке.

Воздуходувка состоит из вентилятора и камеры или патрубка с электронагревателем. Воздух, засасываемый вентилятором, направляется в камеру с нагревателем и, соприкасаясь с раскаленным электронагревателем, интенсивно подогревается до высокой температуры.

Воздуходувки выпускаются различных размеров и мощностей. Нагревательные элементы в них изготавливаются из зигзагообразных чугунных элементов или в виде спиралей из нихрома, фехраля.

Для сушки электрических машин нужно иметь одну или несколько воздуходувок с электронагревателями мощностью до 30 кВт. Воздуходувку возможно изготовить в цеху либо на судне.

Спирали при помощи фарфоровых роликов закрепляются на каркасе из полосовой стали  $4 \times 30$  мм, который вставляется в кожух из листовой стали толщиной 1 мм (рисунок 1.1). Во избежание провисание спиралей и появления короткого замыкания каждая спираль должна крепиться к каркасу не менее чем на 9 – 13 роликах.

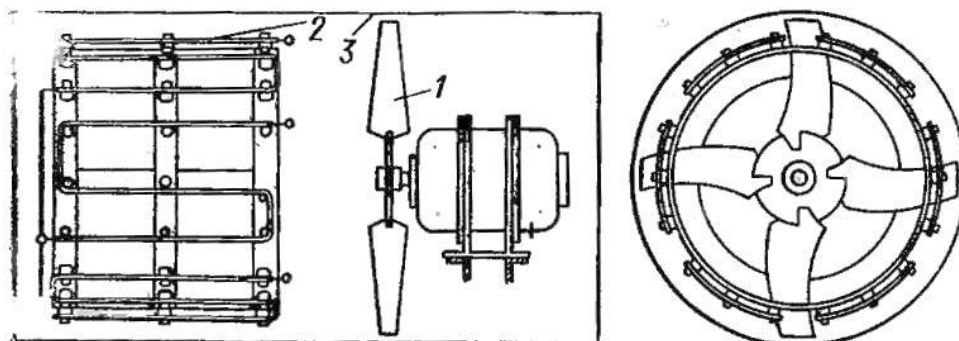


Рисунок 1.1 – Общий вид воздуходувки

1 – вентилятор; 2 – нагревательный элемент; 3 – кожух

При сушке воздуходувкой термометры устанавливаются (рисунок 1.2) на выходе горячего воздуха из воздуходувки (который обычно подается в нижнюю часть тепляка), на лобовых частях обмоток, ближайших к воздуходувке, и на активной стали статора. Температура горячего воздуха, обмотки и активной стали не должна превышать 90 °С. В случае невозможности устройства тепляка для крупных машин, а также при сушке мелких и средних электромашин ограничиваются укрытием электрической машины брезентом. Для удобного контроля за температурой сушки термометры выводят через брезент наружу [31].

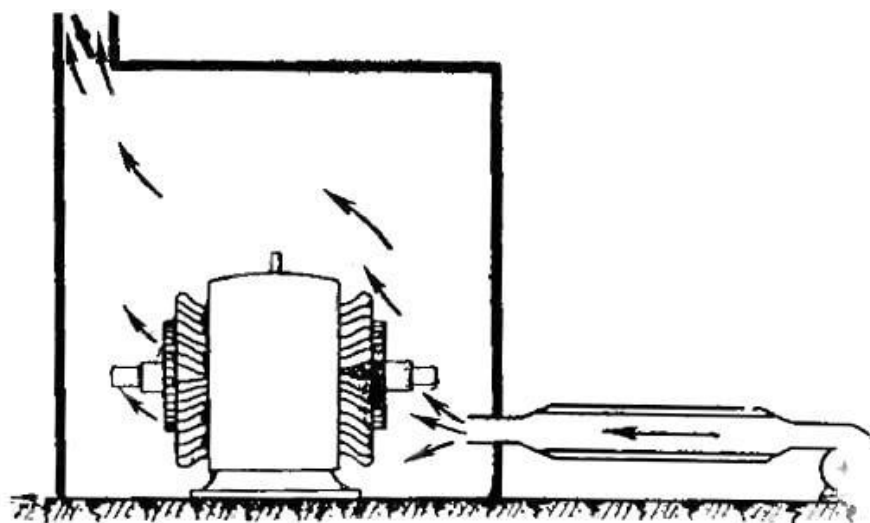


Рисунок 1.2 – Сушка воздуходувкой

Электрические машины открытого исполнения при сушке воздуходувкой могут полностью не разбираться. Жалюзийные решетки в корпусе машины, если они есть, на время сушки целесообразно снять [31].

В электрических машинах закрытого исполнения необходимо снять торцевые крышки с обеих сторон, так как при закрытых крышках высушить машину будет невозможно. Схема электрическая принципиальная соединения воздуходувки приведена на рисунке 1.3.



Для наиболее равномерной сушки обмоток поток горячего воздуха направляется на наиболее массивные металлические части машины, от нагрева которых нагревается обмотка.

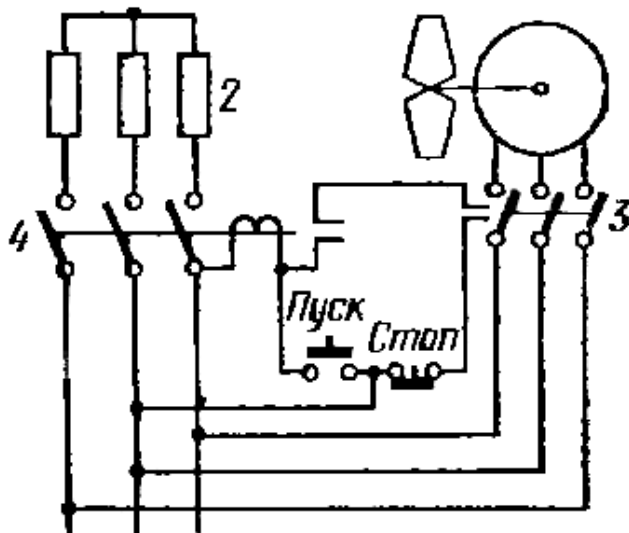


Рисунок 1.3- Схема электрическая принципиальная соединения воздуходувки

Направление горячего воздуха непосредственно на обмотку не рекомендуется, так как это может привести к неравномерным нагревам обмотки. Если температура воздуха при выходе из воздуходувки  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$  и ниже, то горячий воздух целесообразно подавать в корпус машины непосредственно на активную сталь статора через проемы, предназначенные для выброса нагретого воздуха.

В некоторых случаях для создания нужной для сушки температуры воздуходувку приходится укрывать брезентом вместе с электрической машиной. В этом случае необходимо принять меры к тому, чтобы брезент нигде непосредственно не касался воздуходувки, так как при повреждении вентилятора корпус воздуходувки может нагреться до опасной температуры и брезент при касании может загореться.

Температуру сушки регулируют путем увеличения или уменьшения

отверстия в тепляке или в брезенте, предназначенного для вытяжки влажного воздуха [31].

Если воздуходувка отсутствует, то электрические машины небольшой и средней мощности (до 100 кВт) могут быть высушены при помощи электроламп (рисунок 1.4).

Машина для сушки разбирается (вынимается ротор). Внутри статора кладется металлический лист, на который с двух сторон помещаются патроны с двумя лампами накаливания. Статор утепляется досчатым коробом, обитым внутри асбестом или брезентом. Ротор электродвигателей с фазным ротором и якорь машин постоянного тока необходимо уложить и закрепить на статоре. При совместной сушке статора и ротора время сушки удлинится примерно на 12 – 20 часов (из-за более длительного времени сушки ротора). Параметры ламп накаливания, в зависимости от мощности электродвигателя приведены в таблице 1.2.

Таблица 1.2- Параметры ламп накаливания для сушки электродвигателей разной мощности

Мощность электродвигателя, кВт	Мощность лампы, Вт	Количество ламп
До 28	300	2
До 75	500	2
До 100	1000	2

При наличии на производстве сушильных шкафов (рисунок 1.5) для разных технологических целей, в том числе камер с инфракрасными лампами, их можно использовать для сушки электромашин. В этом случае электрическую машину помещают в сушильный шкаф или камеру, включают нагревательные элементы печи или инфракрасные лампы и сушат, контролируя температуру.

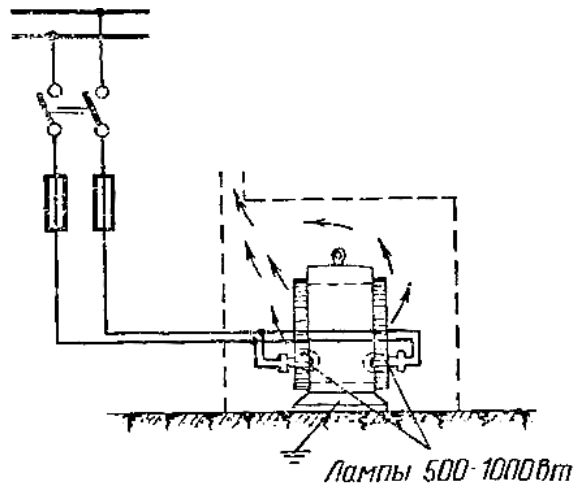


Рисунок 1.4 – Сушка электролампой

При этом открытые электрические машины можно не разбирать, а в закрытых машинах необходимо обязательно снимать торцевые крышки. Температура в сушильных шкафах должна поддерживаться в пределах 90 – 100 °С.



Рисунок 1.5 – Внешний вид сушильного шкафа

Для данных способов сушки изоляции требуется поддержание температуры нагрева, и довольно длительная сушка - 12 – 20 часов [31].

## **Выводы по разделу**

В данном разделе проведен анализ способов сушки двигателей внешними нагревательными устройствами, было выявлено, что при данном методе сушки требуется точное поддержание температуры нагрева при длительном процессе. На этом основании поставлена цель разработать автоматическую установку для сушки электродвигателей внешними нагревательными устройствами.

## **РАЗДЕЛ 2 РАЗРАБОТКА УСТАНОВКИ**

### **2.1 Разработка структурной схемы установки**

Установка состоит из камеры горячего воздуха и системы управления, в которую входит плата с микроконтроллером, датчик температуры, панель управления, устройство регулирования мощности и сигнализация.

В камере горячего воздуха установлен датчик температуры, с которого информация о температуре поступает на микроконтроллер. Далее текущее значение температуры выводится на дисплей, которое значение сравнивается в микроконтроллере с заданным значением температуры и микроконтроллер подает сигнал на устройство регулирования мощности.

Устройство регулирования мощности в зависимости от текущей температуры производит плавное регулирование мощности нагревательного элемента.

Так же к микроконтроллеру подключена панель управления и сигнализация. Панель управления служит для управления параметрами установки, такими как: задание поддерживаемой температуры, задание минимальной мощности нагрузки, задание гистерезиса (значение разности температур, при котором срабатывает устройство регулирования мощности).

Сигнализация служит для оповещения персонала, если температура превысила заданные пределы и не уменьшается.

Структурная схема автоматической установки для сушки электродвигателей внешними нагревательными устройствами приведена в Приложении А.

## **2.2 Разработка устройства регулирования мощности нагрузки и принцип его работы**

С целью соблюдения условий сушки двигателей внешними нагревательными устройствами необходимо разработать устройство для поддержания температуры нагрева, основанное на микроконтроллере.

Диммер- электронное устройство, предназначенное для регулирования электрической мощности нагрузки, включается последовательно с нагрузкой.

Простейший пример диммера- переменный резистор, но такой регулятор сильно нагревается и имеет низкий КПД.

Так же в роли диммера может выступать автотрансформатор. Он в сравнении с симисторными и тиристорными диммерами имеет большие габариты, вес, для управления требует приложения больших механических усилий, но регулировка происходит с меньшими помехами.

Наиболее экономичными и компактными являются электронные диммеры, где в качестве силового элемента используются полупроводниковые элементы- симистор и тиристор.

Для плавного регулирования напряжения на нагревательном элементе был разработан сетевой диммер на основе 2-х оптопар (оптопара детектора нуля и оптопара симистора) и самого симистора. Принципиальная схема диммера приведена на рисунке 2.1.

Классическую широтно-импульсную модуляцию (ШИМ) использовать в данном случае невозможно, т.к. ключ через который регулируется сигнал (симистор) будет открываться и пропускать в нагрузку участки синусоиды, имеющие разную мощность. В данном случае плавное регулирование осуществить не возможно, сигнал на выходе будет беспорядоченный (Приложение А).

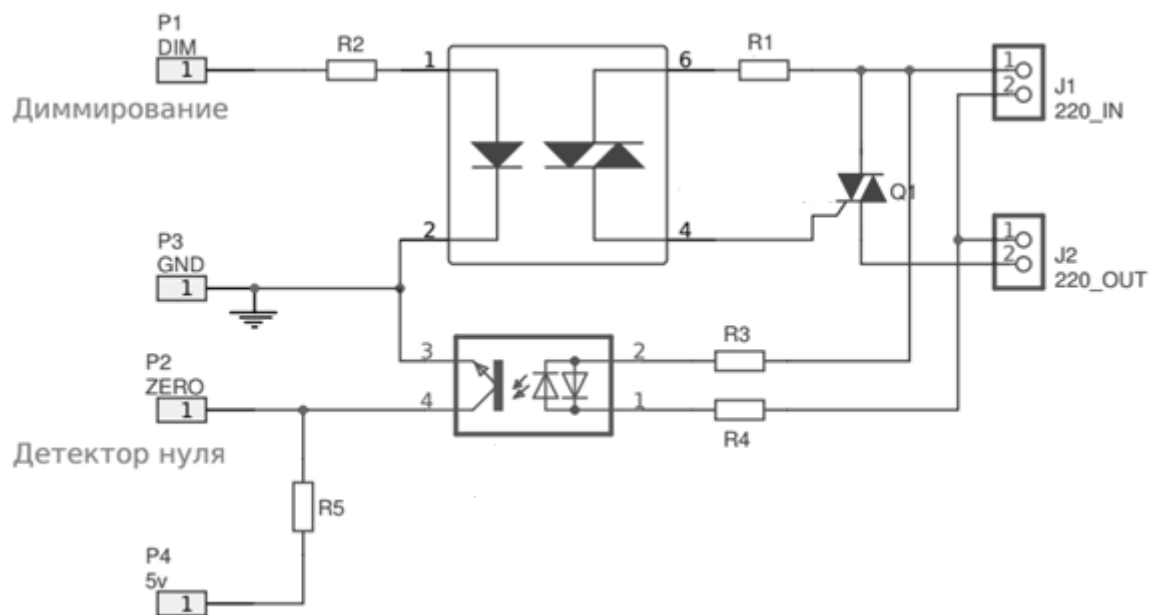


Рис. 2.1- Схема электрическая принципиальная диммера

Для того чтобы избежать беспорядочного сигнала на выходе, надо знать, когда подать управляющий сигнал на симистор, то есть привязать управляющий сигнал к управляемому. Для этого достаточно знать, когда сигнал проходит через ноль. Для этих целей необходимо использовать детектор нуля, который открывает симистор в нужный момент времени. Изменяя время, которое управляющий ключ находится в открытом состоянии, возможно плавно изменять отдаваемую мощность [1].

Момент прохождения сетевого напряжения через 0, можно определять с помощью оптопары детектора нуля. Таким образом на выходе детектора нуля получаем короткие положительные импульсы в момент когда напряжение в сети проходит через 0.

### 2.3 Выбор элементной базы

Для создания установки для сушки электродвигателей внешними нагревательными устройствами необходимо выбрать следующие компоненты:

- плату с микроконтроллером;

- датчик температуры;
- оптопару детектора нуля;
- оптопара симистора;
- резисторы - 7 штук;
- пьезоизлучатель;
- симистор;
- кнопки- 4 штуки;
- жидкокристаллический дисплей;

### 2.3.1 Выбор платы с микроконтроллером

Выбор производится по следующим параметрам: низкая стоимость, достаточное количество выводов, быстрота обработки данных, простота в наладке и эксплуатации.

В качестве платы с микроконтроллером был выбран Arduino Uno построенный на ATmega328. Платформа имеет 14 цифровых вход/выходов (6 из которых могут использоваться как выходы ШИМ), 6 аналоговых входов, кварцевый генератор 16 МГц, разъем USB, силовой разъем, разъем ICSP и кнопку пере загрузки. Для работы необходимо подключить платформу к компьютеру посредством кабеля USB, либо подать питание при помощи адаптера AC/DC или батареи. Внешний вид Arduino Uno приведен на рисунке 2.2.

Выводы питания:

1. VIN- вход используется для подачи напряжения от внешнего источника (не связано с 5 В от разъема USB или другого регулируемого источника питания);
2. 5V- регулируемый источник напряжения, используемый для питания микроконтроллера и компонентов на плате. Питание может подаваться от вывода VIN через регулятор напряжения, или от разъема USB, или другого регулируемого источника напряжения 5 В;
3. 3V3- напряжение на выводе 3.3 В от стабилизатора платы. Максимальный ток вывода 50 мА;



4. GND- выводы заземления;
5. AREF- устанавливает опорное напряжение для аналоговых входов.

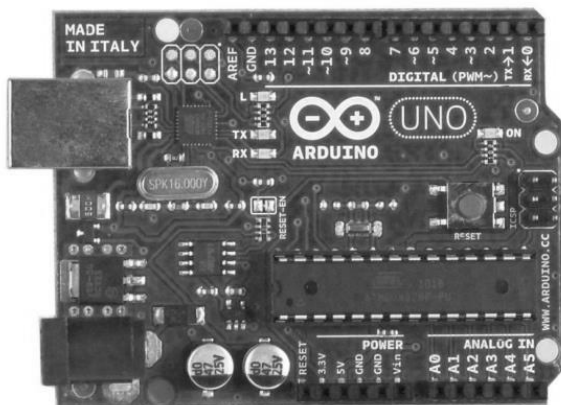


Рисунок 2.2 – Плата Arduino Uno

### 2.3.2 Выбор датчика температуры

Основным параметром для выбора датчика температуры является диапазон рабочих температур, точность и способ монтажа. Исходя из условий работы установки выбираем датчик температуры DS18B20. Диапазон измерения от минус 55 °С до плюс 125 °С, осуществляет передачу данных в виде цифрового сигнала с двенадцати битным разрешением по протоколу 1-Wire. Использование данного протокола даст возможность подключить несколько датчиков используя один цифровой вход.

Датчик имеет герметичное покрытие, что позволит применять его в данных условиях сушки электродвигателей (появление конденсата).

Внешний вид датчика температуры изображен на рисунке 2.3.



Рисунок 2.3 – Датчик температуры DS18B20

### 2.3.3 Выбор оптопары детектора нуля

Выбор оптопары производят по значениям коммутируемого тока и обратного напряжения. В качестве оптопары детектора нуля была выбрана оптопара PC814 от фирмы Sharp, предназначена для применения в цепях переменного тока. В данной оптопаре применяется 2 светодиода, а не один, это сделано для реагирования на прохождение тока в обеих направлениях. Параметры оптопары приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1- Технические параметры оптопары PC814

Параметр	Величина	Единица измерения
Диапазон рабочих температур	-55 до +100	°C
Непрерывный прямой ток	50	мА
Напряжение коллектор- эмиттер	35	В
Напряжение эмиттер- коллектор	6	В
Непрерывный ток коллектора	50	мА
Время включения/выключения	4	мкс

### 2.3.4 Выбор оптопары симистора

Выбираем оптопару МОС3023. Она является тиристорной оптопарой, состоит из инфракрасного диода и двунаправленного переключателя, работающего как симистор. Предназначена для обеспечения связи между компонентами электронного управления и силовыми симисторами. Параметры оптопары приведены в таблице 2.2.

Применение:

- управление соленоидом / клапаном;
- статический переключатель питания переменного тока;
- ламповые балласты;
- твердотельные реле;
- интерфейсные микропроцессоры для периферийных устройств 115 В переменного тока;
- диммеры.

Таблица 2.2- Технические параметры оптопары МОС3023

Параметр	Величина	Единица измерения
Диапазон рабочих температур	-40 до +100	°С
Обратное напряжение	3	В
Прямой ток- непрерывный	60	мА
Ток управления	5	мА
Максимальная рассеиваемая мощность	0,3	Вт
Напряжение пробоя изоляции	7500	В

### 2.3.5 Выбор симистора

Выбор симистора производят по значениям прямого тока и обратного напряжения. Выбираем симистор ВТ139-600Е. Симистор служит для

коммутации цепей переменного тока, является управляемым выключателем. Он имеет три электрода (выводы)- один управляющий и два силовых. Также симистор обладает двунаправленной проводимостью. Параметры симистора приведены в таблице 2.3.

Области применения: управление двигателем, промышленное и бытовое освещение, отопление, статическая коммутация.

Таблица 2.3- Технические параметры симистора BT139-600

Параметр	Величина	Единица измерения
Диапазон рабочих температур	От -40 до +120	°C
Повторяющееся импульсное напряжение в закрытом состоянии	600	В
Максимальное среднеквадратическое значение (RMS) тока в открытом состоянии	16	А
Максимальный однократный импульсный ток (20mS)	140	А
Отпирающий ток управления	0,1	А
Отпирающее управляющее напряжение	1,5	В
Время включения	2	мкс

### 2.3.6 Выбор пьезоизлучателя

Выбор пьезоизлучателя выбирают по уровню напряжения. Выбираем пьезоизлучатель SFM-20В. Служит для оповещения при превышении

температуры выше заданных пределов. Рабочее напряжение- 3-24В, частота- 3900 Гц, уровень звукового давления- 95 дБ.

### 2.3.7 Выбор жидкокристаллического дисплея

Выбираю жидкокристаллический дисплей LCD 1602. Служит для вывода данных о температуре, мощности нагрузки и гистерезиса.

Данный дисплей имеет 16 цифровых выводов, подключение к Arduino Uno напрямую невозможно, так как недостаточно входов, поэтому для его подключения используют шину I2C.

### 2.3.8 Выбор кнопок

Применяются в панели управления для изменения параметров установки. Для этой цели используют кнопки нефиксирующегося типа (кнопка возвращается в исходное состояние после снятия приложенного усилия).

### 2.3.9 Выбор резисторов

Для подключения датчика температуры к микроконтроллеру требуется подтягивающий резистор номиналом 4,7 кОм. Он необходим для удержания входа в состоянии логической единицы.

Для подключения кнопок к микроконтроллеру требуется стягивающий резистор номиналом 10 кОм. Необходим для обеспечения отсутствия напряжения на входе, при разомкнутом контакте.

Для ограничения тока в устройстве регулирования мощности применяются резисторы номиналом 51 кОм -2 штуки, 10 кОм, 1 кОм, 220 Ом.

## 2.4 Расчет нагревательного элемента

### 2.4.1 Расчет мощности нагревательного элемента сушильного шкафа

Мощность, необходимую для поддержания температуры равной 90 °С внутри шкафа площадью 1 м<sup>2</sup>, с температурой окружающей среды равной 20 °С рассчитываю по следующей формуле:

$$P = (t_1 - t_2) \cdot k \cdot S,$$

где  $t_1$  - температура нагрева, °С;

$t_2$  - температура окружающей среды, °С;

$k$ - коэффициент теплопроводности материала (для стали  $k = 5,5$ );

$S$ - площадь обогреваемого пространства, м<sup>2</sup>.

$$P = (90-20) \cdot 5,5 \cdot 1 = 385 \text{ Вт.}$$

#### 2.4.2 Расчет диаметра и длины проводника

Работу, совершаемую током, проходящим через участок цепи рассчитываю по формуле:

$$A = U \cdot I \cdot t,$$

где  $U$ - напряжение сети, В;

$I$ - сила тока, А;

$t$ - время работы нагревательного элемента, с.

$$I = \frac{P}{U};$$

$$I = \frac{385}{220} = 1,75 \text{ А.}$$

При  $t = 12$  часов:

$$A = 220 \cdot 1,75 \cdot 12 \cdot 3600 = 16,63 \text{ МДж.}$$

Сопротивления проводника рассчитываю по формуле:

$$R = \frac{U}{I};$$

$$R = \frac{220}{1,75} = 125,71 \text{ Ом.}$$

Таблица 2.4- Данные проволоки

Допустимая сила тока, А								
	1	2	3	4	5	6	7	

Диаметр нихромовой проволоки при температуре 700° С, мм	0,17	0,3	0,45	0,55	0,65	0,75	0,85
Площадь поперечного сечения проволоки, мм <sup>2</sup>	0,0227	0,0707	0,159	0,238	0,332	0,442	0,57

По допустимой силе тока выбираю диаметр нихромовой проволоки (таблица 2.4):  $d = 0,3 \text{ мм}$ .

Длину проволоки рассчитываю по формуле:

$$l = \frac{S \cdot R}{\rho},$$

где  $S$ - площадь поперечного сечения проволоки, мм<sup>2</sup>;

$\rho$ - удельное сопротивление проволоки (для нихрома  $\rho = 1,1$ , для фехраля  $\rho = 1,3$ ), Ом-мм<sup>2</sup>/м.

$$l = \frac{0,0707 \cdot 125,71}{1,1} = 8,079 \text{ м.}$$

## 2.5 Выбор автоматического выключателя

Автоматический выключатель- коммутационный электрический аппарат, предназначенный для автоматической защиты электрических цепей от коротких замыканий, токов перегрузки и т.д.

Выбор автоматического выключателя производят по роду тока, току нагрузки и напряжению сети.

Данные для выбора автоматического выключателя: род тока- переменный, напряжение 220 В, мощность нагрузки - 385 Вт, ток нагрузки-1,75 А.

Перечисленным выше параметрам соответствует автоматический выключатель фирмы IEK модели 1п С/ 2А ВА 47-29. Данный автоматический выключатель имеет следующие характеристики: номинальный ток- 2 А, номинальное напряжение- 220 В, номинальная отключающая способность- 4500 А, количество фаз-1.

## **2.6 Разработка принципиальной схемы и схемы соединений установки**

Через резистор *R1* кнопки *SB1*, *SB2*, *SB3*, *SB4* подключены к земле (*GND*) микроконтроллера *DD1* и к *5V*. Также кнопка *SB1* подключена к пину *D4*, *SB2* подключена к пину *D5*, *SB3* подключена к пину *D6*, *SB4* подключена к пину *D7*.

Датчик температуры *RT* через резистор *R2* подключен к выводу *5V* микроконтроллера, также подключен к пину *D2* и *GND*.

Жидкокристаллический дисплей *HG* подключен к микроконтроллеру через шину *DD2*, с целью уменьшения использованных пинов. Вывод шины *SDA* подключен к выводу *A5* микроконтроллера. Вывод *SCL* подключен к пину *A4*, *VCC* подключен к *5V*, *GND* подключен к *GND1*.

Диммер подключен к пинам *D10*, *D3*, *5V* и *GND*. Пьезоизлучатель *BA* подключен к выходу *GND2* и *D11*.

Через клеммы 1 и 2 клеммной коробки к диммеру подключена сеть переменного тока 220 В, нагрузка подключена через клеммы 3 и 4.

Принципиальная схема приведена на рисунке 2.4.



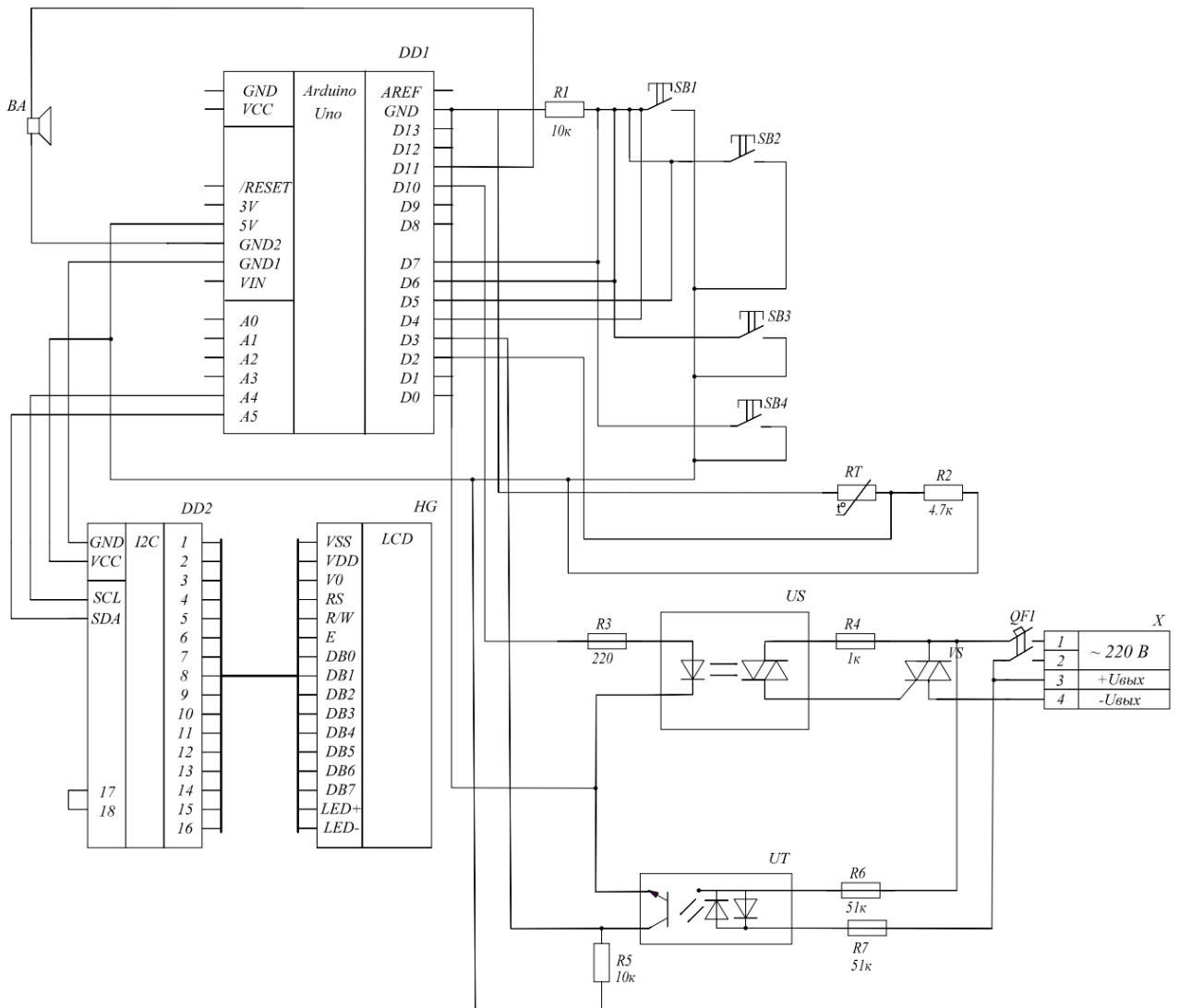


Рисунок 2.4 - Принципиальная схема ПИД-регулятора для сушки электродвигателя

По принципиальной схеме составлены схема соединений и перечень элементов. Схема соединений приведена на рисунке 2.5.

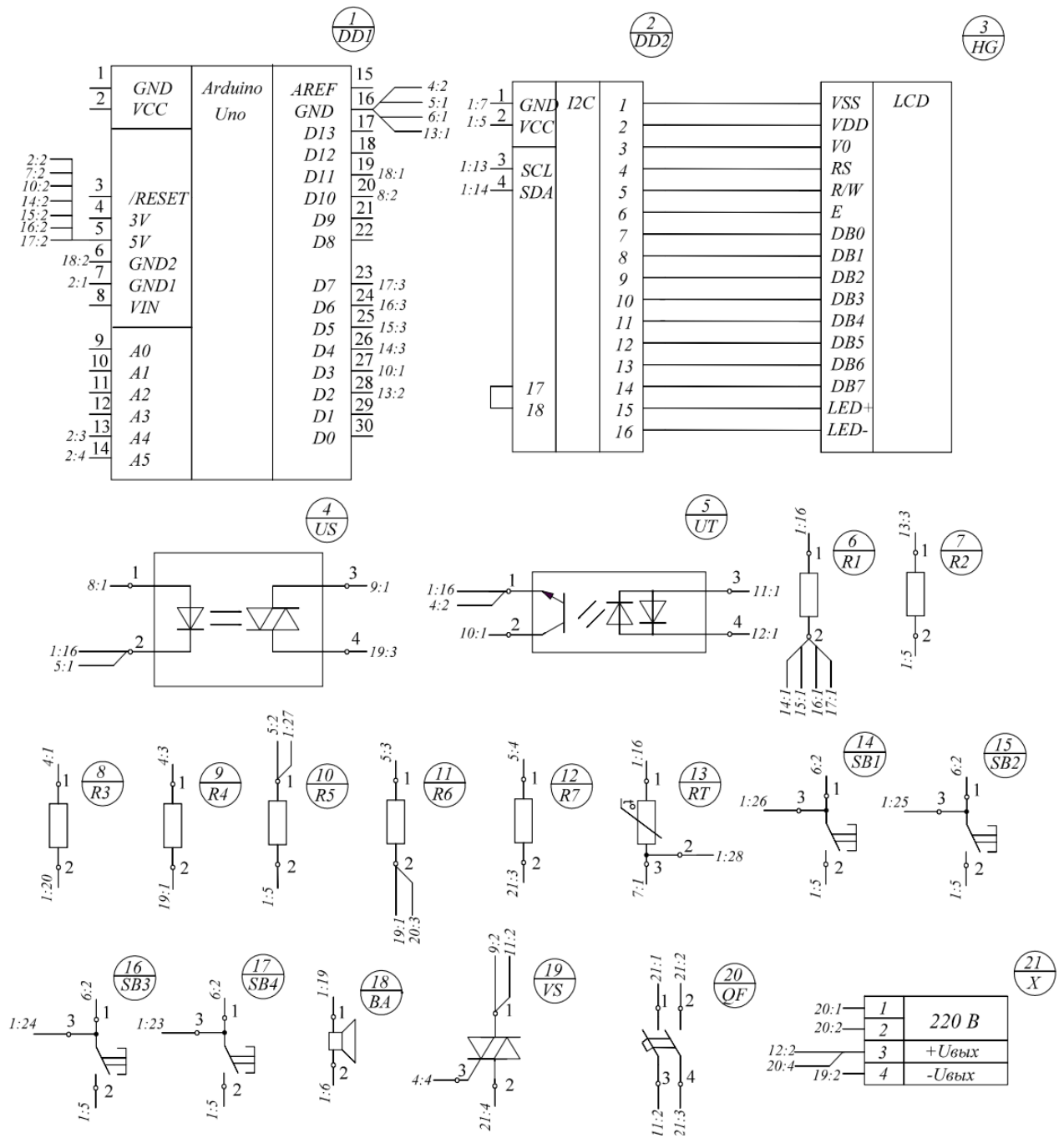


Рисунок 2.5 – Схема соединений

## 2.7 Разработка алгоритма работы установки

Алгоритм работы установки изображен на рисунке 2,6.

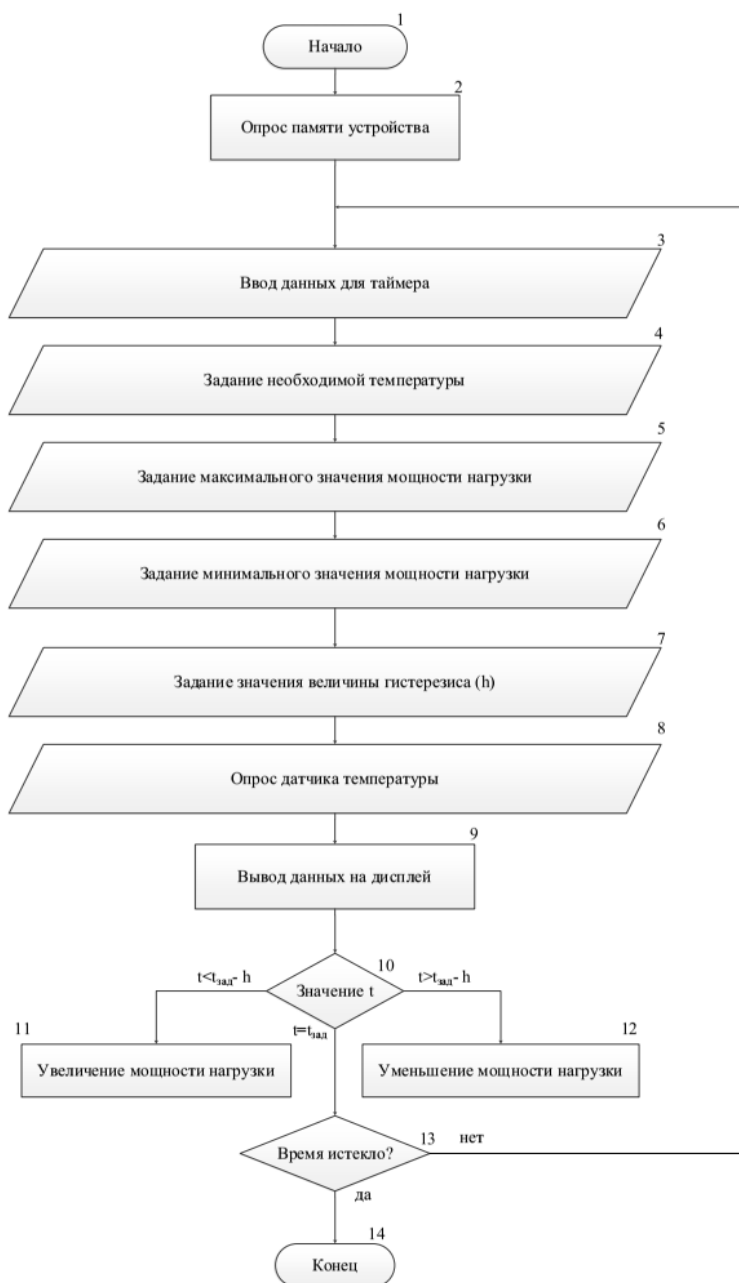


Рисунок 2.6 – Алгоритм работы

Блок 1: включение микроконтроллера, подключение библиотек.

Блок 2: Проверка всех компонентов ОЗУ, ПЗУ и т.д.

Блок 3: установка времени работы установки.

Блок 4: установка необходимой температуры нагрева и вывод его значения на дисплей.

Блок 5: установка максимального значения мощности нагрузки и вывод его на дисплей.

Блок 6: установка значения мощности нагрузки до которого оно снизится при достижении заданной температуры нагрева.

Блок 7: установка значения величины гистерезиса и вывод его на дисплей.

Блок 8, 9: микроконтроллер опрашивает датчик температуры и выводит данные о температуре на дисплей.

Блок 10: если действующее значение температуры меньше разницы заданного значения температуры и значения гистерезиса, то происходит увеличение мощности нагрузки (блок 11), если действующее значение температуры больше разницы заданного значения температуры и значения гистерезиса, то происходит уменьшение мощности нагрузки (блок 12).

Блок 13: если действующее значение температуры равно заданному, но не истекло заданное время работы установки, то установка продолжает работать, если время истекло, то установка выключается (блок 14).

Блок 13: если действующее значение температуры равно заданному, но не истекло заданное время работы установки, то установка продолжает работать, если время истекло, то установка выключается (блок 14).

На основании разработанного алгоритма был написан программный код в среде программирования Arduino IDE для прошивки микроконтроллера. Данная программа служит для разработки программного обеспечения, использует язык программирования C++. Код приведен в Приложении Е.

### **Выводы по разделу**

В данном разделе разработана структурная схема, принципиальная схема, схема соединений, алгоритм работы установки для сушки двигателей внешними нагревательными устройствами, разработано устройство регулирования мощности нагрузки, приведен принцип его работы. По принципиальной схеме были составлены перечень элементов и схема соединений. Выбраны элементы для установки, произведен расчет

нагревательного элемента, а именно мощность, длина, диаметр. По разработанному алгоритму был написан программный код.

## РАЗДЕЛ 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ РАБОТЫ ПИД-РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ СУШКИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

### 3.1 Общие сведения

Первостепенная цель нашего эксперимента — разработать и протестировать ПИД-регулятор, который будет эффективно восстанавливать сопротивление изоляции обмоток электродвигателя. В рамках этой цели были сформулированы следующие задачи:

1. Изучение теории и принципов работы ПИД-регуляторов.
2. Выбор показателей, по которым будет оцениваться эффективность работы регулятора.
3. Разработка схемы экспериментальной установки.
4. Проведение экспериментов и сбор данных.
5. Анализ полученных данных и выводы о работе регулятора.

Перед тем как перейти к практической части, необходимо рассмотреть теорию ПИД-регулирования. ПИД-регулятор состоит из трех компонентов: пропорционального (P), интегрального (I) и дифференциального (D). Каждый из этих компонентов влияет на выходной сигнал регулятора, а значит, на процесс восстановления сопротивления изоляции.

Пропорциональный компонент отвечает за текущее отклонение от заданного значения, интегральный — за накопленное отклонение во времени, а дифференциальный — за скорость изменения ошибки. Для оптимальной

работы регулятора необходимо правильно настроить коэффициенты этих компонентов, что потребует проведения предварительных испытаний.

### **3.2 Описание экспериментальной установки**

Экспериментальная установка была разработана с целью имитации условий работы электродвигателя с поврежденной изоляцией. Установка состоит из следующих элементов:

Электродвигатель: стандартный асинхронный двигатель с известными характеристиками.

Система измерения сопротивления изоляции: мультиметр, позволяющий отслеживать изменения сопротивления изоляции во времени.

ПИД-регулятор: программируемая логическая контроллер или специализированный микроконтроллер, реализующий алгоритм ПИД-регулирования.

Компьютер: для сбора и обработки данных, а также для визуализации работы регулятора.

Схема установки включает в себя подключение всех вышеперечисленных компонентов, а также систему обратной связи, которая позволяет регулятору реагировать на изменения сопротивления изоляции.

### **3.3 Методика эксперимента**

Процесс эксперимента можно разбить на несколько этапов:

1. Подготовительный этап:
2. Калибровка измерительных приборов.
3. Настройка ПИД-регулятора и выбор начальных значений коэффициентов (КР, КI, КD).
4. Запуск базового теста для определения начального сопротивления изоляции обмоток.
5. Проведение эксперимента:
6. Сбор данных о сопротивлении в течение времени, а также соответствующих значениях выходного сигнала регулятора.
7. Анализ результатов:

### **3.4 Результаты эксперимента.**

Результат изменения сопротивления изоляции путем нагрева электродвигателя приведены на рисунке 3.1 и 3.2.



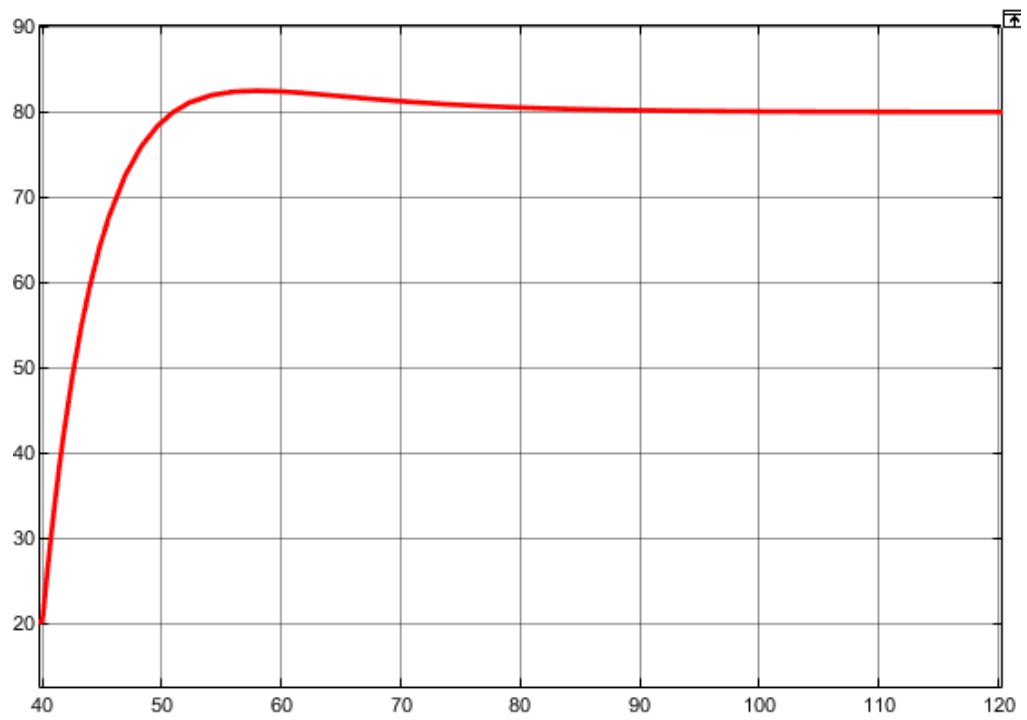


Рисунок 3.1 - Зависимость температуры электродвигателя от времени (в мин)

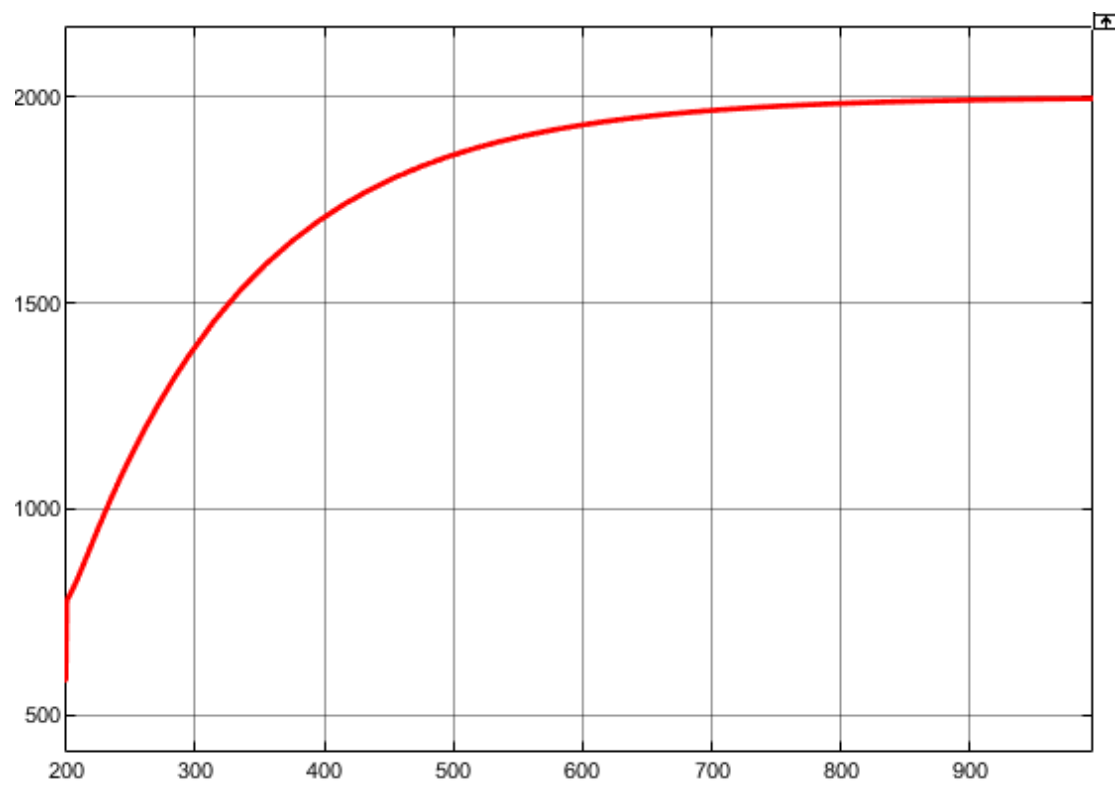


Рисунок 3.2 - Зависимость сопротивления изоляции от времени

Таким образом можно констатировать, что сопротивление изоляции вернулось в норму.

### **Выводы по разделу**

Произведен эксперимент, который показал, что сопротивление изоляции вернулось в норму. Разработанный регулятор имеет высокие показатели качества и может быть применён в промышленности для обслуживания устройств.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В данной выпускной работе проведен анализ способов сушки двигателей внешними нагревательными устройствами, было выявлено, что при данном методе сушки требуется точное поддержание температуры нагрева при длительном процессе. На этом основании была разработана автоматическая установка для сушки электродвигателей внешними нагревательными устройствами, при применении которой процесс сушки может происходить без присутствия обслуживающего персонала, более точное поддержание температуры.

Также была разработана структурная, принципиальная схема, схема соединений установки. Разработан алгоритм работы установки, по которому был написан программный код и прошит микроконтроллер.

Произведен эксперимент, который показал, что сопротивление изоляции вернулось в норму. Разработанный регулятор имеет высокие показатели качества и может быть применён в промышленности для обслуживания устройств.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Бекишев Р. Ф. Общий курс электропривода. Томский политехнический университет. – 2-е изд. / Р. Ф. Бекишев, Ю. Н. Дементьев. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – 302 с.
2. Васильев В. Н. Эксплуатация судового электропривода / В. Н. Васильев, Н. Я. Карауш. – М. : Транспорт, 1985. – 279 с.
3. Википедия. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org>. – (Дата обращения: 5.06.2018).
4. Вынгра А. В. Использование программно–аппаратного моделирования при проектировании системы управления судовой холодильной установкой / А. В. Вынгра, Б. А. Авдеев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. – 2017. – №4(44). – С. 806–813.
5. Инструкция по охране труда при использовании электронагревательных приборов [Электронный ресурс] – Режим доступа: [https://ohranatruda.ru/ot\\_biblio/instructions/html](https://ohranatruda.ru/ot_biblio/instructions/html) – (Дата обращения: 4.06.2018)
6. Козловская В. Б. Электрическое освещение / Техноперспектива / В. Б. Козловская, В. Н. Радкевич, В. Н. Сацукевич. – Минск, – 2007. – 211 с.
7. Колодяжный В. В., Титов В. В., Горбулев Ю. Н. Проектирование электрической части судовых электроэнергетических систем / В. В. Колодяжный, В. В. Титов, Ю. Н. Горбулев. Керчь: ФГБОУ ВО «КГМТУ», – 2000. – 118 с.
8. Крючков И. П. Расчет коротких замыканий и выбор электрооборудования / И. П. Крючков, Б. Н. Неклепаев, В. А. Старшинов / – Москва: Академия, 2008. – 416 с.
9. Кузнецов С.Е.. Филеев В.С. Основы технической эксплуатации судового электрооборудования и автоматики: Учебник. – СПб.: Судостроение, 1995. – 448 с.

10. Лейкин В. С., Михайлов В. А. Автоматизированные электроэнергетические системы промышленных судов. – М. : Агропромиздат, 1987. – 326 с.

11. Лесных А. С. Релейно-контакторные системы управления. Системы управления приводами постоянного тока : учеб. пособие / А. С. Лесных, М. Н. Романов ; М-во трансп. Рос. Федерации, ФГОУ ВПО "НГавт". – Новосибирск : НГавт, 2008. – 102 с.

12. Москаленко В. В. Электрический привод. Учебник / – М.: Академия, 2007. – 368 с.

13. Механизмы и Технологии / Разделы курсовых и дипломных работ / Выбор аппаратуры управления и защиты [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://mehanik-ua.ru> – (Дата обращения: 10.06.2018).

14. Полезная информация и литература для электриков [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.elektrik220v.ru/knigi.html> – (Дата обращения: 05.06.2018).

15. Правила классификации и постройки морских судов / Регистр России. – Л. : Транспорт, 2015 – 185 с.

16. Ревич Ю.И. - «Занимательная электроника» БХВ-Петербург, 2015. - 88 с.

17. Реле и автоматика [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.rele.ru> – (Дата обращения: 15.05.2018).

18. Руководство по ремонту электродвигателей ИЧО - 996 - 233.022 РС НПО "Югрыбтехцентр". - 1989. - 90 с.

19. Савенко А. Е. Судовые электроприводы, конспект лекций / А. Е. Савенко. – Керчь: ФГБОУ ВО КГМТУ, 2016. – 200 с.

20. Савенко А. Е. Судовые электроприводы, практикум по выполнению курсового проекта для курсантов / А. Е. Савенко. – Керчь: ФГБОУ ВО КГМТУ, 2016 – 81 с.

21. Соммер У. - «Программирование микроконтроллерных плат Arduino/Freeduino» БХВ-Петербург, 2012. - 100 с.

22. Судовые электроприводы: Справочник. – т. 2 /А. П. Богословский, Е. М. Певзнер, И. Р. Фрейдзон А. Г. Яуре. – Л. : Судостроение, 1993. – 352 с.
23. Суда флота рыбной промышленности: Справочник. – Л. : Транспорт, 1990. – 381с.
24. Терехов В. М. Система управления электроприводов. Учебник / М. : Академия, 2005. – 300 с.
25. Черничкин М. Ю. Большая энциклопедия электрика, – М. : ЭКСМО, 2011. – 271с.
26. Шабад М. А. Расчеты релейной защиты и автоматики распределительных систем / М. А. Шабад. – СПб : ПЭИПК, – 2003. – 337 с.
27. Электрические сети [Электронный ресурс]– Режим доступа: <http://leg.co.ua> – (Дата обращения 03.06.2018).
28. Электромеханика [Электронный ресурс]– Режим доступа: <https://www.electromechanics.ru/sitemap.html> – (Дата обращения 03.06.2018).
29. Яшков В. А. Наладка электрооборудования : Справочник / В.А. Яшков. – Астана : Фолиант, 2010. – 216 с.
30. Brian Scaddan The Dictionary of Electrical Installation Work, 2005. – 66 p.
31. N. H. Doerry and D. Clayton, “Shipboard Electrical Power Quality of Service,” Proc. IEEE ESTS, July 2005.
32. N. H. Doerry and J. V. Amy Jr., “Implementing Quality of Service in Shipboard Power System Design,” Proc. IEEE ESTS, 2011.
33. N. H. Doerry, “Designing Electrical Power Systems for Survivability and Quality of Service,” ASNE Naval Engineers Journal, vol. 119, no. 2, pp 25-34, 2007.
34. Peter Roberts, Mark Baker Electrical Installation Work: Level 2 / EAL Edition, 2010. – 155 p.