

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)

Электроника и робототехника

(направленность (профиль))

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА)

на тему Цифровой монитор шагового двигателя

Обучающийся

А.Ю. Чернов

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

канд. техн. наук, доцент А.В. Прядилов

(ученая степень (при наличии), ученое звание (при наличии), Инициалы Фамилия)

Тольятти 2024

Аннотация

Тема бакалаврской работы: Цифровой монитор шагового двигателя.

Объем бакалаврской работы 55 страниц, на которых размещены 24 рисунка и 11 таблиц, графическая часть состоит из 6 плакатов А1 и перечня элементов.

Ключевые слова: Шаговый двигатель, состояние обмоток, температура корпуса, пропуск шага, плата, микроконтроллер.

Цель работы - разработка электронной системы мониторинга состояния шагового двигателя, а именно контроль за состоянием его обмоток на наличие обрыва или короткого замыкания, контроль за температурой корпуса и контроль пропуска шага.

Данная работа состоит из трех частей:

1. Состояние вопроса. В этой части формируется цель и задачи проекта, а также анализируются исходные данные и известные решения.
2. Основной раздел. В проектом разделе происходит разработка электрической схемы, конструкции устройства и программной части устройства. Так же проводится выбор необходимых компонентов.
3. Конструкторский раздел. В котором приводится моделирование и построение печатной платы.

В ходе проделанной работы были изучены основные методики определения некоторых параметров шаговых двигателей для определения состояния его обмоток на наличие короткого замыкания или их обрыва, контроля за температурой корпуса и контроля пропуска шага.

Annotation

Topic of bachelor's work: Digital monitor of a stepper motor.

The volume of the bachelor's work is 55 pages, on which 24 figures and 11 tables are placed, the graphic part consists of 6 A1 posters and a list of elements.

Key words: Stepper motor, winding condition, case temperature, skipping a step, board, microcontroller.

The purpose of the work is to develop an electronic system for monitoring the condition of a stepper motor, namely monitoring the condition of its windings for the presence of a break or short circuit, monitoring the temperature of the housing and monitoring the skipping of a step.

This work consists of three parts:

1. State of the issue. In this part, the goal and objectives of the project are formed, as well as the initial data and known solutions are analyzed.

2. Main section. In the design section, the electrical circuit, device design and software part of the device are developed. The selection of necessary components and a brief description of the device.

3. Design section. Which provides modeling and construction of a printed circuit board.

In the course of the work done, the basic methods for determining some parameters of stepper motors were studied to determine the state of its windings for the presence of a short circuit or their breakage, monitoring the temperature of the housing and monitoring the skipping of a step.

Содержание

Введение	7
1 Состояние вопроса	10
1.1 Методы проверки состояния обмоток шагового двигателя.....	10
1.2 Методы контроля температуры корпуса шагового двигателя	13
1.3 Методы контроля пропуска шага шагового двигателя	16
1.4 Анализ технического задания	19
2 Основной раздел.....	22
2.1 Контроль состояния обмоток	22
2.2 Контроль температуры	26
2.3 Контроль пропуска шага	32
2.4 Выбор микроконтроллера	36
2.5 Выбор и подключение кварцевого резонатора.....	41
2.6 Схема принудительного сброса	43
2.7 Вывод результатов контролируемых параметров	45
2.8 Источник стабилизированного напряжения.....	47
3 Конструкторский раздел	49
3.1 Печатная плата.....	49
3.2 Маршрутная карта	52
Заключение	55
Список используемой литературы и используемых источников	56

Введение

Шаговые двигатели являются особым типом электродвигателей, которые используются во множестве приложений, требующих точного и контролируемого движения. Ниже приведены некоторые особенности шаговых двигателей:

1. Шаговые двигатели работают на основе принципа шагового движения, где вращение вала происходит постепенно и точно, шаг за шагом. Это достигается путем управления последовательным включением и выключением обмоток двигателя.

2. Шаговые двигатели имеют различные типы и размеры, такие как NEMA 17, NEMA 23 и NEMA 34. Эти обозначения указывают на стандартные размеры корпуса двигателя в дюймах. Например, NEMA 17 имеет размер корпуса 42x42 мм, NEMA 23 - 57x57 мм, а NEMA 34 - 86x86 мм.

3. Шаговые двигатели обладают высокой точностью позиционирования и могут быть использованы в различных приложениях, таких как 3D-принтеры, робототехника, автоматизированные системы и другие.

4. Управление шаговыми двигателями может осуществляться с использованием специальных драйверов и контроллеров, которые обеспечивают точное управление шагами и скоростью вращения. Популярными платформами для управления шаговыми двигателями являются Arduino и Raspberry Pi.

5. Шаговые двигатели могут иметь различные характеристики, такие как угол шага, момент удержания, скорость вращения и другие. Выбор конкретного типа шагового двигателя зависит от требований конкретного приложения.

Шаговые двигатели предоставляют уникальные возможности для точного позиционирования и контролируемого движения. Их широкое применение в различных областях делает их важным элементом в современной электротехнике и автоматизации.

Целью данной работы является разработка электронной системы мониторинга состояния шагового двигателя, а именно контроль за состоянием его обмоток на наличие обрыва или короткого замыкания, контроль за температурой корпуса и контроль пропуска шага.

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие задачи:

1. изучение основных сведений о методах проверки состояния обмоток, температуры корпуса и контроля пропуска шага шаговых двигателей;
2. разработка структурной и принципиальной электрической схем прототипа электронного устройства;
3. выбор элементной базы устройства;
4. разработка блок-схемы алгоритма работы управляющей программы цифровой части устройства;

Объектом исследования является прототип электронного устройства цифрового монитора шагового двигателя.

Предметом исследования являются характеристики разработанного прототипа электронного устройства, элементная база и схемотехнические решения, необходимые для его создания.

В работе используется математический пакет Mathcad, среда схемотехнического моделирования Multisim и среда разработки Easy EDA.

Результатом работы является разработанный прототип электронного устройства цифрового монитора шагового двигателя.

Контроль состояния обмоток, температуры корпуса и пропуска шага являются важными аспектами в области электротехники и автоматизации. Эти параметры играют ключевую роль в обеспечении безопасной и эффективной работы электрических устройств, таких как двигатели и шаговые двигатели.

Контроль состояния обмоток включает в себя внешний осмотр обмоток на наличие повреждений, таких как короткое замыкание или обрыв. Также проводится измерение сопротивления обмоток и использование изоляционных тестеров для проверки качества изоляции. Эти шаги позволяют обнаружить

потенциальные проблемы и предотвратить возможные короткое замыкание или обрыв обмоток.

Контроль температуры корпуса важен для предотвращения перегрева устройств. Использование термометров и термографических камер позволяет контролировать температуру корпуса и обнаруживать точки перегрева. Это помогает предотвратить повреждение обмоток и других компонентов устройства.

Контроль пропуска шага особенно важен для шаговых двигателей. Использование энкодеров и мониторинг движения позволяет обнаружить пропущенные шаги и проблемы с двигателем или его управлением. Это помогает обеспечить точное и надежное движение шагового двигателя.

Все эти контрольные меры являются неотъемлемой частью обслуживания и эксплуатации электрических устройств. Они помогают предотвратить возможные поломки, повреждения и обеспечить безопасность в работе электротехнического оборудования.

1 Состояние вопроса

1.1 Методы проверки состояния обмоток шагового двигателя

Существуют различные методы для проверки состояния обмоток шаговых двигателей, включая проверку на обрыв и короткое замыкание. Вот несколько возможных методов [4,9,12]:

1. Измерение сопротивления: Метод заключается в измерении сопротивления обмоток шагового двигателя с помощью мультиметра или другого измерительного прибора. Если сопротивление обмотки равно бесконечности (открытая цепь), это может указывать на обрыв. Если сопротивление обмотки близко к нулю (короткое замыкание), это может указывать на короткое замыкание.

Для проведения измерения сопротивления, обычно используется мультиметр или другой измерительный прибор, который позволяет измерять сопротивление. Для непосредственного измерения подключают измерительные щупы к концам обмотки шагового двигателя и считывают показания на мультиметре. Если показания сопротивления равны бесконечности или очень высокие, это может указывать на обрыв. Если показания сопротивления близки к нулю или очень низкие, это может указывать на короткое замыкание.

2. Использование датчиков тока: Метод заключается в использовании датчиков тока, которые могут измерять ток, проходящий через обмотки шагового двигателя. Если измеренный ток ниже ожидаемого значения или равен нулю, это может указывать на обрыв. Если измеренный ток выше ожидаемого значения, это может указывать на короткое замыкание.

3. Алгоритмы обнаружения ошибок: Некоторые драйверы шаговых двигателей имеют встроенные алгоритмы обнаружения ошибок, которые могут контролировать состояние обмоток. Эти алгоритмы могут анализировать изменения тока или напряжения в обмотках и сравнивать их с

ожидаемыми значениями. Если обнаруживается несоответствие, это может указывать на обрыв или короткое замыкание.

4. Визуальный осмотр: Визуальный осмотр обмоток шагового двигателя может помочь обнаружить явные признаки обрыва или короткого замыкания, такие как повреждения проводов или видимые замыкания.

В таблице 1 приведены сравнения методов проверки обмоток шаговых двигателей.

Таблица 1 – Сравнения методов проверки обмоток ШД

Метод	Преимущества	Недостатки
Измерение сопротивления	Простота и доступность: Измерение сопротивления с помощью мультиметра или другого измерительного прибора является относительно простым и доступным методом проверки состояния обмоток шаговых двигателей.	Ограниченная информация: Измерение сопротивления может указывать только на наличие обрыва или короткого замыкания, но не предоставляет дополнительной информации о причинах или местоположении этих проблем.
	Быстрота: Измерение сопротивления может быть выполнено достаточно быстро, что позволяет быстро определить наличие обрыва или короткого замыкания в обмотках.	Возможность ошибки: Измерение сопротивления может быть подвержено ошибкам, особенно если не соблюдаются правильные условия измерения, такие как отключение питания и правильное подключение измерительных щупов.
Использование датчиков тока	Более точная информация: Использование датчиков тока позволяет более точно определить наличие обрыва или короткого замыкания в обмотках шагового двигателя, так как измеряется фактический ток, проходящий через обмотки.	Дополнительное оборудование: Использование датчиков тока требует наличия специального оборудования, таких как датчики тока, что может быть дополнительной затратой.

Продолжение таблицы 1

Метод	Преимущества	Недостатки
	Быстрое обнаружение: Датчики тока могут быстро обнаружить неправильные значения тока, что позволяет оперативно определить проблемы с обмотками.	Сложность установки: Установка датчиков тока может потребовать дополнительных действий, таких как правильное подключение и настройка.
Встроенные алгоритмы	Удобство использования: Алгоритмы обнаружения ошибок встроены в некоторые драйверы шаговых двигателей, что делает их удобными в использовании. Нет необходимости в дополнительных измерительных приборах или проведении сложных процедур проверки.	Ограниченность информации: Алгоритмы обнаружения ошибок могут указывать только на наличие обрыва или короткого замыкания, но не предоставляют дополнительной информации о причинах или местоположении этих проблем.
	Быстрое обнаружение: Алгоритмы могут быстро анализировать изменения тока или напряжения в обмотках и сравнивать их с ожидаемыми значениями. Это позволяет оперативно обнаружить обрыв или короткое замыкание.	Зависимость от драйвера: Алгоритмы обнаружения ошибок доступны только в некоторых драйверах шаговых двигателей. Если драйвер не поддерживает такие алгоритмы, то необходимо использовать другие методы проверки состояния обмоток.
Визуальный осмотр	Простота и доступность: Визуальный осмотр обмоток шагового двигателя является относительно простым и доступным методом проверки состояния обмоток. Не требуется специального оборудования или измерительных приборов.	Ограниченность информации: Визуальный осмотр может указывать только на наличие явных признаков обрыва или короткого замыкания, но не предоставляет дополнительной информации о причинах или местоположении этих проблем.
	Обнаружение явных признаков: Визуальный осмотр позволяет обнаружить явные признаки обрыва или короткого замыкания, такие как повреждения проводов или видимые замыкания. Это может быть полезно для быстрого определения проблемы.	Ограниченность обнаружения скрытых проблем: Визуальный осмотр может не обнаружить скрытые проблемы, такие как микрообрывы или микрокороткое замыкание, которые могут быть невидимыми невооруженным глазом.

Таким образом, можно сделать следующие выводы, исходя из представленной таблицы 1:

1. Для проверки состояния обмоток шаговых двигателей на обрыв и короткое замыкание доступны несколько методов, включая измерение сопротивления, использование датчиков тока и визуальный осмотр.

2. Измерение сопротивления является простым и доступным методом, но может ограничиваться только определением наличия обрыва или короткого замыкания и не предоставлять подробной информации о причинах или местоположении проблемы.

3. Использование датчиков тока позволяет более точно обнаружить обрыв или короткое замыкание в обмотках и может быть полезным для более детального анализа состояния двигателя.

4. Визуальный осмотр может быть полезным для обнаружения явных признаков проблемы, таких как повреждения проводов или видимые замыкания, но может быть неэффективным для обнаружения скрытых проблем.

5. Комбинирование различных методов проверки, таких как измерение сопротивления, использование датчиков тока и визуальный осмотр, может обеспечить более полную оценку состояния обмоток шагового двигателя.

1.2 Методы контроля температуры корпуса шагового двигателя

Существуют различные методы контроля температуры корпуса шаговых двигателей [4,9,12]:

1. Использование термодатчиков: Термодатчики устанавливаются на корпусе шагового двигателя для непосредственного измерения температуры. Они позволяют контролировать и мониторить температуру в реальном времени. Термодатчики могут быть электронными или термисторами, которые изменяют свое сопротивление в зависимости от температуры. Измеренные данные могут быть использованы для принятия решений о необходимости охлаждения или регулирования работы двигателя.

2. Использование термостата: Термостаты могут быть установлены для автоматического регулирования температуры корпуса шагового двигателя. Они могут включать вентиляторы или другие устройства для охлаждения или нагрева корпуса в зависимости от заданных параметров. Термостаты могут быть настроены на определенный диапазон температур, и когда температура превышает или опускается ниже заданного значения, термостат активирует соответствующие устройства для поддержания оптимальной температуры.

3. Визуальный контроль: Визуальный осмотр корпуса шагового двигателя может помочь обнаружить явные признаки перегрева, такие как дым, плавящиеся или поврежденные компоненты. При визуальном контроле следует обратить внимание на любые необычные изменения внешнего вида двигателя, которые могут указывать на проблемы с температурой.

4. Использование программного обеспечения: Некоторые шаговые двигатели могут быть подключены к компьютеру или контроллеру, который позволяет мониторить и контролировать температуру через специальное программное обеспечение. Это позволяет оператору или системе автоматически отслеживать и регулировать температуру двигателя, а также получать уведомления о превышении заданных пределов.

Таким образом, на основании таблицы 2, можно сделать следующие выводы о методах контроля температуры корпуса шаговых двигателей:

1. Использование термодатчиков является наиболее точным методом контроля температуры, позволяющим непосредственно измерять и мониторить значения в реальном времени.

2. Использование термостата обеспечивает автоматическое регулирование температуры, что позволяет поддерживать оптимальные условия работы двигателя.

3. Визуальный контроль может быть полезным для обнаружения явных признаков проблем с температурой, но может быть неэффективным для обнаружения скрытых проблем.

4. Использование программного обеспечения позволяет мониторить и контролировать температуру с помощью компьютера или контроллера, что обеспечивает более гибкую и автоматизированную систему контроля.

Таблица 2 – Сравнение методов контроля температуры ШД

Метод	Преимущества	Недостатки
Использование термодатчиков	Позволяет непосредственно измерять температуру корпуса шагового двигателя в реальном времени.	Требуется установка термодатчиков на корпусе двигателя, что может быть сложным или невозможным в некоторых случаях.
	Обеспечивает точные данные о температуре, что позволяет принимать быстрые и точные решения по регулированию работы двигателя.	Может потребоваться дополнительное оборудование для считывания и обработки данных с термодатчиков.
Использование термостата	Позволяет автоматическое регулирование температуры корпуса шагового двигателя в заданных пределах.	Требуется настройка термостата для определения оптимальных параметров работы двигателя.
	Минимизирует риск перегрева или переохлаждения двигателя, что может повысить его надежность и продолжительность эксплуатации.	В случае отказа термостата или других устройств, контролирующих температуру, может возникнуть риск повреждения двигателя.
Визуальный осмотр	Позволяет быстро обнаружить явные признаки перегрева или других проблем с температурой.	Может быть неэффективным для обнаружения скрытых проблем с температурой.
	Не требует дополнительного оборудования или настроек для контроля температуры.	Не предоставляет количественных данных о температуре и не позволяет точно регулировать работу двигателя.
Использование программного обеспечения	Позволяет мониторить и контролировать температуру шагового двигателя с использованием компьютера или контроллера.	Требуется наличие специального программного обеспечения и настройки связи между двигателем и компьютером или контроллером.
	Предоставляет возможность получать уведомления о превышении заданных пределов температуры и принимать соответствующие меры.	В случае сбоя программного обеспечения или оборудования мониторинг и регулирование температуры может быть нарушено.

1.3 Методы контроля пропуска шага шагового двигателя

В настоящее время существует несколько методов контроля пропуска шага шаговых двигателей [24]:

1. Использование драйверов шаговых двигателей: драйверы шаговых двигателей, такие как Trinamic, предоставляют точное позиционирование и контроль двигателей. Они могут обеспечить надежную работу двигателя и предотвратить пропуск шагов. Драйверы часто имеют возможность микрошага, что позволяет двигателю выполнять более точные и плавные движения.

2. Использование энкодеров: энкодеры представляют собой устройства, которые предоставляют обратную связь о положении двигателя. Они могут быть установлены на оси двигателя и сообщать контроллеру точное положение в реальном времени. Если происходит пропуск шагов, контроллер может скорректировать положение двигателя, используя информацию от энкодера. Некоторые контроллеры шаговых двигателей, такие как AMIS-3xxxx от ON Semiconductors, имеют встроенную поддержку энкодеров.

3. Использование специализированных контроллеров: некоторые приложения требуют более сложного и точного управления шаговыми двигателями. В таких случаях можно использовать специализированные контроллеры, такие как Mach3. Эти контроллеры обеспечивают более гибкое программное управление шаговыми двигателями через порт LPT компьютера.

4. Использование шаговых двигателей с встроенными энкодерами: некоторые шаговые двигатели, например Mechaduino, имеют встроенные энкодеры, что позволяет контролировать положение двигателя и предотвращать пропуск шагов. Это предоставляет более надежное и точное позиционирование без необходимости использования отдельных энкодеров.

5. Использование алгоритмов и программного обеспечения: в некоторых случаях можно использовать алгоритмы и программное обеспечение для контроля шаговых двигателей. Например, можно использовать алгоритмы,

которые проверяют количество шагов и корректируют его при необходимости. Это может быть полезно, если, например, нет доступа к специализированным драйверам или контроллерам.

В таблице 3 приведены преимущества и недостатки, описанных выше методов контроля пропуска шага шаговых двигателей.

Таблица 3 – Сравнение методов контроля пропуска шага ШД

Метод	Преимущества	Недостатки
Использование драйверов шаговых двигателей	Обеспечивают точное позиционирование и контроль двигателей.	Возможны пропуски шагов при неправильной настройке или высоких скоростях.
	Могут поддерживать микрошаг, что позволяет более плавные и точные движения.	Не обеспечивают обратную связь о положении двигателя.
Использование энкодеров	Предоставляют обратную связь о положении двигателя.	Дополнительные компоненты и сложности в установке и настройке.
	Позволяют контролировать и корректировать положение двигателя в реальном времени.	Дополнительные затраты на энкодеры и контроллеры.
Использование специализированных контроллеров	Более гибкое программное управление шаговыми двигателями.	Более высокая стоимость по сравнению с обычными драйверами.
	Возможность интеграции с другими системами и программами.	Требуется дополнительные знания для настройки и использования.
Использование шаговых двигателей со встроенными энкодерами	Интеграция энкодера внутри двигателя облегчает установку и настройку.	Ограниченный выбор шаговых двигателей с встроенными энкодерами.
	Предоставляют обратную связь о положении двигателя без необходимости дополнительных компонентов.	Высокая стоимость по сравнению с обычными шаговыми двигателями.

Продолжение таблицы 3

Использование алгоритмов и программного обеспечения	Низкие затраты на дополнительное оборудование.	Требуется углубленное понимание алгоритмов и программирования.
	Гибкость и возможность настройки алгоритмов под конкретные требования.	Ограниченная функциональность по сравнению с специализированными драйверами или контроллерами.

Выводы:

1. Для контроля пропуска шага шаговых двигателей доступны различные методы, каждый из которых имеет свои преимущества и недостатки.
2. Использование драйверов шаговых двигателей является стандартным и широко распространенным методом. Они обеспечивают точное позиционирование и контроль двигателей, но могут пропускать шаги при неправильной настройке или высоких скоростях.
3. Использование энкодеров позволяет получить обратную связь о положении двигателя и скорректировать его при пропуске шагов. Это улучшает точность и надежность двигателя, но требует дополнительных компонентов и настроек.
4. Использование специализированных контроллеров предоставляет более гибкое программное управление шаговыми двигателями, но может быть более дорогостоящим вариантом.
5. Использование шаговых двигателей с встроенными энкодерами облегчает установку и настройку, но выбор таких двигателей может быть ограничен.
6. Использование алгоритмов и программного обеспечения является гибким и экономичным методом, но требует глубокого понимания алгоритмов и программирования.

1.4 Анализ технического задания

Согласно техническому заданию на ВКР, необходимо отслеживать параметры шагового двигателя, а именно: состояние его обмоток (обрыв или короткое замыкание), температуру корпуса шагового двигателя и пропуск шага (при заклинивании или превышение нагрузки). Результатом проверки должны быть логические сигналы, например, высокий уровень логического напряжения, по каждому из контролируемых параметров. Конкретный шаговый двигатель выбирается по электрической мощности в диапазоне от 10 до 1000 Вт.

В качестве конкретного шагового двигателя, удовлетворяющего исходным техническим требованиям, выбран шаговый двигатель FL86STH118-6004A-NEMA34 [25]. На рисунке 1 приведён внешний вид выбранного шагового двигателя.



Рисунок 1 – Внешний вид шагового двигателя FL86STH118-6004A

На рисунке 2 приведены геометрические размеры шагового двигателя FL86STH118-6004A, согласно технической документации производителя [25].

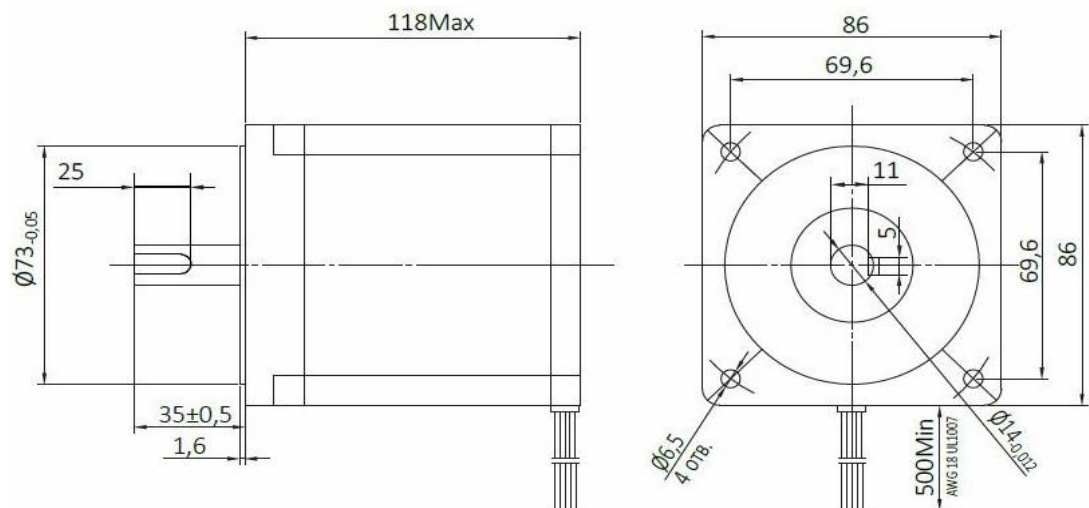


Рисунок 2 – Габариты шагового двигателя FL86STH118-6004A

В таблице 4 приведены основные технические параметры шагового двигателя FL86STH118-6004A, согласно технической документации производителя [25].

Таблица 4 – Технические параметры ШД FL86STH118-6004A

Параметр	Значение
Напряжение питания $U_{\text{п}}$, В	3,6
Ток обмотки $I_{\text{ф}}$, А	6
Сопротивление обмотки $R_{\text{ф}}$, Ом	$0,6 \pm 10\%$
Индуктивность обмотки $L_{\text{ф}}$, мГн	6,5
Момент инерции двигателя $J_{\text{дв}}$, г · см ²	3600
Крутящий момент, кг · см	87

Продолжение таблицы 4

Масса, кг	3,5
Угловой шаг, градус	$1,8 \pm 0,5$
Количество обмоток	2
Количество выводов	4
Рабочая температура, °C	-20 ... + 50
Максимальный нагрев двигателя, °C	+80

Для решения задачи контроля состояния обмоток шагового двигателя использован метод измерения сопротивления обмоток при помощи микроконтроллера, путём измерения с помощью встроенного аналого-цифрового преобразователя последовательного приближения самого микроконтроллера. Измерения данного параметра производится при выключенном шаговом двигателе. Для измерения температуры корпуса шагового двигателя применён контактный способ измерения температуры при помощи термистора в качестве датчика температуры. Измерение пропуска шага производится путём косвенного измерения превышения тока обмотки шагового двигателя. Вывод информации о контролируемых параметрах осуществляется на светодиоды.

2 Основной раздел

2.1 Контроль состояния обмоток

Как было указано в п. 1.4, контроль состояния обмоток шагового двигателя, а именно проверка на короткое замыкание и обрыв, осуществлён путём измерения сопротивления обмоток шагового двигателя. Измерение производится при отключении питания шагового двигателя. Для произведения измерения сопротивления его обмоток использован встроенный аналого-цифровой преобразователь последовательного приближения микроконтроллера. Для достижения данной цели с цифровых портов ввода/вывода выбранного микроконтроллера необходимо подать сигнал высокого уровня (логическую единицу) на делитель напряжения, представляющий собой последовательное соединение некоторого эталонного сопротивления и измеряемого сопротивления (текущего сопротивления обмотки шагового двигателя).

Кроме того, следует учесть внутреннее сопротивление цепи самого цифрового порта ввода/вывода, которое различно, в зависимости от схемы подключения. Например, для микроконтроллера ATmega8 внутреннее сопротивление цифрового порта ввода/вывода при подключении к положительной шине питания составляет 22 Ом, а при подключении к шине «земля» составляет 19 Ом, согласно технической документации производителя микроконтроллера [22].

На рисунке 3 представлена эквивалентная схема замещения для измерения сопротивления при помощи микроконтроллера.

Из схемы, представленной на рисунке 3, видно, что напряжение на выходе делителя равно:

$$U = \frac{R_x}{R_0 + R_x + R_{\text{внутр.МК}}} \cdot E,$$

где R_x – измеряемое сопротивление обмотки, Ом;

R_0 – эталонное сопротивление, Ом;

$R_{\text{внутр.МК}}$ – внутреннее сопротивление цифрового порта ввода/вывода микроконтроллера, Ом;

E – напряжение питания микроконтроллера, В.

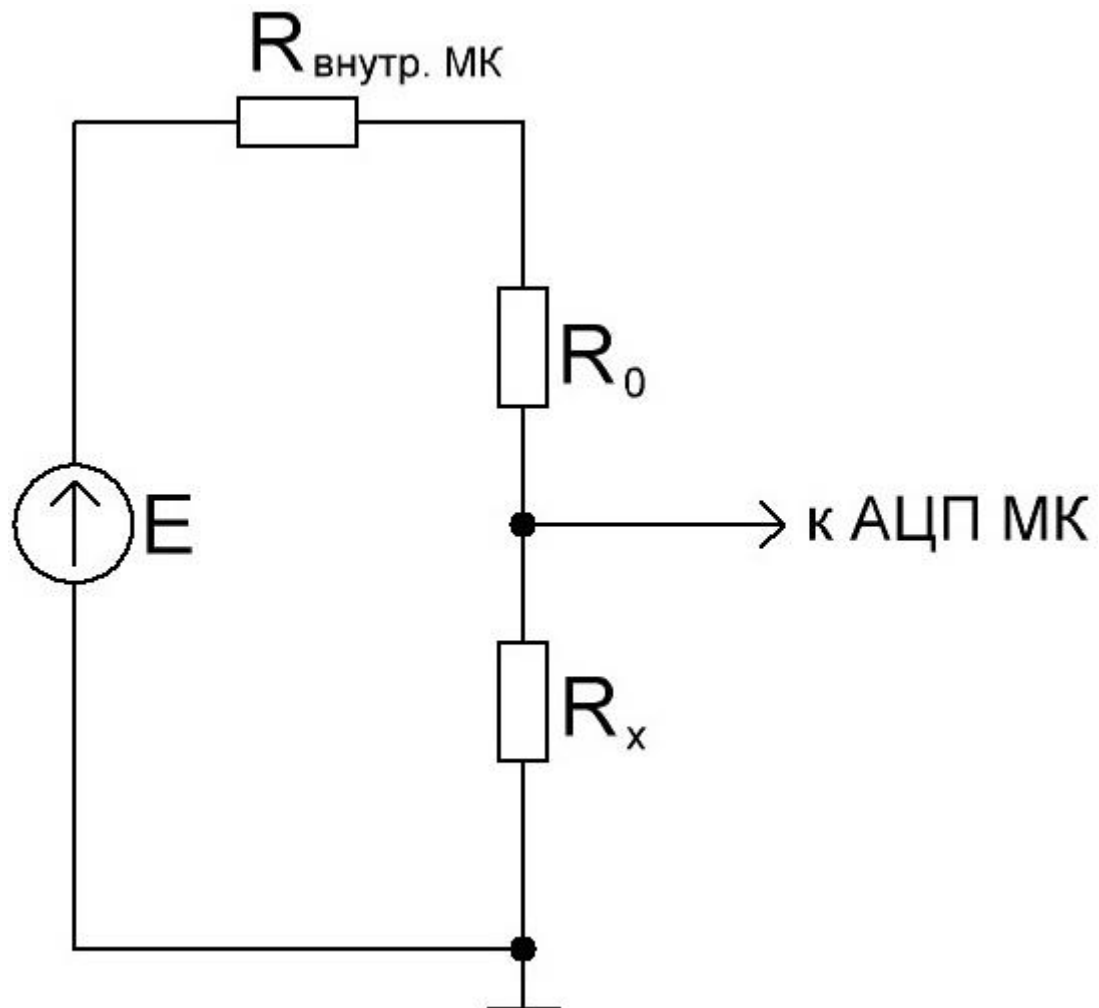


Рисунок 3 – Схема замещения для измерения сопротивления обмотки шагового двигателя с помощью АЦП микроконтроллера

Тогда,

$$R_x = \frac{(R_0 + R_{\text{внутр.МК}}) \cdot U}{E - U}.$$

Для более точного измерения сопротивления обмоток шагового двигателя использовано два канала аналого-цифрового преобразователя

микроконтроллера. На рисунке 4 представлена двухканальная схема измерения сопротивления обмоток шагового двигателя.

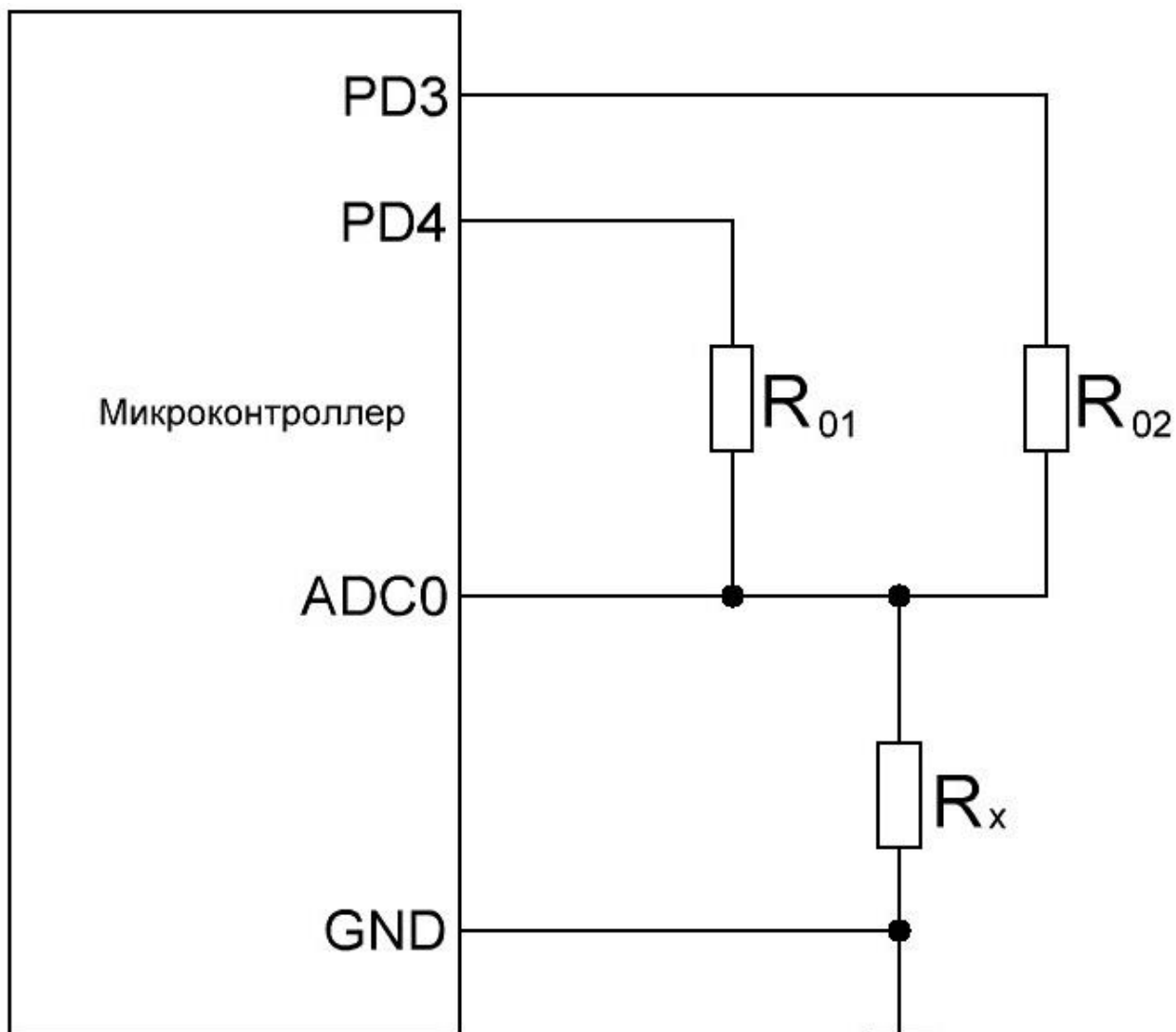


Рисунок 4 – Двухканальная схема измерения сопротивления обмоток шагового двигателя с помощью АЦП микроконтроллера

Для схемы, приведённой на рисунке 4, измерения происходят поочерёдно, т.е. сначала подаётся сигнал высокого уровня на вывод PD3 порта D микроконтроллера и происходит измерение напряжения на выходе делителя, затем подаётся сигнал высокого уровня на вывод PD4 порта D микроконтроллера и происходит измерение напряжения на выходе делителя. Далее измеренные значения сравниваются, и выбирается то значение, которое

ближе к значению середины диапазона АЦП (для 10-битного АЦП микроконтроллера это значение равно 512).

Значения сопротивлений для двух опытов рассчитываются по следующим формулам:

$$R_{x1} = \frac{Kod}{KodMax - Kod} \cdot (R_{01} + R_{\text{внутр.МК}});$$
$$R_{x2} = \frac{Kod}{KodMax - Kod} \cdot (R_{02} + R_{\text{внутр.МК}}),$$

где R_{x1} – вычисленное значение сопротивления обмотки шагового двигателя при первом опыте, Ом;

R_{x2} – вычисленное значение сопротивления обмотки шагового двигателя при втором опыте, Ом;

R_{01} – первое эталонное сопротивление, Ом;

R_{02} – второе эталонное сопротивление, Ом;

Kod – текущее измеренное значение напряжения на выходе делителя (код АЦП микроконтроллера, значение регистра ADC);

$KodMax$ – максимально возможное значение напряжения (равно 1023 в коде АЦП микроконтроллера, значение регистра ADC).

Значение регистра ADC микроконтроллера рассчитывается по формуле, приведённой в технической документации на микроконтроллер [22]:

$$Kod = 1024 \cdot \frac{U}{U_{\text{оп}}},$$

где U – измеренное значение напряжения на выходе делителя, В;

$U_{\text{оп}}$ – опорное напряжение АЦП микроконтроллера, В (выбрано равным +5 В).

В качестве первого эталонного сопротивления для измерений малых значений сопротивлений, выбран токовый шунт 75ШИП1-10-05 с номинальным значением сопротивления 7,5 мОм [26], внешний вид которого приведён на рисунке 5.



Рисунок 5 – Токовый шунт 75ШИП1-10-05

В таблице 5 приведены основные технические параметры данного токового шунта, согласно технической документации производителя [26].

Таблица 5 – Основные технические параметры шунта 75ШИП1-10-05

Параметры	Значение
Номинальный ток, А	10
Номинальное напряжение, мВ	75
Номинальное сопротивление, мОм	7.5
Масса нетто, г.	60

В качестве второго эталонного сопротивления выбран резистор CF-25 (С1-4) номиналом 100 кОм из стандартного ряда E24.

Информация о коротком замыкании или обрыве обмоток шагового двигателя, отображается путём зажигания соответствующего светодиода.

2.2 Контроль температуры

Существуют два основных класса методов измерения температуры: контактные и бесконтактные.

Контактный метод измерения температуры требует непосредственного контакта с измеряемой средой или телом. Он обеспечивает более точные результаты в сравнении с бесконтактным методом. В контактном методе

используются различные типы термопреобразователей, такие как термопреобразователи сопротивления, термоэлектрические преобразователи и полупроводниковые преобразователи. Эти устройства регистрируют изменения сопротивления или электрического потенциала, связанные с изменением температуры.

Бесконтактный метод измерения температуры основан на восприятии тепловой энергии, передаваемой через лучеиспускание. В этом методе нет необходимости в физическом контакте с измеряемым объектом или средой. Бесконтактные методы измерения температуры, например, инфракрасные термометры, используются для измерения теплового излучения и не оказывают никакого влияния на температуру среды или объекта.

В виду вышеизложенного, применён контактный метод измерения температуры воды, в следствие его большей точности. В качестве конкретного датчика температуры выбран термистор S869/10k/40+ [21].

Нормализованные R/T -характеристики приведены в таблицах относительно температуры $+25^{\circ}\text{C}$ (величина R_T/R_{25}) в технической документации производителя термисторов [21]. Руководствуясь этими таблицами, можно определить сопротивление термистора при температуре T согласно выражению [21]:

$$R_T = \frac{R_T}{R_{25}} \cdot R_{25}.$$

Если значение температуры T попадает в интервал $T_x < T < T_{x+1}$, то для определения величины сопротивления R_T используется следующее соотношение, приведённое в [21]:

$$R_T = R_{Tx} \cdot \exp \left[\frac{\alpha_x}{100} \cdot (T_x + 273,15)^2 \cdot \left(\frac{1}{T + 273,15} - \frac{1}{T_x + 273,15} \right) \right],$$

где R_T – значение сопротивления при искомой температуре T ;

R_{Tx} – значение сопротивления начала интервала;

T_x – температура в $^{\circ}\text{C}$ начала интервала;

T – искомая температура в $^{\circ}\text{C}$;

α_x – температурный коэффициент сопротивления при температуре T_x .

Температурный диапазон выбран от 0 до +80 °С, поскольку необходимо отслеживать превышение максимального значения температуры корпуса выбранного шагового двигателя (см. таблицу 1.4). Для построения R/T характеристики для выбранного температурного диапазона 0 ... + 80 °С, воспользуемся данными технической документации [21] для кривой 8016, соответствующей термистору S869/10k/40+. Ниже приведён пример расчёта искомой характеристики для температуры 0 °С:

$$R_0 = \frac{R_0}{R_{25}} \cdot R_0 = 3,265 \cdot 10 \cdot 10^3 = 32,65 \text{ кОм.}$$

Расчёт для других значений температурного диапазона аналогичен.

Результаты расчёта R/T характеристики сведены в таблицу 6.

На основании данных таблицы 6 на рисунке 6 приведена построенная R/T -характеристика термистора S869/10k/40+. На рисунке 7 приведена зависимость сопротивления термистора от температуры для заданного диапазона температур.

Таблица 6 – Результаты расчёта R/T характеристики

T, °C	R_T/R_{25}	α , %K	R_T , кОм
0	3,625	5,1	32,65
5	2,539	5,0	25,39
10	1,990	4,8	19,9
15	1,571	4,7	15,71
20	1,249	4,5	12,49
25	1,000	4,4	10
30	0,8057	4,3	8,057
35	0,6531	4,1	6,531
40	0,5327	4,0	5,327
45	0,4369	3,9	4,369
50	0,3603	3,8	3,603

Продолжение таблицы 6

55	0,2986	3,7	2,986
60	0,2488	3,6	2,488
65	0,2083	3,5	2,083
70	0,1752	3,4	1,752
75	0,1481	3,3	1,481
80	0,1258	3,2	1,258

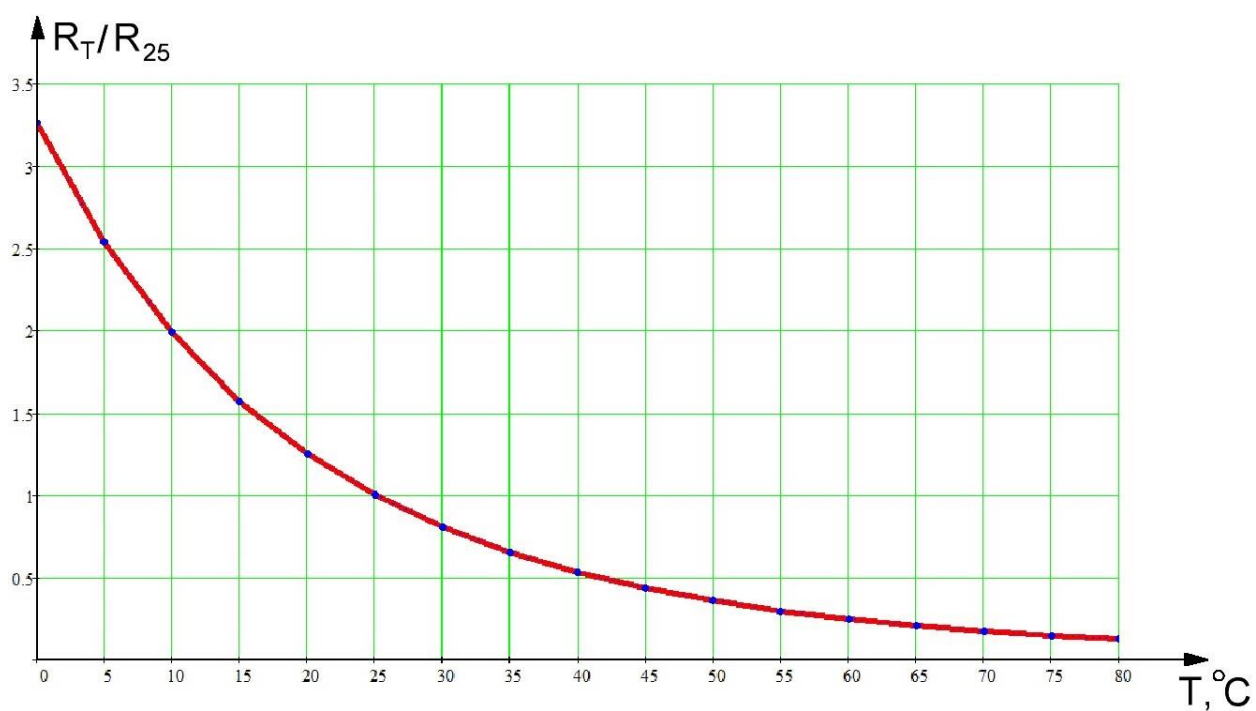


Рисунок 6 – R/T -характеристика термистора S869/10k/40 +

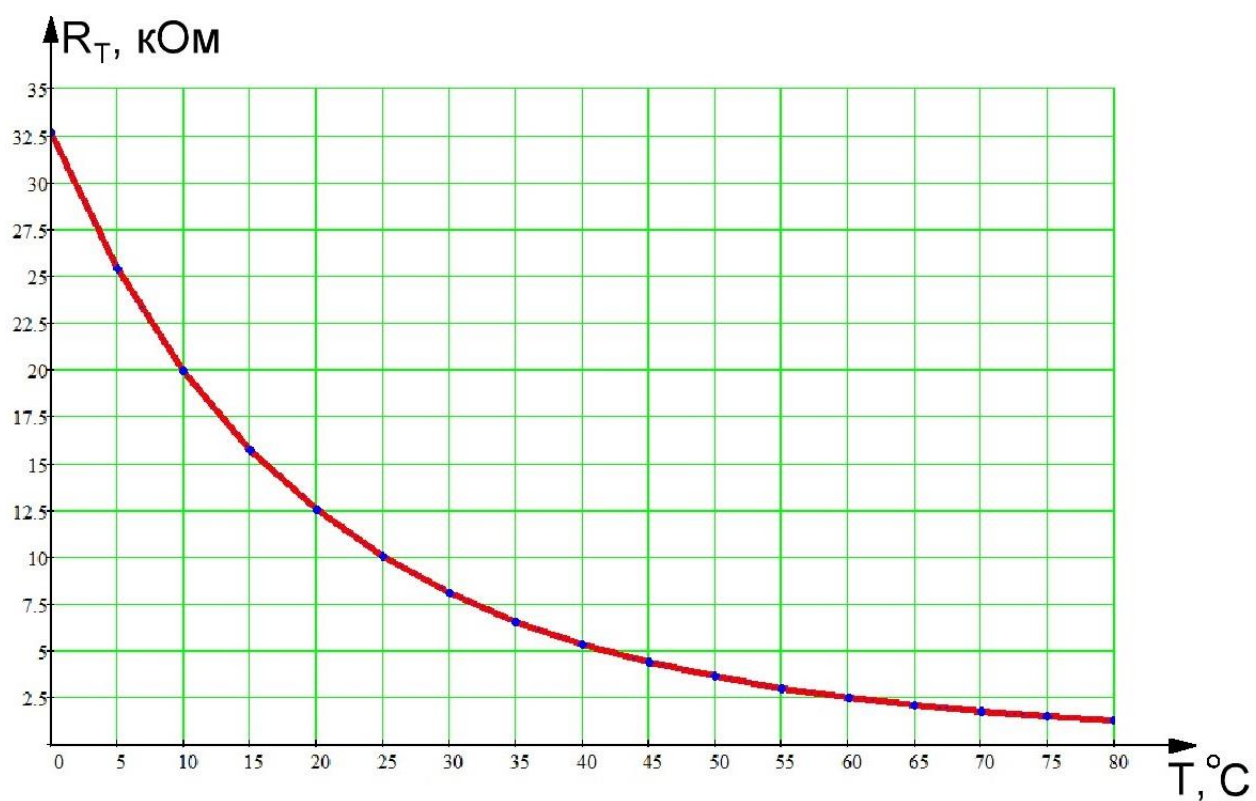


Рисунок 7 – График зависимости $R_T = f(T)$

На рисунке 8 приведена схема измерения температуры корпуса выбранного шагового двигателя.

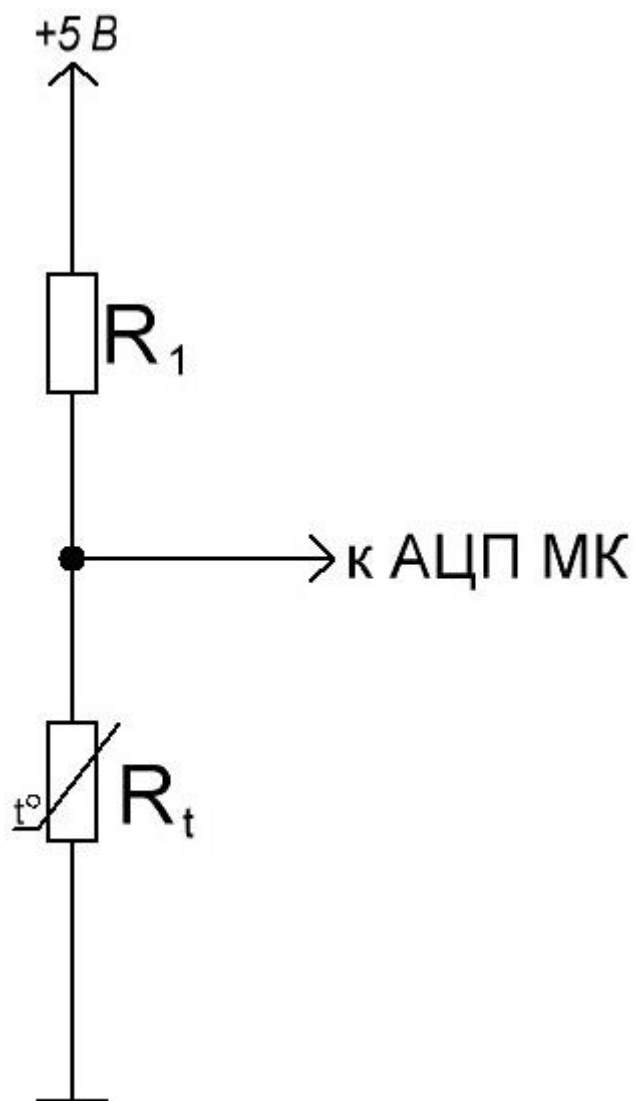


Рисунок 8 – Схема измерения температуры корпуса шагового двигателя

Температура корпуса шагового двигателя измеряется косвенным способом, путём измерения напряжения с делителя, представленного на рисунке 8. Как было показано в таблице 2.5, сопротивление термистора при температуре 80 °С равно:

$$R_t = 1,258 \text{ кОм.}$$

В качестве сопротивления R_1 выбран резистор CF-25 (C1-4) номиналом 10 кОм из стандартного ряда E24.

Тогда для данных значений сопротивлений резисторов, напряжение на выходе делителя составит:

$$U = \frac{R_t}{R_1 + R_t} \cdot E.$$

Напряжение источника питания E выбрано равным напряжению питания микроконтроллера, т.е. +5 В.

Подстановка численных значений даёт:

$$U = \frac{1,258 \cdot 10^3}{10 \cdot 10^3 + 1,258 \cdot 10^3} \cdot 5 = 0,559 \text{ В.}$$

Что соответствует значению регистра ADC [15]:

$$ADC = 1024 \cdot \frac{U}{E};$$

$$ADC = 1024 \cdot \frac{0,559}{5} = 114,483 \approx 115.$$

Превышение данного значения регистра ADC и будет соответствовать превышению максимального значения температуры шагового двигателя, т.е. превышению +80 °С.

Информация о превышении температуры корпуса шагового двигателя визуализирована при помощи светодиода, т.е. путём подачи логической единицы с порта ввода/вывода микроконтроллера, загорается соответствующий светодиод, сигнализирующий о превышении максимального значения температуры корпуса шагового двигателя.

2.3 Контроль пропуска шага

Контроль пропуска шага шагового двигателя осуществлён при помощи контроля превышения тока обмотки шагового двигателя. Согласно технической документации на выбранный шаговый двигатель [25], сопротивление обмотки шагового двигателя (в рассматриваемом случае сопротивление нагрузки) равно 0,6 Ом. Для измерения тока в цепи на рисунке 9 приведена электрическая схема замещения, представляющая собой преобразователь ток-напряжение.

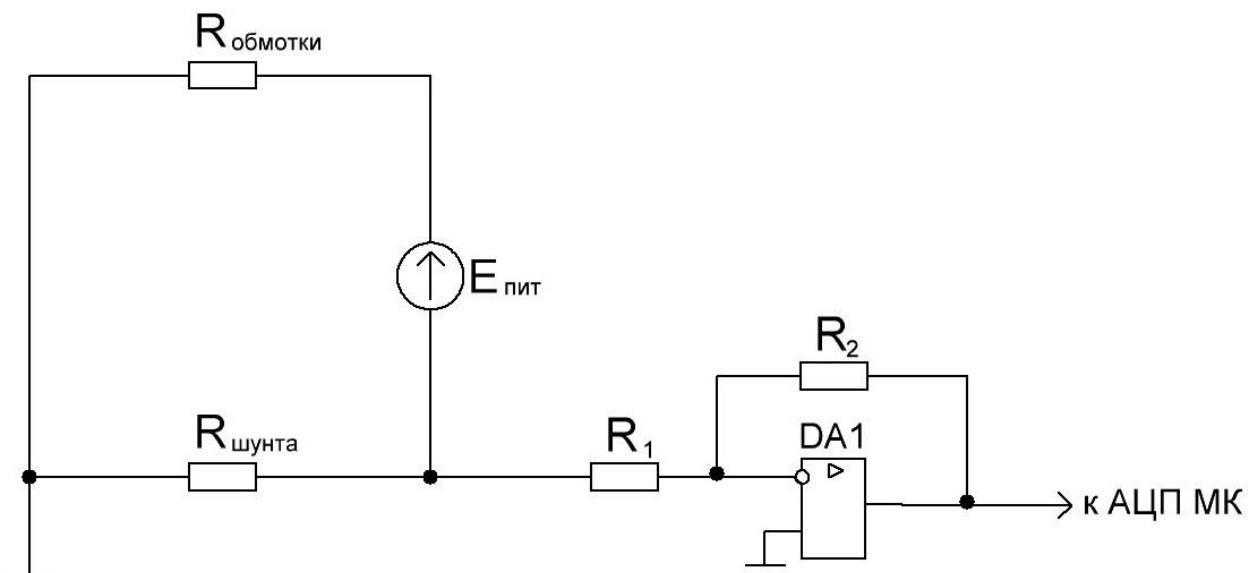


Рисунок 9 – Схема замещения для измерения тока обмотки шагового двигателя с помощью АЦП микроконтроллера

В качестве токового шунта выбран 75ШИП1-10-05 с номинальным значением сопротивления 7,5 мОм [26], технические параметры которого приведены в таблице 2.1.

Входное напряжение для инвертирующего усилителя на базе операционного усилителя (ОУ), как видно из схемы, представленной на рисунке 9, равно:

$$U_{\text{вх}} = - \frac{R_{\text{шунта}}}{R_{\text{шунта}} + R_{\text{обмотки}}} \cdot E_{\text{пит}},$$

где $U_{\text{вх}}$ – напряжение на входе инвертирующего усилителя на базе ОУ, В;

$R_{\text{шунта}}$ – сопротивление токового шунта, равное 7,5 мОм;

$R_{\text{обмотки}}$ – сопротивление обмотки шагового двигателя, равное 0,6 Ом;

$E_{\text{пит}}$ – напряжение питания шагового двигателя, равное 3,6 В.

Тогда

$$U_{\text{вх}} = - \frac{7,5 \cdot 10^{-3}}{7,5 \cdot 10^{-3} + 0,6} \cdot 3,6 = -0,044 \text{ В.}$$

Коэффициент усиления по напряжению инвертирующего усилителя на базе ОУ равен [1,6,8,13,14,18,23,27]:

$$K_U = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}} = -\frac{R_2}{R_1},$$

где K_U – коэффициент усиления по напряжению;

$U_{\text{ВЫХ}}$ – напряжение на выходе инвертирующего усилителя, В;

$U_{\text{ВХ}}$ – напряжение на входе инвертирующего усилителя, В.

Принимаем, что напряжение на выходе преобразователя ток-напряжение должно составлять +2,5 В.

Тогда

$$K_U = \frac{2,5}{-0,044} = -56,818.$$

Для определённости, принимаем $R_2 = 10$ кОм из стандартного ряда Е24.

Тогда

$$R_1 = -\frac{R_2}{K_U}.$$

Подстановка численных значений даёт:

$$R_1 = -\frac{10 \cdot 10^3}{-56,818} = 176,001 \text{ Ом}.$$

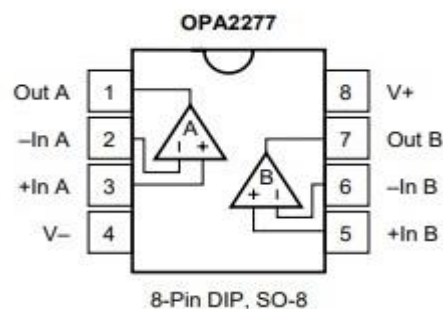
Принимаем сопротивление резистора $R_1 = 176$ Ом из стандартного ряда Е192.

В качестве конкретного операционного усилителя выбран ОУ ОРА2277U.

Операционный усилитель ОРА2277U представляет собой двухканальный малощумящий операционный усилитель производителя Texas Instruments. На рисунке 10 представлены внешний вид и расположение выводов операционного усилителя ОРА2277U согласно технической документации производителя [15].



а)



б)

Рисунок 10 – Операционный усилитель OPA2277U: а) внешний вид; б) расположение выводов

В таблице 7 представлены основные технические характеристики операционного усилителя OPA2277U согласно технической документации производителя [15].

Таблица 7 – Технические параметры ОУ OPA2277U

Параметр	Значение
Число каналов	2
Частота единичного усиления, МГц	1
Скорость нарастания выходного напряжения, В/мкс	0.8
Напряжение питания	+4...+36
Напряжение смещения на входе, мкВ	10
Температура эксплуатации, °С	-40...+85
Масса, г.	0.15

Для проверки корректности произведённых расчётов выполнено моделирование работы преобразователя ток-напряжение в программе схемотехнического моделирования Multisim. Результат моделирования представлен на рисунке 11.

Из рисунка 11 видно, что расчёт произведён корректно.

Превышение величины выходного напряжения преобразователя ток-напряжение отслеживается про помощи АЦП последовательного приближения микроконтроллера. Для определённости АЦП отслеживает напряжение, превышающее +3 В.

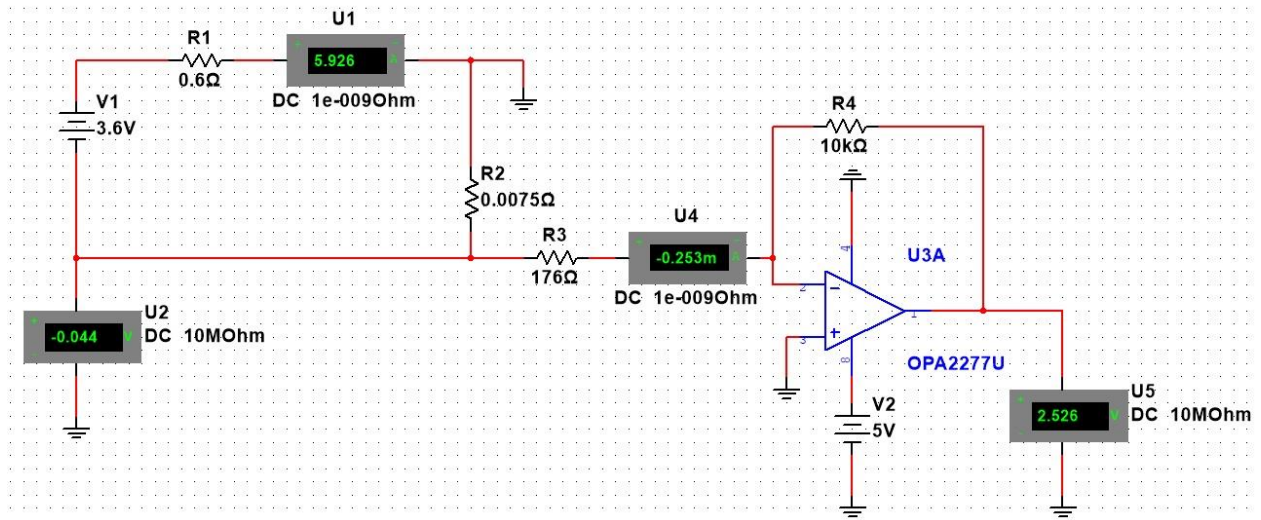


Рисунок 11 – Моделирование в программе Multisim

Что соответствует значению регистра ADC [22]:

$$ADC = 1024 \cdot \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ОП}}};$$

$$ADC = 1024 \cdot \frac{3}{5} = 614,4 \approx 615.$$

2.4 Выбор микроконтроллера

Устройства управления на жесткой логике (например, комбинационные схемы и последовательные автоматы) основаны на фиксированной логике, которая определяется физическими компонентами, такими как вентили, транзисторы и регистры. Эти устройства обычно предназначены для выполнения конкретных функций и не могут быть изменены без изменения физической схемы. Они обычно обладают высокой скоростью работы и низкой

задержкой, что делает их подходящими для простых и быстрых задач. С другой стороны, программируемые устройства управления (например, микроконтроллеры и программируемые логические контроллеры) основаны на программном управлении, где логика и функциональность определяются программным кодом. Эти устройства обладают гибкостью и могут быть перепрограммированы для выполнения различных задач без изменения физической схемы. Они обычно имеют большой объем памяти и поддерживают различные интерфейсы и периферийные устройства, что делает их подходящими для более сложных и гибких приложений [1,18].

В виду вышеизложенного, и было принято решение построить устройство управление на базе микроконтроллера. Сегодня микроконтроллеры являются доступными и экономичными цифровыми устройствами. Они представляют собой микросхемы, на которых находится целый микрокомпьютер. Внутри одного корпуса объединены микросхемы процессора, памяти и периферийных устройств. Все компоненты микроконтроллера взаимодействуют между собой и с внешними устройствами, используя микропрограммы, которые хранятся во внутренней флэш-памяти микроконтроллера и которые программисты могут написать [23]. В таблице 2.7 представлены преимущества и недостатки основных семейств микроконтроллеров.

Из сравнений трёх основных семейств микроконтроллеров, выпускаемых промышленностью (см. таблицу 8), выбор пал на микроконтроллеры семейства AVR производителя Microchip Technology (ранее Atmel).

Ниже рассмотрены основные типы микроконтроллеров семейства AVR, которые включают [23,27]:

1. tinyAVR: Микроконтроллеры tinyAVR (ATtinyxxx) представляют собой маленькие и экономичные устройства с небольшим объемом памяти. Они обычно имеют низкое энергопотребление и подходят для простых проектов с ограниченными требованиями.

2. megaAVR: Микроконтроллеры megaAVR (ATmegaxxx) предлагают больший объем памяти и более широкий набор периферийных устройств. Они подходят для более сложных проектов, требующих большей вычислительной мощности и функциональности.

Таблица 8 – Сравнение семейств микроконтроллеров

Семейство	Преимущества	Недостатки
ARM	Широкий выбор моделей с различными характеристиками, включая производительность и энергоэффективность.	Некоторые модели могут быть более сложными в использовании для начинающих разработчиков.
	Поддержка различных ядер, таких как ARM Cortex-M, которые предлагают высокую производительность и низкое энергопотребление.	Высокая стоимость некоторых моделей по сравнению с другими микроконтроллерами.
	Хорошая поддержка со стороны сообщества разработчиков и наличие множества библиотек и инструментов разработки.	
PIC	Широкий выбор моделей с различными характеристиками и возможностями.	Ограниченная производительность по сравнению с некоторыми другими микроконтроллерами.
	Хорошая поддержка со стороны компании производителя Microchip Technology.	Некоторые модели могут иметь ограниченные возможности расширения.
	Простота использования и доступность для начинающих разработчиков.	

Продолжение таблицы 8

Семейство	Преимущества	Недостатки
AVR	Хорошая производительность и энергоэффективность.	Ограниченные возможности расширения по сравнению с некоторыми другими микроконтроллерами.
	Широкий выбор моделей с различными характеристиками и возможностями.	Некоторые модели могут иметь ограниченный объем памяти.
	Поддержка популярной платформы разработки Arduino.	

3. XMEGA: Микроконтроллеры XMEGA представляют собой расширенную версию AVR с большим объемом памяти и дополнительными функциями, такими как улучшенная аппаратная шифрование и поддержка USB.

4. Classic AVR: Classic AVR – это общее название для микроконтроллеров AVR, включая как tinyAVR, так и megaAVR. Они предлагают хорошую производительность и широкий выбор моделей для различных приложений.

Согласно вышеизложенному, цифровое устройство управления построено на базе микроконтроллера megaAVR. В качестве конкретного микроконтроллера выбран микроконтроллер ATmega8, отличительными особенностями которого являются:

- Архитектура: RISC;
- Разрядность: 8 бит;
- Частота ядра: до 16 МГц;
- Объем памяти программ: 8 Кбайт (Flash);
- Объем оперативной памяти: 1 Кбайт (SRAM);
- Объем энергонезависимой памяти: 512 байт (EEPROM);

- Количество входов/выходов (I/O): 23 (а также 28 для корпуса PDIP и 32 для корпуса TQFP/MLF);
- Интерфейсы: SPI, I2C, UART (USART);
- Аналого-цифровые преобразователи (ADC): 8-канальный 10-битный;
- Таймеры: 3 таймера/счетчика общего назначения (8- и 16-битные);
- Ширина шины данных: 8 бит;
- Поддержка внешнего источника тактирования;
- Поддержка программирования через интерфейс ISP.

Микроконтроллер ATmega8 был выбран из-за его широкого распространения, доступной стоимости и обширного объема литературы, включая русскоязычные материалы, которые описывают его функциональность и различные проекты, которые можно реализовать с его помощью.

На рисунке 12 показан внешний вид микроконтроллера ATmega8 в двух корпусных исполнениях – PDIP и TQFP.

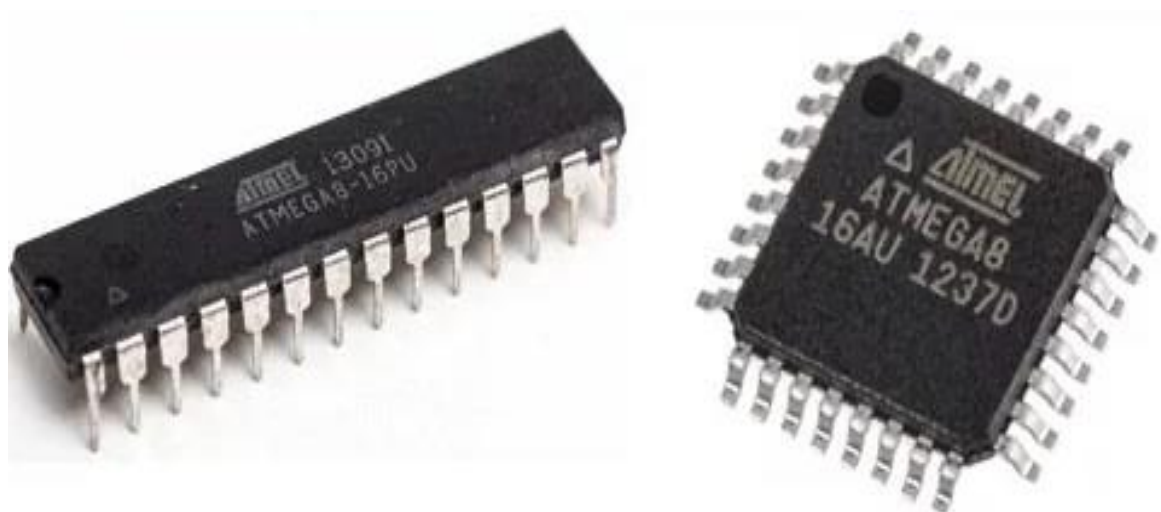


Рисунок 12 – Внешний вид микроконтроллера ATmega8: слева в корпусе PDIP, справа – TQFP

DIP

Pin	Function	Pin	Function
1	(RESET) PC6	28	PC5 (ADC5/SCL)
2	(RXD) PD0	27	PC4 (ADC4/SDA)
3	(TXD) PD1	26	PC3 (ADC3)
4	(INT0) PD2	25	PC2 (ADC2)
5	(INT1) PD3	24	PC1 (ADC1)
6	(XCK/T0) PD4	23	PC0 (ADC0)
7	VCC	22	GND
8	GND	21	VREF
9	(XTAL1/TOSC1) PB6	20	AVCC
10	(XTAL2/TOSC2) PB7	19	PB5 (SCL)
11	(T1) PD5	18	PB4 (MISO)
12	(AIN0) PD6	17	PB3 (MOSI/OC2)
13	(AIN1) PD7	16	PB2 (SS/OC1B)
14	(ICP1) PB0	15	PB1 (OC1A)

TQFP/MLF

Pin	Function	Pin	Function
1	(INT1) PD3	32	PD2 (INT0)
2	(XCK/T0) PD4	31	PD1 (TXD)
3	GND	30	PD0 (RXD)
4	VCC	29	PC6 (RESET)
5	GND	28	PC5 (ADC5/SCL)
6	VCC	27	PC4 (ADC4/SDA)
7	(XTAL1/TOSC1) PB6	26	PC3 (ADC3)
8	(XTAL2/TOSC2) PB7	25	PC2 (ADC2)
9	(T1) PD5	24	PC0 (ADC0)
10	(AIN0) PD6	23	PC1 (ADC1)
11	(AIN1) PD7	22	ADC7
12	(ICP1) PB0	21	GND
13	(OC1A) PB1	20	VREF
14	(OC1B/SS) PB2	19	ADC6
15	(OC2/MOSI) PB3	18	AVCC
16	(MISO) PB4	17	PB5 (SCL)

На рисунке 14 приведена схема подключения кварцевого резонатора к

41

выбраны производителем микроконтроллера равными 22 пФ в соответствии с их рекомендациями [22].

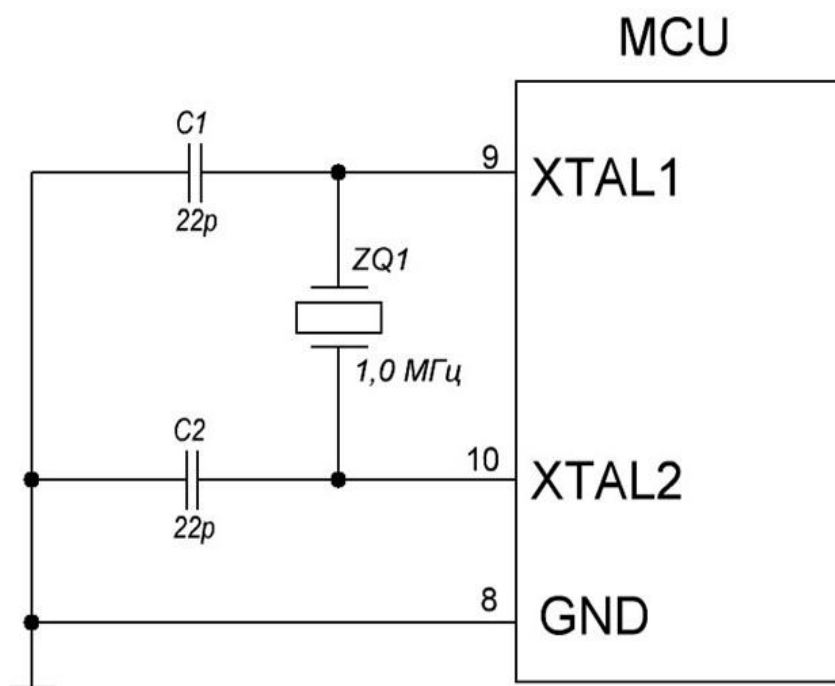


Рисунок 14 – Схема подключения внешнего кварцевого резонатора к микроконтроллеру

В качестве конкретного кварцевого резонатора выбран HC6U с резонансной частотой 1 МГц [11], внешний вид которого представлен на рисунке 15.



Рисунок 15 – Внешний вид кварцевого резонатора HC6U

Микроконтроллер с кварцевым резонатором имеет три различных режима работы, каждый из которых оптимизирован для определённого диапазона частот. Для выбора соответствующего режима в FUSE-битах необходимо установить определенные значения для битов CKSEL 3...1, которые перечислены в таблице 9.

Таблица 9 – Настройка FUSE-битов микроконтроллера ATmega8

СКОРТ	CKSEL 3...1	Частотный диапазон, МГц	Конденсаторы, пФ	Примечание
1	101	0.4 – 0.9	Не требуется	Использовать керамические резонаторы
1	110	0.9 – 3.0	12 – 22	-
1	111	3.0 – 8.0	12 – 22	-
0	101, 110, 111	$1.0 \leq$	12 – 22	-

Эти биты можно установить в программе AVRDUDE_PROG 3.2, в разделе Fuses. Для достижения заданной цели, необходимо установить FUSE-биты CKSEL 3...1 в значение "110", чтобы обеспечить оптимальный частотный диапазон работы микроконтроллера ATmega8.

2.6 Схема принудительного сброса

На рисунке 16 приведена схема осуществления сброса применяемого микроконтроллера ATmega8, согласно технической документации [22].

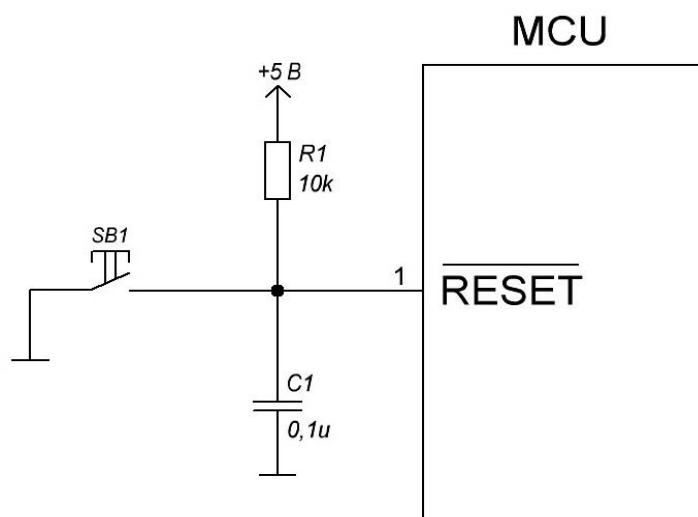


Рисунок 16 – Схема осуществления сброса микроконтроллера

Из рисунка 16 видно, что сброс управляющей программы микроконтроллера выполняется путём подачи на вывод RESET (с инверсией) низкого уровня логического напряжения.

В качестве конкретной тактовой кнопки выбрана двухвыводная тактовая кнопка ТС-0120 [20], внешний вид которой показан на рисунке 17.



Рисунок 17 – Внешний вид тактовой кнопки ТС-0120

В соответствии с технической документацией для микроконтроллера ATmega8 [22], в схеме сброса был выбран резистор R1 номиналом 10 кОм, а конденсатор C1 номиналом 0,1 мкФ. Эти значения были выбраны для оптимальной работы микроконтроллера ATmega8 в данной схеме принудительного сброса.

2.7 Вывод результатов контролируемых параметров

Результаты измерений было принято выводить на светодиоды, поскольку не требуется знать абсолютные значения измеряемых величин, а нужна лишь информация об изменении контролируемых величин.

В качестве конкретного светодиода выбран зелёный светодиод GNL-3012 GD, внешний вид которого показан на рисунок 18.



Рисунок 18 – Внешний вид зелёного светодиода GNL-3012 GD

В таблице 10 приведены технические параметры выбранных светодиодов, согласно технической документации [17].

Таблица 10 – Технические параметры светодиода

Название	Цвет	Длина волны, нм	Прямой ток, мА	Напряжение на диоде, В
GNL-3012GD	Зелёный	565	20	2.1

Поскольку логический уровень высокого напряжения, снимаемого с порта ввода/вывода микроконтроллера, равен напряжению питания самого микроконтроллера (в нашем случае +5 В), а рабочее напряжение на светодиоде составляет 2,1 В (см. таблицу 10), то для того, чтобы светодиод не вышел из строя, необходимо последовательно со светодиодом подключить резистор, для

ограничения, проходящего через светодиод тока. Схема подключения светодиода к микроконтроллеру выбрана с общим катодом.

Для определения номинала токоограничивающего резистора на рисунке 19 приведена расчётная схема.

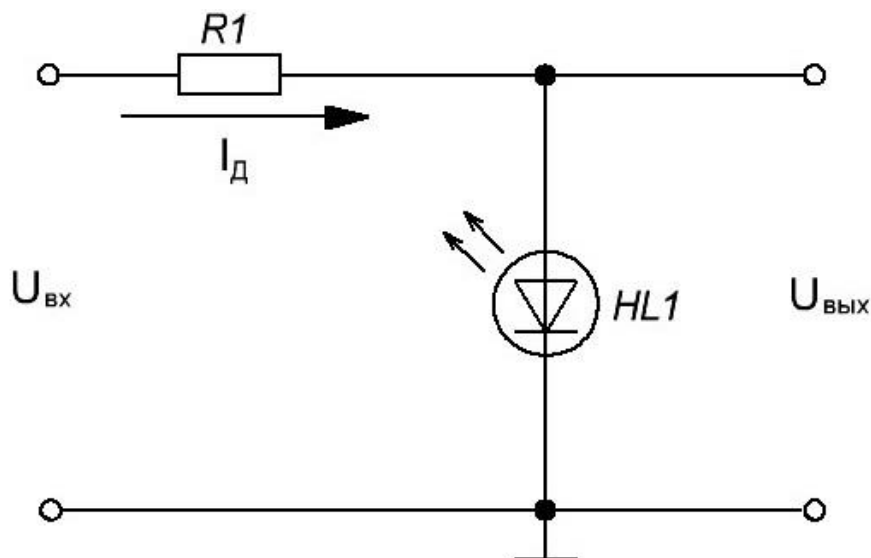


Рисунок 19 – Расчётная схема

В качестве исходных данных известно, что $U_{\text{вх}} = 5 \text{ В}$, $U_{\text{д}} = 2.1 \text{ В}$, $I_{\text{д}} = 20 \text{ мА}$ (см. таблицу 2.9).

Согласно второму закону Кирхгофа:

$$U_{\text{вх}} = U_{R1} + U_{\text{д}}.$$

Откуда падение напряжения на резисторе R_1 :

$$U_{R1} = U_{\text{вх}} - U_{\text{д}}.$$

Подстановка численных значений даёт:

$$U_{R1} = 5 - 2.1 = 2.9 \text{ В}.$$

Согласно закону Ома для участка цепи, имеем

$$I_{\text{д}} = \frac{U_{R1}}{R_1}.$$

Откуда получаем, что

$$R_1 = \frac{U_{R1}}{I_D}.$$

Подстановка численных значений даёт:

$$R_1 = \frac{2.9}{20 \cdot 10^{-3}} = 145 \text{ Ом.}$$

Рассеиваемая мощность составляет:

$$P_1 = U_1 \cdot I_D.$$

Подставим численные значения:

$$P_1 = 2.9 \cdot 20 \cdot 10^{-3} = 0.058 \text{ Вт} = 58 \text{ мВт.}$$

Поскольку резисторы, производимые в промышленности (за исключением прецизионных), имеют значительный разброс, для данного случая мы выберем резистор из стандартного ряда E24 с номиналом, превышающим рассчитанное значение. В качестве такого резистора рассмотрим углеродистый резистор CF-25 с номиналом 200 Ом и мощностью рассеивания 0.25 Вт.

2.8 Источник стабилизированного напряжения

Для питания микроконтроллера к положительному выходу рассчитанного источника питания подключается стабилизатор напряжения КР142ЕН5А для создания однополярного положительного напряжения +5 В.

На рисунке 20 показана схема подключения стабилизатора напряжения КР142ЕН5А согласно технической документации производителя [19].

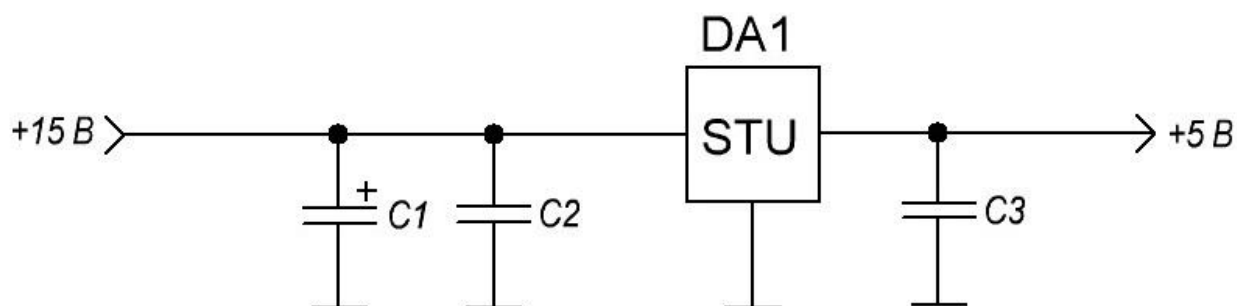


Рисунок 20 – Схема включения стабилизатора КР142ЕН5А

Конденсаторы, применяемые в схеме, показанной на рисунке 20, выбраны согласно типовой схеме включения данного стабилизатора [19].

В качестве конкретного электролитического конденсатора выбран конденсатор электролитический алюминиевый К50-35, номиналом 470 мкФ с допуском $\pm 5\%$ и рабочим напряжением 25 В.

В таблице 11 представлены основные технические параметры стабилизатора напряжения положительной полярности КР142ЕН5А согласно технической документации производителя [19].

Таблица 11 – Технические параметры стабилизатора КР142ЕН5А

Параметр	Значение
Выходное напряжение, В	5
Максимальный ток нагрузки, А	1.5
Максимальное входное напряжение, В	15
Температура эксплуатации, °С	-45...+70
Масса, г.	2.5

Таким образом, полностью выбрана элементная база устройства, согласно структурной электрической схеме (приведена на листе 3 графической части), на основании которой синтезирована принципиальная электрическая схема. Принципиальная электрическая схема приведена на рисунке 21, а также на листе 4 графической части. Перечень элементов к ней на листах 6-7 графической части.

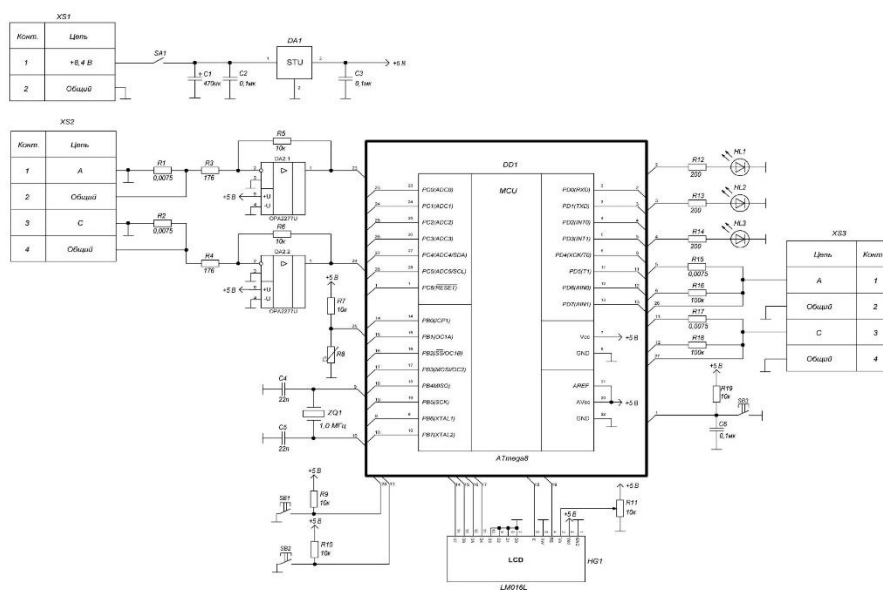


Рисунок 21 – Принципиальная электрическая схема

3 Конструкторский раздел

3.1 Печатная плата

Печатная плата построена в среде Easy EDA. Процесс построения приведён на рисунках 22 – 24, а также на листе 5 графической части. Трёхмерная модель печатной платы приведена на листе 8 графической части.

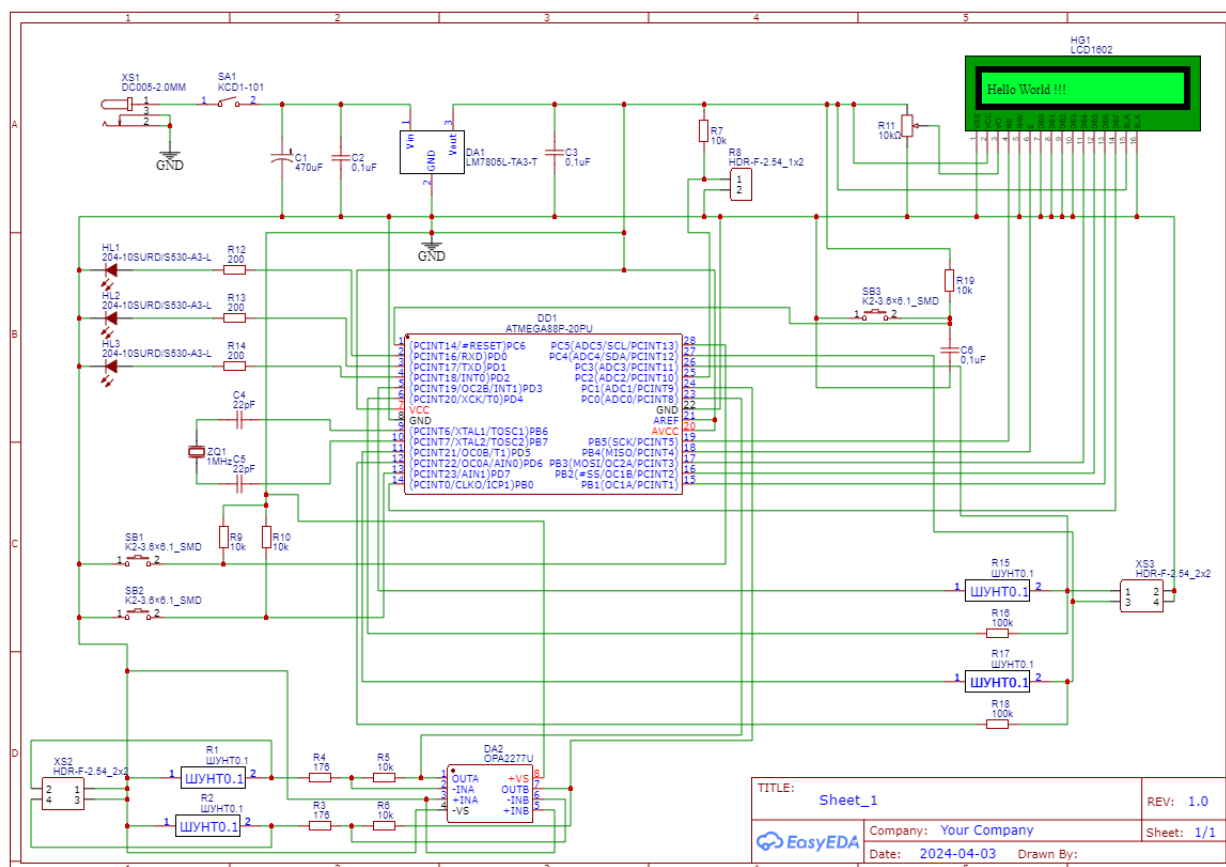


Рисунок 22 – Принципиальная электрическая схема в программе Easy EDA

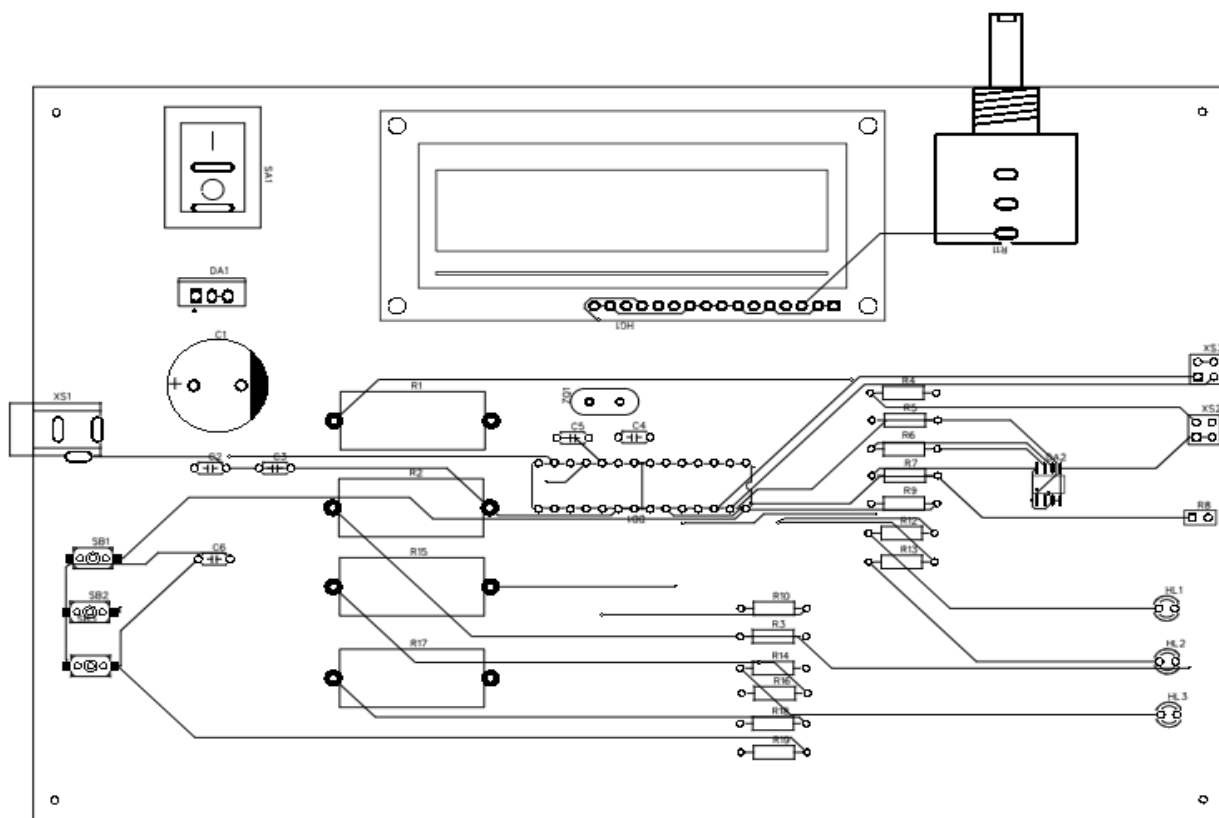


Рисунок 23 – Верхний слой печатной платы

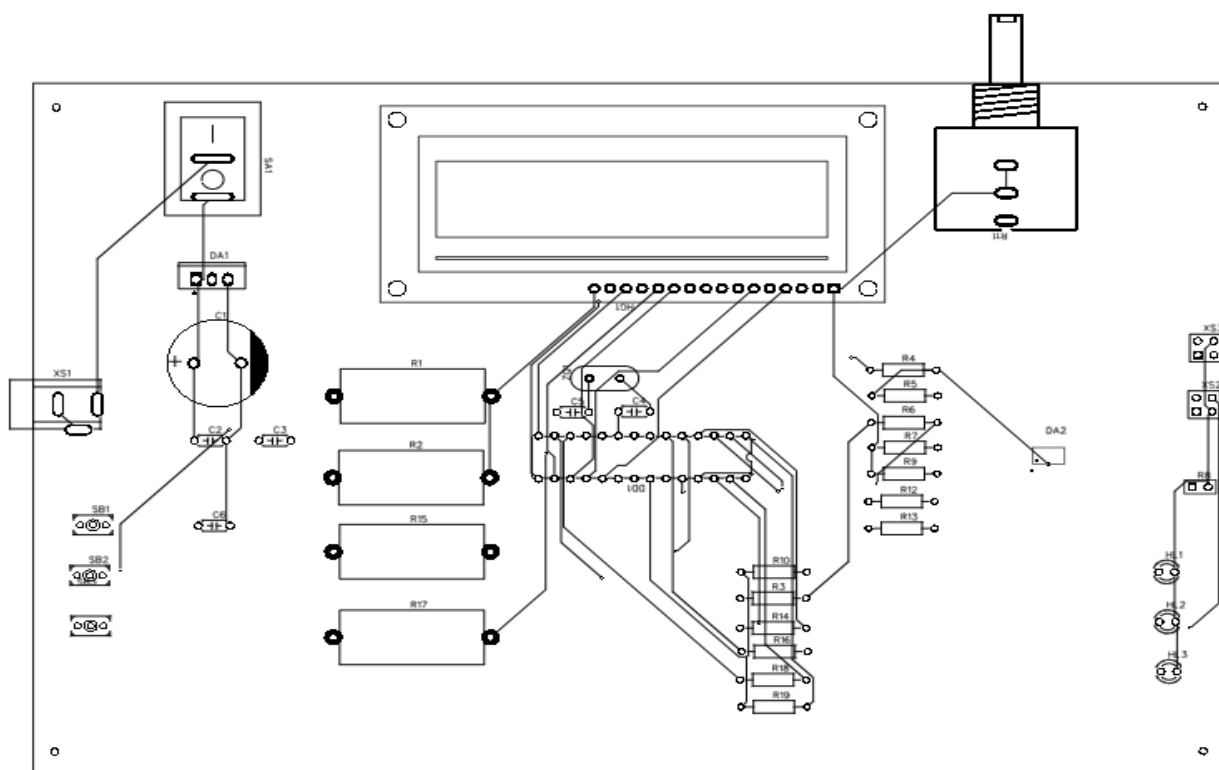


Рисунок 24 – Нижний слой печатной платы

3.2 Маршрутная карта

Входной контроль:

Контроль на входе занимает 5 минут с использованием системы входного контроля с «летающими» пробниками SPEA 4040.

Загрузка печатных плат в линию:

С использованием вакуумного загрузчика печатных плат в линию SBSF-200, процесс загрузки печатных плат занимает всего 1 минуту.

Маркировка печатных плат:

Маркировка печатной платы осуществляется за 2 минуты с помощью системы лазерной маркировки KCLM-900XX. Лазер с регулируемой мощностью позволяет маркировать штрих-коды, номера деталей, логотипы и другую информацию на плате при прохождении лазера по ее поверхности.

Нанесение паяльной пасты:

Нанесение паяльной пасты на печатную плату осуществляется за 3 минуты с помощью линейного автоматического принтера HP-680S, используя паяльную пасту Indium 8.9 HF.

Оптический контроль:

На этапе оптического контроля, с помощью системы автоматической оптической инспекции MV-7U, происходит проверка правильности и качества нанесенной паяльной пасты на плату. Этот процесс занимает 3 минуты.

Установка компонентов для SMD монтажа:

Установка компонентов осуществляется за 3 минуты 40 секунд с помощью автоматической установки SMD компонентов с конвейером Neoden 5.

Оптический контроль:

На этапе оптического контроля, с помощью системы автоматической оптической инспекции MV-7U, происходит проверка правильности установки радиоэлементов. Этот процесс занимает 3 минуты.

Пайка в печи:

При использовании конвекционной печи A70-j82s и пасты Indium8.9 HF, пайка в печи занимает всего 20 минут. Процесс пайки начинается с установки платы на конвейер, после чего она проходит предварительный нагрев, прогрев и сам процесс пайки. По завершении пайки, плата проходит процесс охлаждения.

Оптический контроль:

На этапе оптического контроля, с помощью системы автоматической оптической инспекции MV-7U, происходит контроль на соответствие монтажа и проверка на отсутствие перемычек. Этот процесс занимает 3 минуты.

Разгрузка печатных плат:

Выгрузка печатной платы с помощью разгрузчика печатных плат магазинного типа SUD-120F занимает 20 секунд.

Формовка и обрезка для выводного монтажа:

Формовка и обрезка осуществляется за 3 минуты с помощью пневматической машины для обрезки и формовки радиальных компонентов из россыпи TP/TS1.

Флюсование и лужение:

Лужение осуществляется за 5 минут с использованием установки для лужения выводов RPS Odyssey и безотмывочного флюса F-355 NVOС.

Установка компонентов:

Установка компонентов осуществляется за 3 минуты с помощью автомата для монтажа выводных компонентов Cencorp 1000 OF.

Пайка волной:

Пайка волной осуществляется за 1 минуту с помощью установки пайки волной HS03-2000, с использованием припоя маркой SnAg4Cu0,5.

Разгрузка печатных плат:

Выгрузка печатной платы с помощью разгрузчика печатных плат магазинного типа SUD-120F занимает 20 секунд.

Оптический контроль:

На этапе оптического контроля, с помощью системы автоматической оптической инспекции MV-7U, происходит контроль проверка на отсутствие перемычек. Этот процесс занимает 3 минуты.

Рентгеновский контроль:

Рентгеновский контроль осуществляется за 5 минут с помощью рентгеноскопической системы модели XT V 130C.

Загрузка печатных плат:

Выгрузка печатной платы с помощью разгрузчика печатных плат магазинного типа SUD-120F занимает 1 минуту.

Нанесение защитного слоя:

Нанесение защитного слоя осуществляется за 2 минуты с помощью установки селективной влагозащиты SC-460, с использованием влагозащитного лака Plastik 70CRC. Процесс начинается с подвешивания платы на подъемник, затем следует процесс погружения, и в конце плата выгружается на следующий этап.

Сушка защитного слоя:

Сушка защитного слоя производится в течение 1 часа в промышленном сушильном шкафу OFC-20P. Процесс начинается с установки плат на полки и загрузки их в шкаф, затем следует сам процесс сушки. По окончании сушки, печатные платы выгружаются из шкафа.

Выходной контроль:

Выходной контроль осуществляется за 10 минут с помощью цифрового осциллографа RTM3K-54 и вольтметра/амперметра ВАР-M01-083. Процесс контроля начинается с проверки выходных напряжений, а затем производится замер частоты и формы сигнала на выходе.

Итого весь процесс занимает 134 минуты 20 секунд на единицу изделия.

Планировка участка приведена на листе 9 графической части.

Заключение

В ходе проделанной работы были изучены основные методики определения некоторых параметров шаговых двигателей для определения состояния его обмоток на наличие короткого замыкания или их обрыва, контроля за температурой корпуса и контроля пропуска шага.

Для решения задачи контроля состояния обмоток шагового двигателя использован метод измерения сопротивления обмоток при помощи микроконтроллера, путём измерения с помощью встроенного аналого-цифрового преобразователя последовательного приближения самого микроконтроллера. Измерения данного параметра производится при выключенном шаговом двигателе.

Для измерения температуры корпуса шагового двигателя применён контактный способ измерения температуры при помощи термистора в качестве датчика температуры.

Измерение пропуска шага производится путём косвенного измерения превышения тока обмотки шагового двигателя. Вывод информации о контролируемых параметрах осуществляется на светодиоды.

Все эти контрольные меры являются неотъемлемой частью обслуживания и эксплуатации электрических устройств. Они помогают предотвратить возможные поломки, повреждения и обеспечить безопасность в работе электротехнического оборудования.

На основании изученных методик построена структурная электрическая схема, произведён выбор элементной базы устройства и синтезирована принципиальная электрическая схема, по которой построена печатная плата устройства в программе Easy EDA. Произведён выбор оборудования для серийного производства печатной платы.

Список используемой литературы и используемых источников

1. Атабеков, Г. И. Основы теории цепей: Учебник [Текст] / Г. И. Атабеков. – СПб.: Лань, 2022. – 424 с.
2. Безотмывочные флюс F-355NVOC [Электронный ресурс] // URL: <https://qualitek.com/355nvoc.pdf> (дата обращения: 20.03.2024).
3. Бессвинцовая паяльная паста Indium 8.9HF [Электронный ресурс] // URL: <https://ostec-materials.ru/upload/iblock/3c1/3c14e1ace1c56cd57660a7c068-519318.pdf?ysclid=ltkxstq4d137801869> (дата обращения: 20.03.2024).
4. Биполярные и униполярные шаговые двигатели [Электронный ресурс] // URL: <https://electroprivod.ru/bipolar.htm> (дата обращения: 20.03.2024).
5. Битюков, В. К. Источники вторичного электропитания [Текст] / В. К. Битюков. – Вологда: Инфра-Инженерия, 2023. – 376 с.
6. Браухофф, П. Практические вопросы по электротехнике: Учебник [Текст] / П. Браухофф, Б. Фейстель, Т. Кепель. – К.: Фолиант, 2021. – 400 с.
7. Влагозащитный лак Plastic 70 [Электронный ресурс] // URL: <https://www.crcural.ru/pdf/KoC-Plastik-70.pdf?ysclid=ltksrkbnv496436753> (дата обращения: 20.03.2024).
8. Водовозов, А. И. Основы электроники: Учебное пособие [Текст] / А.И. Водовозов. – Вологда: Инфра-Инженерия, 2019. – 140 с.
9. Ивоботенко, Б. А. Дискретный электропривод с шаговыми двигателями [Текст] / Б. А. Ивоботенко, В. П. Рубцов, Л. А. Садовский и [др.]. – М.: Энергия, 1971. – 624 с.
10. Каталог товаров для производства электроники LionTech [Электронный ресурс] // URL: <https://liontech.ru/catalog/?ysclid=ltmkmb6c7g931003547> (дата обращения: 20.03.2024).
11. Кварцевый резонатор HC6U [Электронный ресурс] // URL: <http://static.chipdip.ru/lib/059/doc000059747.pdf> (дата обращения: 20.03.2024).

12. Кенио, Т. Шаговые двигатели и их микропроцессорные системы управления [Текст] / Т. Кенио. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 200 с.
13. Лыгин, М. М. Электротехника и основы электроники: Учебное пособие [Текст] / М. М. Лыгин, Г. П. Корнилов. – Вологда: Инфра-Инженерия, 2024. – 236 с.
14. Новиков, Ю. Н. Электрические цепи и сигналы. Базовые сведения, методы анализа процессов в цепях: Учебник [Текст] / Ю. Н. Новиков. – СПб.: Лань, 2022. – 356 с.
15. Операционный усилитель ОРА2277U [Электронный ресурс] // URL: <https://static.chipdip.ru/lib/627/DOC005627588.pdf> (дата обращения: 20.03.2024).
16. Припой SnAG4Cu0,5 [Электронный ресурс] // URL: <https://rms-ekb.ru/catalog/pripoi/pripoi-snag4-0cu0-5-1-mm-tu1723-001-503886-07-2019/?ysclid=ltksh27q1z86496321> (дата обращения: 20.03.2024).
17. Светодиоды серии GNL-3012xx [Электронный ресурс] // URL: <https://static.chipdip.ru/lib/773/DOC002773602.pdf> (дата обращения: 20.03.2024).
18. Смирнов, Ю. А. Основы микроэлектроники и микропроцессорной техники: Учебное пособие для СПО [Текст] / Ю. А. Смирнов, С. В. Соколов, Е. В. Титов. – СПб.: Лань, 2024. – 496 с.
19. Стабилизатор напряжения положительной полярности KP142EH5A [Электронный ресурс] // URL: <https://static.chipdip.ru/lib/542/DOC00354255-9.pdf> (дата обращения: 15.03.2024).
20. Тактовая кнопка ТС-0120 [Электронный ресурс] // URL: <https://static.chipdip.ru/lib/551/DOC001551910.pdf> (дата обращения: 20.03.2024).
21. Термисторы фирмы SIEMENS & MATSUSHITA [Электронный ресурс] // URL: <https://www.platan.ru/docs/bek/05.pdf?ysclid=lfpp0khams99469783> (дата обращения: 20.03.2024).

22. Техническая документация на микроконтроллер ATmega8 [Электронный ресурс] // URL: <https://www.farnell.com/datasheets/65559.pdf> (дата обращения: 20.03.2024).
23. Тюрин, И. В. Конструирование блоков радиоэлектронных средств: Учебное пособие [Текст] / И. В. Тюрин, Д. Ю. Муромцев, О. А. Белоусов. – СПб.: Лань, 2019. – 288 с.
24. Шаговые двигатели. Принцип работы и управление [Электронный ресурс] // URL: <https://darxton.ru/wiki-article/shagovye-dvigateli-printsip-raboty-i-upravlenie/> (дата обращения: 20.03.2024).
25. Шаговый двигатель FL86STH118-6004A [Электронный ресурс] // URL: <https://www.stepmotor.ru/catalog/shag/fl86st> (дата обращения: 20.03.2024).
26. Шунты измерительные стационарные 75ШИП, 75ШИП1, 75ШИМ [Электронный ресурс] // URL: <https://static.chipdip.ru/lib/308/DOC000308715-.pdf> (дата обращения: 20.03.2024).
27. Юрков, Н. К. Технология производства электронных средств: СПО [Текст] / Н. К. Юрков. – СПб.: Лань, 2021. – 474 с.
28. A Full Review of EasyEDA: A Circuit EDA Online Tool [Электронный ресурс] // URL: <https://atadiat.com/en/e-full-review-of-easyeda-circuit-eda-online-tool/?noamp=mobile> (дата обращения: 20.03.24).
29. Nassir H. Sabah, Electric Circuits and Signals 1st Edition // CRC Press; 1st edition December 19, 2017 p. 896.
30. Patrick T. Murphy, Evolution Motor Control Design, Design News, Vol. 64, Issue 7, Jul 1, 2009, p. 14.
31. PDIP Package [Электронный ресурс] // URL: <https://www.fs-pcba.com/pdip-package/> (дата обращения: 20.03.2024).
32. William H. Yeadon, Alan Yeadon, Handbook of Small Electric Motors // McGraw Hill; 1st edition May 14, 2001 p. 1040.