

Школа ИШЭ

Направление подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

Отделение школы (НОЦ) Электроэнергетики и электротехники

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы
Микропроцессорное управление маломощным синхронным двигателем на базе STM32

УДК 621.313.323:004.31

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5А6Ж	Тебин Алексей Алексеевич		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Шилин Александр Анатольевич	д.т.н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Концепция стартап-проекта»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН ШБИП	Вазим Андрей Александрович	к.э.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент ООД	Немцова Ольга Александровна			

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
13.03.02 Электроэнергетика и электротехника	Тютеева Полина Васильевна	к.т.н.		

Результаты обучения по направлению
13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

Код результата	Результат обучения
Р 1	Применять соответствующие гуманитарные, социально-экономические, математические, естественно-научные и инженерные знания, компьютерные технологии для решения задач расчета и анализа <i>электрических устройств, объектов и систем</i> .
Р 2	Уметь формулировать задачи в области <i>электроэнергетики и электротехники</i> , анализировать и решать их с использованием всех требуемых и доступных ресурсов.
Р 3	Уметь проектировать <i>электроэнергетические и электротехнические системы и их компоненты</i> .
Р 4	Уметь планировать и проводить необходимые экспериментальные исследования, связанные с определением параметров, характеристик и состояния электрооборудования, <i>объектов и систем электроэнергетики и электротехники</i> , интерпретировать данные и делать выводы.
Р 5	Применять современные методы и инструменты практической инженерной деятельности при решении задач в области <i>электроэнергетики и электротехники</i> .
Р 6	Иметь практические знания принципов и технологий <i>электроэнергетической и электротехнической</i> отраслей, связанных с особенностью проблем, объектов и видов профессиональной деятельности профиля подготовки на предприятиях и в организациях – потенциальных работодателях.
Р 7	Использовать знания в области менеджмента для управления комплексной инженерной деятельностью в области <i>электроэнергетики и электротехники</i>
Р 8	Использовать навыки устной, письменной речи, в том числе на иностранном языке, компьютерные технологии для коммуникации, презентации, составления отчетов и обмена технической информацией в областях <i>электроэнергетики и электротехники</i> .
Р 9	Эффективно работать индивидуально и в качестве члена или лидера команды, в том числе междисциплинарной, в области <i>электроэнергетики и электротехники</i> .
Р 10	Проявлять личную ответственность и приверженность нормам профессиональной этики и нормам ведения комплексной инженерной деятельности
Р 11	Осуществлять комплексную инженерную деятельность в области <i>электроэнергетики и электротехники</i> с учетом правовых и культурных аспектов, вопросов охраны здоровья и безопасности жизнедеятельности.
Р 12	Быть заинтересованным в непрерывном обучении и совершенствовании своих знаний и качеств в области <i>электроэнергетики и электротехники</i> .

Школа ИШЭ

Направление подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

Отделение школы (НОЦ) Электроэнергетики и электротехники

УТВЕРЖДАЮ:

Руководитель ООП

_____ Тютеева П.В.
 (Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

бакалаврской работы

(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
5А6Ж	Тебин Алексей Алексеевич

Тема работы:

Микропроцессорное управление маломощным синхронным двигателем на базе STM32	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	59-78/с от 28.02.2020

Срок сдачи студентом выполненной работы:	
--	--

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе <i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i>	Система управления маломощным синхронным двигателем электродвигателем на основе микроконтроллера STM32 с устройствами согласования: ручное и автоматическое управление ключами; управление скоростью и положением ротора.
Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов <i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i>	Титульный лист Задание Реферат Оглавление Введение Обзор существующих решений Обзор существующих составляющих систем с бесколлекторными двигателями Выбранная техническая реализация Программная часть Заключение Список литературы

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей)	Графики напряжения питания бесколлекторного двигателя, структурные схемы, принципиальные схемы
--	--

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы (с указанием разделов)	
Раздел	Консультант
Социальная ответственность	Немцова Ольга Александровна
Концепция стартап-проекта	Кандидат экономических наук Вазим Андрей Александрович
Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:	
Все разделы выпускной квалификационной работы написаны на русском языке	

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	10.02.2020
---	------------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Шилин Александр Анатольевич	д.т.н		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5А6Ж	Тебин Алексей Алексеевич		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«КОНЦЕПЦИЯ СТАРТАП-ПРОЕКТА»**

Студенту:

Группа	ФИО
5А6Ж	Тебин Алексей Алексеевич

Школа	ИШЭ	Отделение (НОЦ)	Электроэнергетики и электротехники
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/специальность	Электропривод и автоматика

Перечень вопросов, подлежащих разработке:	
Проблема конечного потребителя, которую решает продукт, который создается в результате выполнения НИОКР (функциональное назначение, основные потребительские качества)	Проблема недостаточной оснащенности лабораторий из-за высокой цены и ряда других факторов; удовлетворение потребностей мелких фирм в отладочной платформе
Способы защиты интеллектуальной собственности	Патентование
Объем и емкость рынка	На основе оценки рынок лабораторных стендов составляет 80 млн рублей в год
Современное состояние и перспективы отрасли, к которой принадлежит представленный в ВКР продукт	Отрасль лабораторных стендов в области электротехники стабильно развивается, по косвенным факторам можно установить дальнейшее развитие
Себестоимость продукта	Себестоимость продукта составила 1400 рублей
Конкурентные преимущества создаваемого продукта	Невысока цена, компактность, открытость программного обеспечения, гибкость структуры
Сравнение технико-экономических характеристик продукта с отечественными и мировыми аналогами	Существуют аналоги с подобным функционалом, но за цену в 7 раз больше предлагаемой в работе
Целевые сегменты потребителей создаваемого продукта	Мелкие и средние технические вузы, мелкие и средние научно-производственные компании
Бизнес-модель проекта	Сформирована модель по Остервальдеру
Производственный план	В сотрудничестве с НПО «ВЭСТ» первая партия продукта составит 25 штук
План продаж	За первый квартал первая партия будет реализована полностью
Перечень графического материала:	
При необходимости представить эскизные графические материалы(например, бизнес-модель)	Фотографии электротехнических стендов

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
---	--

Задание выдал со-руководитель (по разделу «Концепция стартап-проекта») ВКР:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Вазим Андрей Александрович	к.э.н, доцент		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5А6Ж	Тебин Алексей Алексеевич		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
5А6Ж	Тебину Алексею Алексеевичу

Школа	ИШЭ	Отделение (ноц)	Электроэнергетики и электротехники
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/специальность	Электропривод и автоматика

Тема ВКР:

Микропроцессорное управление маломощным синхронным двигателем на базе STM32	
Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:	
1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	Универсальный лабораторный стенд с бесколлекторным двигателем и микропроцессорным управлением, который питается от сети с напряжением 220 В. Проведение работ на испытательном стенде, предусматривается в аудиториях корпуса ТПУ.
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности: - специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; - организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.	Трудовой кодекс РФ от 30.12.2001 № 197-ФЗ; гигиенические требования по СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03; размещение рабочего места по ГОСТ 12.2.032-78 ССБТ; размещение элементов испытательного стенда, согласно ГОСТ 22614-77 и ГОСТ 12.2.003-91.
2. Производственная безопасность: 2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов 2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия	Анализ выявленных вредных и опасных факторов: отклонения показателей микроклимата; повышенный уровень шума; повышенный уровень вибрации; недостаточная освещенность помещения; повышенное значение напряжения; подвижные части стенда, вращающиеся на большой скорости.
3. Экологическая безопасность:	В разделе приведен анализ воздействия объекта исследования на атмосферу. Источником загрязнения в разрабатываемой системе является двигатель, которому требуется энергоснабжение.
4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:	При разработке и эксплуатации могут возникнуть следующие чрезвычайные ситуации:

	пожар; электропоражение током.
--	-----------------------------------

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
--	--

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Немцова Ольга Александровна			

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5А6Ж	Тебин Алексей Алексеевич		

Реферат

Выпускная квалификационная работа 102 страницы, 42 рисунка, 9 таблиц, 38 источников, 11 листингов.

Ключевые слова: микропроцессорное управление, бесколлекторный двигатель постоянного тока, синхронный двигатель с постоянными магнитами, микроконтроллер, CubeMX.

Цель работы – разработка микропроцессорной системы управления маломощным синхронным электродвигателем.

В процессе разработки был проведен выбор микроконтроллера в соответствии с предъявляемыми критериями, рассчитаны параметры полупроводникового коммутатора, спроектированы устройства согласования, индикации и управления.

Составлена принципиальная схема устройства, на ее основе разведена печатная плата. Произведен монтаж и наладка системы управления. Работа устройства соответствует необходимым режимам.

Область применения – лаборатории вузов и производственных компаний.

Экономическая эффективность заключается в невысокой общей стоимости, и как следствие невысокая цена с сохранением функций конкурентов. Что делает разрабатываемое устройство привлекательным к покупке.

Оглавление

Введение.....	14
1 Обзор существующих решений	16
2 Обзор существующих составляющих систем с бесколлекторными двигателями	18
2.1 Состав и особенности бесколлекторных двигателей постоянного тока	
18	
2.2 Особенности силовых полупроводниковых коммутаторов.....	21
2.3 Способы определения положения ротора.....	22
2.4 Источник питания.....	24
3 Выбранная техническая реализация.....	25
3.1 Структурная схема.....	25
3.2 Выбор микроконтроллера.....	26
3.3 Выбор двигателя	28
3.4 Выбор силовых элементов.....	29
3.5 Устройства согласования.....	33
3.6 Органы индикации и управления.....	40
3.7 Блок питания	45
3.8 Принципиальная схема	45
4 Программная часть.....	47
4.1 Выбор программных продуктов.....	47
4.2 Конфигурация портов ввода вывода	49
4.2.1 Конфигурация портов для работы с индикацией	50
4.2.2 Конфигурация портов для работы с кнопками.....	53
4.2.3 Конфигурация портов при работе с энкодером.....	55

4.2.4 Конфигурация портов при работе с трехфазным двигателем

60

5	Концепция стартап-проекта	65
5.1	Название	65
5.2	Описание продукта как результата НИР.....	65
5.3	Интеллектуальная собственность	67
5.4	Объем и емкость рынка.....	67
5.5	Анализ современного состояния и перспектив развития отрасли	69
5.6	Планируемая стоимость продукта	69
5.7	Конкурентные преимущества создаваемого продукта в сравнении с технико-экономическими характеристиками отечественных и мировых аналогов	73
5.8	Целевые сегменты потребителей	75
5.9	Бизнес-модели проекта. Производственный план и план продаж	76
5.10	Стратегия продвижения продукта на рынок	77
6	Социальная ответственность	78
	Введение	78
6.1	Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности ...	78
6.2	Производственная безопасность.....	79
6.2	Отклонение параметров микроклимата	80
6.3	Повышенный уровень шума на рабочем месте	81
6.4	Повышенный уровень вибрации на рабочем месте	82
6.5	Недостаточная освещенность на рабочем месте	84
6.6	Электробезопасность.....	84
6.7	Требования во время работы испытательного стенда	85

6.8	Экологическая безопасность	86
6.8.1	Анализ влияния объекта исследования на окружающую среду и «жизненного цикла»	86
6.9	Обоснование мероприятий по защите окружающей среды	87
6.10	Безопасность в чрезвычайных ситуациях	88
6.10.1	Анализ ЧС, которые может инициировать объект исследования.....	88
6.10.2	Анализ ЧС, которые могут произойти во время исследования.....	88
6.10.3	Мероприятия для предотвращения ЧС и их устранения...	88
6.11	Выводы по разделу	90
	Заключение по работе	91

Список основных сокращений

БДПТ – бесколлекторный двигатель постоянного тока;

АИН – автономный инвертор напряжения;

ШИМ – широтно-импульсная модуляция.

Ведение

Ни для кого не секрет, что в настоящий момент основное развитие электрооборудования в области электромеханических преобразователей энергии направлено на повышение энергоэффективности и снижение затрат на пуск, наладку и обслуживание такой техники.

Основной тенденцией снижения затрат на ввод в эксплуатацию и текущее содержание электродвигателей является замена некогда распространенных коллекторных машин на бесколлекторные электрические машины. В большинстве случаев обслуживание таких электродвигателей необходимо только механической части – втулкам, подшипникам, в отличие от коллекторных машин, где большое количество неисправностей приходится на долю щеточно-коллекторного узла [1].

Из теории электрических машин известно, что создания вращающего момента необходимо взаимодействие двух магнитных полей, один из источников которого должен находиться на роторе. Именно с целью создания источника электромагнитного поля необходимо подводить электрическую энергию к вращающемуся ротору в коллекторных машинах.

Основными представителями бесконтактных машин являются асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором, синхронные машины и машины постоянного тока с постоянными магнитами или индукторного типа. Как уже было сказано, данные типы двигателей не имеют в своей конструкции скользящих или щеточных контактов для передачи электрической энергии к роторной обмотке.

Несомненно, на фоне всего многообразия производственных процессов и исполнительных органов, приводимых в движение электродвигателем, важна высокая квалификация специалиста, обслуживающего электрооборудование. Основу подобной подготовки составляет получение профессионального образования в данной области.

В настоящее время в ходе подготовки специалистов не составляет труда демонстрация основных принципов устройства, управления, наладки и обслуживания электроприводов с асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором. Чего нельзя сказать о системах с бесколлекторными двигателями постоянного тока, стендов для изучения которых мало, а цена их высока.

Целью данной работы является проектирование и создание лабораторного стенда для изучения принципов управления бесколлекторным двигателем постоянного тока малой мощности.

1 Обзор существующих решений

В области изучения бесколлекторных двигателей с микропроцессорным управлением представлено порядка 3-4 моделей стендов. Они имеют схожий функционал, габариты, комплектацию и цену.

Рассмотрим наиболее популярные и функциональные продукты по наиболее крупным и значимым факторам – таблица 1.1.

Таблица 2.1 – Сравнение существующих моделей

Производитель и модель	Возможность изучать		Открытая программная платформа	Гибкость структуры	Цена, руб
	бесколлекторный двигатель	микропроцессорное управление			
ГалСен ИБДПТ1-Н-К [галсен]	+	-	-	-	147000
МЕХАТРОНИКА-ПРО «К» с МСВ-04 [мехатроника]	+	+	+	-	160900
МПСУ2-ВД-МН [лабстенд]	+	+	-	-	137650

Наиболее полное описание и сравнение с точки зрения экономических и потребительских характеристик приставлено в главе 5.

Как видно, все модели предоставляют возможность изучать принципы работы и управления бесколлекторными двигателями. Также ряд стендов позволяет изучать микропроцессорное управление. Основным недостатком всех моделей является высокая цена и жесткость структуры и, для некоторых моделей закрытость программной части устройства.

Учитывая современные тенденции развития электропривода, все больше систем с электродвигателями оснащаются микропроцессорным управлением. С другой стороны, работа бесколлекторного двигателя постоянного тока невозможна без полупроводникового коммутатора, который легче и нагляднее реализовать при помощи микропроцессорного управления. Поэтому в

настоящий момент использование стендов для изучения бесколлекторных двигателей без возможности исследования микропроцессорного управления нецелесообразно.

Отметим, что закрытая программная платформа вынуждает конечного пользователя использовать только установленное производителем программное обеспечение для работы с устройством. Данный факт в условиях широкого разнообразия контроллеров и программных продуктов для работы с ними ограничивает возможность в достаточном объеме изучить средства для работы с микроконтроллерами. Это является одним из недостатков использования подобных стендов.

2 Обзор существующих составляющих систем с бесколлекторными двигателями

Системы с бесколлекторными двигателями постоянного тока, как и любые другие системы электропривода, имеют свои особенности, которые необходимо учитывать при проектировании. Они связаны со спецификой работы и управления данного типа двигателей. Вариант схемы для управления БДПТ представлен на рисунке 2.1.

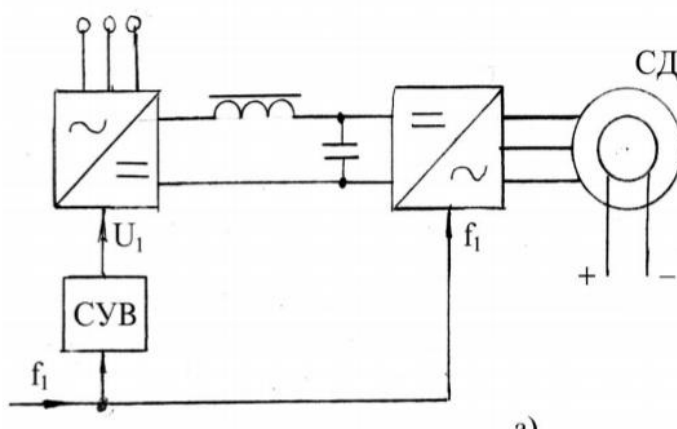


Рисунок 2.1 – Вариант схемы управления бесколлекторным двигателем

Здесь сетевое напряжение поступает на управляемый выпрямитель. После чего выходное напряжение выпрямителя проходит через фильтр, который снижает пульсации напряжения после выпрямителя. Далее выпрямленное и сглаженное напряжение поступает на вход коммутатора, где преобразуется в переменное напряжение с необходимыми характеристиками, которое поступает на выводы бесколлекторного двигателя.

Рассмотрим основные составляющие и особенности системы управления бесколлекторным двигателем постоянного тока.

2.1 Состав и особенности бесколлекторных двигателей постоянного тока

Основные особенности реализуемой системы определяет используемый двигатель.

Все многообразие бесконтактных электрических машин описывается и основано в основном на процессах, присущих синхронным или асинхронным машинам. Рассмотрим общую классификацию бесконтактных машин, представленную в [1] – рисунок 2.2.



Рисунок 2.2 – Классификация бесконтактных электрических машин

Как видно из рисунка, видов бесконтактных электрических машин достаточно много. Основой для разделения, в первую очередь, служит конструкция машины. В частности, конструкция ротора, так как в общем случае состав и принцип действия статора схож для данных типов электродвигателей.

На конструкциях асинхронных и специальных типов бесконтактных электрических машин останавливаться не будет, так как они не являются предметом данной работы.

Стоит отметить, что конструкция синхронного двигателя с постоянными магнитами и бесколлекторного двигателя постоянного тока практически идентичны. Разница этих машин обуславливается формой противо-ЭДС: в синхронном – синусоидальная, в двигателе постоянного тока – трапецеидальная.

БДПТ имеют на статоре обмотку, обычно уложенную в пазах стального шихтованного сердечника, на роторе – магнитные полюса.

Рассмотрим работу БДПТ в двигательном режиме.

Трапецеидальное пульсирующее напряжение прикладывается к обмоткам статора и создает вращающееся магнитное поле, полюса которого притягивают полюса ротора с противоположной полярностью, что приводит к вращению и образованию полезного момента на валу машины. Форма напряжения представлена на рисунке 2.3.

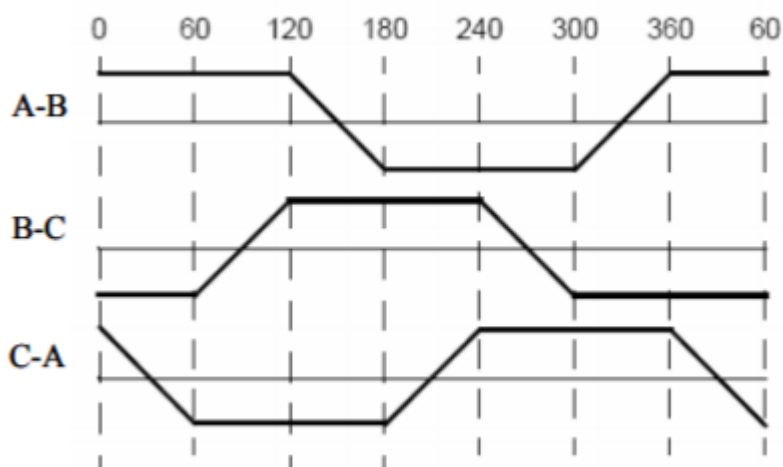


Рисунок 2.3 – Форма линейных напряжения БДПТ

Отсюда вытекают следующие особенности построения системы управления, которые необходимо учитывать при проектировании:

- необходимо прикладывать прямоугольное (трапецеидальное) напряжение к обмоткам двигателя, что обуславливает невозможность подключения двигателя напрямую к промышленной сети синусоидального напряжения и создает необходимость в специализированном устройстве для формирования данного типа напряжения;
- для эффективной работы системы необходимо знать положение полюсов ротора относительно обмоток статора, чтобы коммутация происходила таким образом, чтобы обеспечить необходимый момент и скорость. Это обуславливает использование полупроводникового коммутатора и необходимость наличия информации о положении ротора в системах с бесколлекторными двигателями постоянного тока;

- частота питающего напряжения пропорциональна частоте вращения вала двигателя.

2.2 Особенности силовых полупроводниковых коммутаторов

Наибольшее распространение для создания напряжения необходимой формы в системах с БДПТ получила мостовая схема коммутатора, представленная на рисунке 2.4 [2].

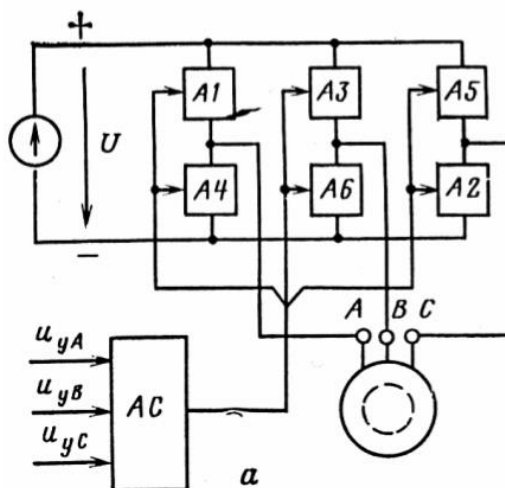


Рисунок 2.4 – Схема главных цепей БДПТ, питаемого от АИН

Данная схема представляет из себя автономный инвертор напряжения. В случае питания трехфазного двигателя необходимо шесть полностью управляемых ключей, которые для защиты от перенапряжений шунтируются диодами, включенными в обратном направлении.

Рассмотрим работу данной схемы.

Каждая пара ключей (A1-A4, A3-A6, A5-A2) переключается с определенной периодичностью, что в свою очередь формирует потенциал их средней точки, который зависит от относительной продолжительности включения ключей. В соответствии с этим, форма напряжения зависит от изменения соотношения времени проводящего состояния ключей.

Данная схема позволяет формировать различные виды напряжения. На рисунке 2.5 представлены два случая: при постоянном отношении проводящих состояний и переменном отношении, которое получается в результате

управления ключами с помощью широтно-импульсной модуляции синусоидального сигнала.

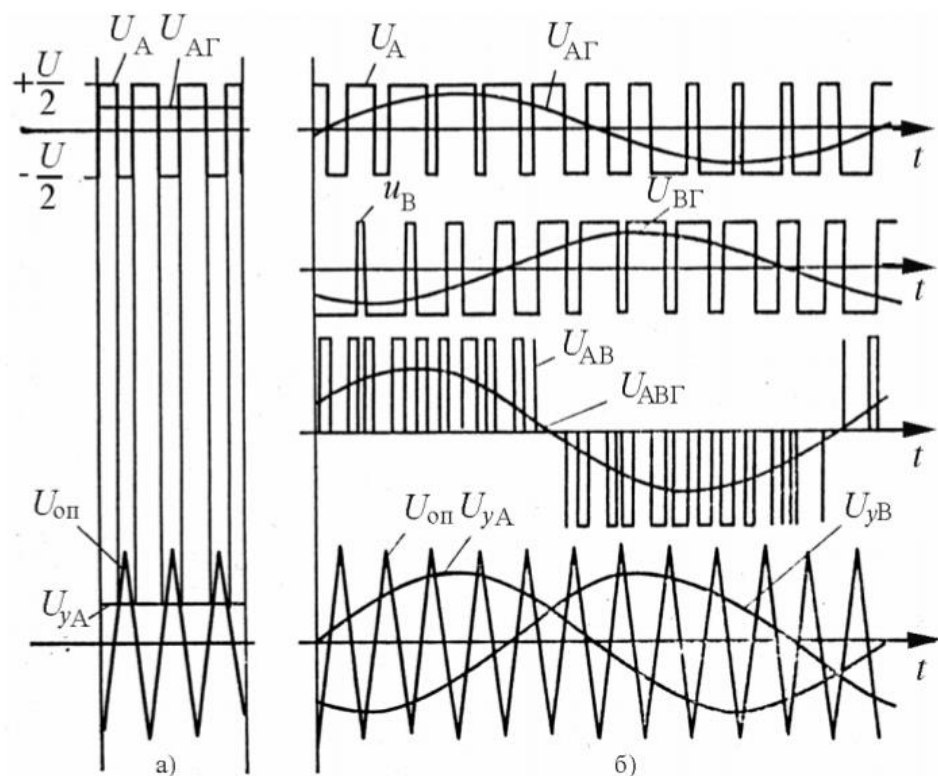


Рисунок 2.5 – Временная диаграмма работы АИН с ШИМ

Таким образом для питания БДПТ необходим полупроводниковый коммутатор с установленной структурой, которые дает возможность изменять форму и частоту питающего напряжения, что в свою очередь отражается на механических характеристиках двигателя.

2.3 Способы определения положения ротора

Как уже было сказано, для эффективной работы системы с БДПТ необходимо обладать информацией о положении вала двигателя, а в частности полюсов ротора, относительно полюсов статора.

Основным и самым распространенным способом получения информации является оснащение двигателя датчиками положения ротора. Как правило, производитель оснащает ими двигатель непосредственно при выпуске.

Но зачастую конечное исполнение системы управления может не содержать данных датчиков. В таком случае для получения информации используют несколько способов [3].

Для оценки скорости и положения ротора используются математические наблюдатели, которые на основе информации о мгновенных значениях тока и напряжения фаз двигателя определяют электрическое положение ротора двигателя по направлению изображающего вектора составляющей магнитного потокосцепления якоря, обусловленной постоянными магнитами

Данный метод требует больших вычислительных мощностей, что представляет трудность в реализации даже с использованием современных сигнальных процессоров. Однако при правильной настройке и максимально достоверной информации о параметрах двигателя такой метод обеспечивает достаточную точность при определении положения ротора.

Также из-за специфики работы и управления БДПТ существует возможность косвенно анализировать ЭДС фазы двигателя, которая в данный момент не подключена к источнику питания. Коммутация токов двигателя осуществляется путем фиксации момента перехода через ноль ЭДС отключенной фазы, который со сдвигом на 90 электрических градусов определяет середину соответствующего импульса тока.

Данный способ является относительно простым, но имеет ряд недостатков и ограничений:

- сложность отслеживания уровня ЭДС при малых скоростях вращения вала двигателя;
- точно сформировать сигналы управления возможно лишь при постоянной скорости вращения.

Однако в относительно простых системах допускается и отсутствие информации о положении ротора совсем. В таком случае система управления выполняет коммутацию фаз двигателя «в слепую» – предполагается, что ротор будет следовать за коммутацией. Такой способ успешно реализуется в системах, где момент нагрузки мал при низкой частоте вращения, к примеру,

нагрузки вентиляторного характера [4]. Для механизмов с высокой начальной нагрузкой такой способ не подходит.

2.4 Источник питания

Для работы системы необходимо, чтобы на коммутатор поступало постоянное напряжение с необходимыми параметрами. Основными параметрами для выбора или расчета источника питания являются выходное напряжение и мощность.

При разработке промышленных систем управления БДПТ совместно с коммутатором разрабатываются и системы его питания. Также могут применяться и готовые источники постоянного напряжения, но для лучшей совместимости элементов схемы и повышения эффективности использования системы в общем, целесообразнее проектировать устройства совместно.

3 Выбранная техническая реализация

В соответствии с техническим заданием определим структуру и состав реализуемой системы. Также стоит иметь в виду возможный массовый выпуск и коммерциализацию разрабатываемого продукта.

При выборе комплектующих необходимо учитывать, то, что монтаж элементов будет происходить вручную, а общие размеры печатной платы должны быть минимальны.

3.1 Структурная схема

Была выбрана следующая структурная схема для реализации в данной работе – рисунок 3.1.

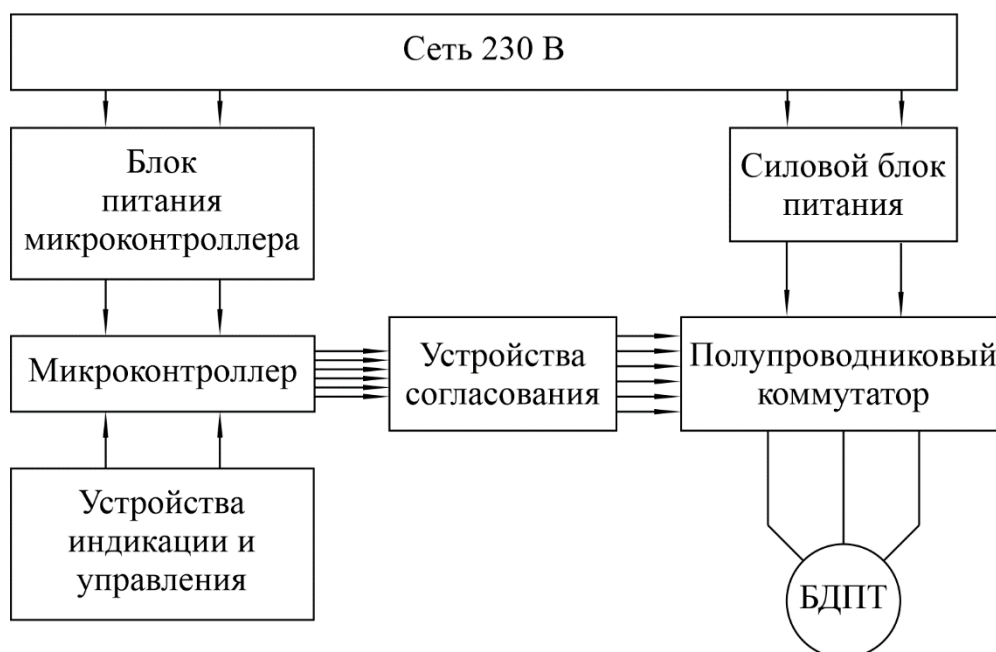


Рисунок 3.1 – Структурная схема разрабатываемого устройства

Здесь сетевое напряжение поступает на бытовой блок питания, который преобразует его в постоянное напряжение определенного значения. Далее выпрямленное напряжение поступает на вход силового полупроводникового коммутатора, который под действием управляющих сигналов с микроконтроллера, поступивших через устройства согласования, обеспечивает на своем выходе напряжение необходимой формы и частоты. Это напряжение подводится к выводам статорных обмоток БДПТ.

Основу системы управления составляет микроконтроллер, который формирует сигналы для открытия транзисторов, считывает состояние органов управления, выводит необходимую информацию в органы индикации. Питается от отдельного блока питания или компьютера.

Управление режимами работы коммутатора производится с помощью кнопок и специализированного инкрементального механического энкодера, которые подключены к микроконтроллеру. Индикация режимов работы происходит посредством светодиодов, которые также подключены к микроконтроллеру. Информация о состоянии каждого ключа считывается пользователем с соответствующего светодиода, который работает синхронно с полупроводником.

3.2 Выбор микроконтроллера

В настоящий момент рынок микроконтроллеров насчитывает сотни моделей с различным функционалом. Сформируем основные требования к микроконтроллеру.

Главной задачей контроллера в данной работе является формирование управляющих сигналов на своих выходах для регулирования режимов работы трехфазного двигателя в соответствии с каким-либо законом управления, которое через элементы согласования поступает на управляющий вывод силовых ключей, через которые питается двигатель. Для этого необходимо формирование импульсов различной длительности, параметры которых изменяются по определенному алгоритму управления. Частным случаем такого сигнала является ШИМ-сигнал, широко применяемый при реализации управления двигателями.

До недавнего времени эту задачу могли решить только специализированные цифровые сигнальные процессоры, разрабатываемые для управления силовыми преобразователями энергии. Применение данного устройства в системах электропривода требует специализированных знаний в области работы с сигнальными процессорами.

На данный момент существуют микроконтроллеры общего назначения, имеющие в своей аппаратной структуре специальные инструменты для формирования необходимых сигналов. Таймерный способ реализации управляющих сигналов является более простым как с точки зрения построения и проектирования системы управления, так и со стороны работы микроконтроллера. Более подробно принцип работы описан в главе 4.

Для управления режимами, навигации и индикации контроллер должен иметь цифровые входы в достаточном количестве, к которым подсоединены кнопки, а также цифровые выходы, к которым будут подсоединены светодиоды. Реализация данных органов управления и сигнализации так же должна быть с использованием наименьшего возможного числа компонентов.

На основе требований был выбран микроконтроллер семейства STM 32 серии F103, который обладает следующими характеристиками – таблица 3.1 [5].

Таблица 3.1– Основные характеристики микроконтроллера

Характеристика	Значение
Ядро	ARM 32 Cortex-M3
Рабочая частота	72 МГц
Память программ	64 КБ
Память данных	20 КБ
АЦП	12 бит × 10
ЦАП	8/12 бит × 2
Таймеры общего назначения	3 шт.
Расширенный таймер для ШИМ управления двигателем	1 шт.
Порты ввода-вывода	37 шт.
Максимальный вытекающий ток вывода	25 мА
Общий вытекающий или втекающий ток портов	Не более 150 мА.
Напряжение питания:	2,0-3,6 В

Так же отметим, что относительно программирования и использования данного контроллера существует большое количество информации в литературе и сети Интернет, а сам процесс разработки и реализации программ является несложным относительно некоторых других микроконтроллеров, что является дополнительным преимуществом.

3.3 Выбор двигателя

Бесколлекторные двигатели достаточно давно и широко проникли в нашу жизнь. К примеру, классический бесколлекторный двигатель с постоянными магнитами приводит во вращение шпиндель жесткого диска для хранения информации – рисунок 3.2.



Рисунок 3.2 – Жесткий диск 3.5”

Отметим так же, что данное устройство оснащено жестким металлическим корпусом со стандартными крепежными отверстиями. Это делает возможным использовать его с некоторыми модификациями как платформу для монтажа остальной части устройства.

Несмотря на свои небольшие размеры, для него справедливы все принципы и законы управления, которые относятся к БДПТ.

В жестких дисках присутствуют трех или четырех выводные двигатели, где в обоих типах три контакта отвечают за начала обмоток, соединенных звездой, а четвертый контакт – конец обмоток – рисунок 3.3.

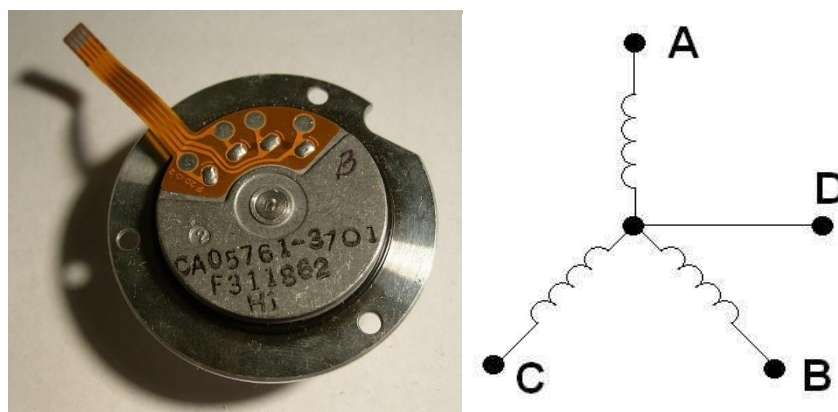


Рисунок 3.3 – Двигатель жесткого диска и схема выводов обмоток

В данной работе используется двигатель от жесткого диска со следующими параметрами [6] – таблица 3.2.

Таблица 3.2 – Параметры двигателя

$U_{д.н}, В$	$I_{д.н}, А$	$P_{д.н}, Вт$	$c, мНм/А$	$R_l, Ом$	$L_l, мкГн$	$n_0, об/мин$
12	0,37	4	7,5	2	18	10000

В соответствии с параметрами двигателя необходимо рассчитать элементы полупроводникового коммутатора.

3.4 Выбор силовых элементов

Основными параметрами при выборе транзисторов служат максимальное напряжение сток-исток (коллектор-эмиттер) и максимальный допустимый ток открытого канала. Должны выполняться следующие неравенства [7]:

$$U_{СИ(КЭ)max} + \Delta U_Q \leq U_{СИ(КЭ)ном},$$

$$I_{С(К)max} \leq I_{С(К)ном},$$

где $U_{СИ(КЭ)max}$ – максимальное значение напряжение перехода сток-исток (коллектор-эмиттер);

ΔU_Q – максимальное значение перенапряжения;

$U_{СИ(КЭ)ном}$ – номинальное напряжение перехода сток-исток (коллектор-эмиттер);

$I_{C(K)max}$ – максимальное значение тока через переход сток-исток (коллектор-эмиттер);

$I_{C(K)ном}$ – номинальный ток силового ключа.

При питании данного двигателя через коммутатор на транзисторах:

$$I_{C(K)max} = \frac{P_{н.д} \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot \sqrt{2}}{\eta \cdot \cos\varphi \cdot \sqrt{3} \cdot U_{н.д}},$$

где $k_1 = 1,2 - 1,5$ – коэффициент допустимой кратковременной перегрузки по току, необходимый для обеспечения необходимой динамики электропривода;

$k_1 = 1,1 - 1,2$ – коэффициент мгновенной допустимой пульсации тока;

η – КПД двигателя;

$\cos\varphi$ – коэффициент мощности двигателя.

Так как выбранный двигатель не является стандартным, точные значения КПД и коэффициента мощности не установлены, но известно, что минимальные значения данных параметров для маломощных БДПТ следующие:

$$\eta = 0,5,$$

$$\cos\varphi = 0,45.$$

Данный вариант является наихудшим и обеспечивает наибольший ток потребления двигателя. С учетом малой мощности, неизвестных действительных параметров и специфики разрабатываемого стенда примем эти значения при расчете. Тогда максимальный ток через транзистор:

$$I_{C(K)max} = \frac{P_{н.д} \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot \sqrt{2}}{\eta \cdot \cos\varphi \cdot \sqrt{3} \cdot U_{н.д}} = \frac{4 \cdot 1,1 \cdot 1,2 \cdot \sqrt{2}}{0,5 \cdot 0,4 \cdot \sqrt{3} \cdot 12} = 1,6 \text{ А.}$$

Значения перенапряжения примем:

$$\Delta U_Q = 0 \text{ В.}$$

Тогда условия выбора силовых ключей:

$$U_{д.н} \leq U_{СИ(КЭ)ном},$$

$$12 \text{ В} \leq U_{СИ(КЭ)ном},$$

$$1,6 \text{ А} \leq I_{C(K)ном}.$$

Также для протекания тока обратной полярности при закрытом транзисторе необходимы обратные диоды, основания для выбора которых аналогичны транзисторам:

$$U_{VDmax} + \Delta U_{QD} \leq U_{VDном},$$

$$I_{VDmax} \leq I_{VDном},$$

где U_{VDmax} – максимальное значение обратного напряжения;

ΔU_{QD} – значение перенапряжения;

$U_{VDном}$ – номинальное значение обратного напряжения;

I_{VDmax} – максимальное значение тока через диод;

$I_{VDном}$ – номинальный ток диода.

Для выбранной схемы:

$$U_{VDmax} = U_{СИ(КЭ)max} = 12 \text{ В},$$

$$I_{VDmax} = I_{С(К)max} = 1,6 \text{ А}.$$

При выборе силовых ключей необходимо учесть, что управлять ими будет микроконтроллер, который может обеспечить выходное напряжение на уровне 3,3 В на своих цифровых выходах. Несмотря на то, что в подобных случаях можно воспользоваться согласующими устройствами для управления силовыми ключами посредством микроконтроллера, целесообразнее подобрать такие транзисторы, управление которыми минимизировало бы элементную базу всего устройства.

С другой стороны, габариты транзистора должны позволять проводить ручной монтаж и иметь как можно меньшие размеры.

С учетом составленных требований выберем двухтранзисторную сборку IRF7309 в корпусе SO-8 со встроенным обратным диодом – рисунок 3.4 [8].

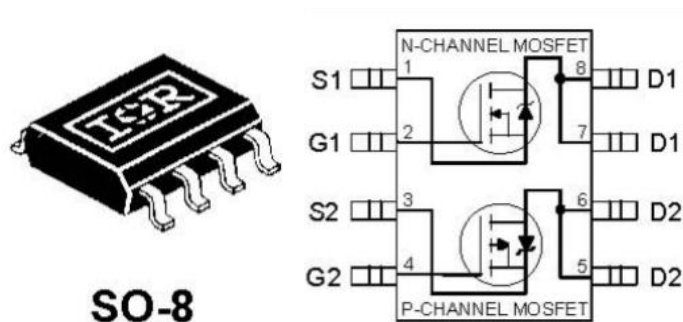


Рисунок 3.4 – Корпус транзистора и его структура

Данное устройство имеет в своем составе два транзистора – N и P канальные. Основные характеристики приведены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Основные характеристики силового транзистора

Характеристика	Обозначение	N-канальный транзистор	P-канальный транзистор
Допустимый длительный ток стока, А	I_C	4	-3
Допустимое напряжение сток-исток, В	$U_{СИ}$	30	-30
Максимальное напряжение затвор-сток, В	$U_{ЗС.мах}$	20	20
Сопротивление открытого канала, Ом при	$R_{СИ\text{ откр}}$	0,08	0,16
Пороговое напряжение транзистора, В	$U_{ЗИ\text{ пор}}$	1	-1
Рассеиваемая мощность, Вт	$P_{рас}$	1,4	1,4
Задержка на включение, нс	$t_{зд.вкл}$	6,8	11
Время нарастания, нс	$t_{нр}$	21	17
Задержка на выключение, нс	$t_{зд.выкл}$	22	25
Время спада, нс	$t_{сп}$	7,7	18
Входная емкость, нФ	$C_{вх}$	520	440

Из анализа характеристик следует, что данная транзисторная сборка может быть включена на напряжение до ± 30 вольт и пропускать длительный ток при нормальной температуре до 4 ампер для N-канала и до -3 ампер для P-канала. Пороговое значение напряжения управления, при котором транзистор считается открытым составляет 1 вольт.

Тогда выполняются условия:

$$U_{си\max} \leq U_{си},$$

$$12\text{В} \leq 30\text{В};$$

$$I_{с\max} \leq I_{с},$$

$$1,6 \leq 4 (3)\text{А}.$$

что делает транзистор пригодным по силовым параметрам для использования в коммутаторе.

Подключение затворов необходимо выполнять к специализированным выводам микроконтроллера. Такими выводами являются порты специального расширенного таймера для управления трехфазным двигателем – PB13-PB15 для N-канальных транзисторов и PA8-PA10 для P-канальных.

3.5 Устройства согласования

Несмотря на все меры по минимизации элементной базы путем подбора соответствующих ключей и микроконтроллера, необходимы дополнительные компоненты для согласования выходов контроллера с управляющими контактами транзисторов.

Рассмотрим N-канальный транзистор плеча.

Для управления таким транзистором необходимо подавать на затвор положительный потенциал относительно истока. Выбранный микроконтроллер может обеспечить такой сигнал на своем выходе. Из-за специфики строения p-n перехода затвор полевого транзистора обладает емкостью, заряд которой происходит при подаче напряжения управления – рисунок 3.5 [9].

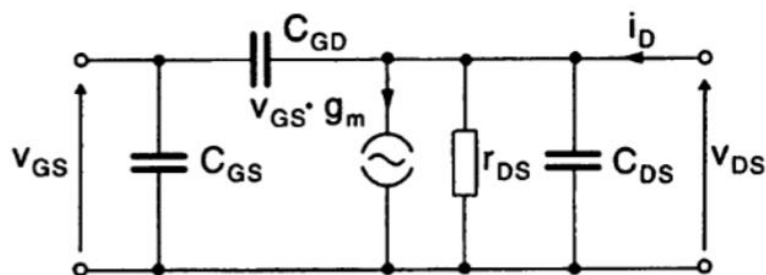


Рисунок 3.5 – Эквивалентная схема полевого транзистора

Величина данной емкости:

$$C = C_{зи} + C_{зс}$$

При подаче напряжения на разряженный конденсатор в первый момент времени он представляет из себя короткую, что приводит к большому скачку тока, потребляемого от источника питания. В случае подключения затвора транзистора к выводу микроконтроллера источником питания являются его выходные цепи. В данном случае нагружаются два транзистора, которые управляют состоянием выхода микроконтроллера – рисунок 3.6 [5].

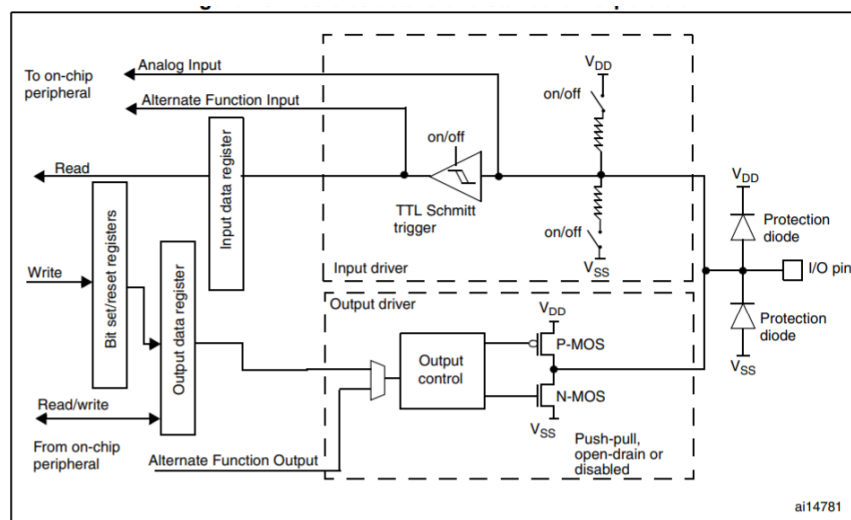


Рисунок 3.6 – Рисунок структура вывода микроконтроллера

Ток заряда при некоторой емкости может доходить до критических для микроконтроллера значений. Несмотря на внутреннее токовое ограничение самого контроллера, необходимо ограничить зарядный ток до величины рекомендованной производителем микроконтроллеров – 20 мА. Для этого подключим активное сопротивление между выводом микроконтроллера и затвором транзистора.

Рассчитаем ограничительный резистор затвора по формуле:

$$R_{з.огр} = \frac{U_{упр}}{I_{вых.мах}},$$

где $U_{упр} = 3,3 \text{ В}$ – напряжение на выходе микроконтроллера при подаче сигнала управления;

$I_{\text{вых.мах}} = 20 \cdot 10^{-3} \text{ А}$ – максимальный выходной ток микроконтроллера для одного вывода.

Тогда

$$R_{\text{з.огр}} = \frac{U_{\text{упр}}}{I_{\text{вых.мах}}} = \frac{3,3}{20 \cdot 10^{-3}} = 165 \text{ Ом.}$$

Выберем SMD резистор из ряда E24 с сопротивлением

$$R_{\text{з.огр}} = 180 \text{ Ом,}$$

тогда ток, потребляемый от микроконтроллера и мощность рассеиваемая на резисторе:

$$I_{\text{вых.мк}} = \frac{U_{\text{упр}}}{R_{\text{з.огр}}} = \frac{3,3}{180} = 0,018 \text{ А,}$$

$$P_{\text{з.огр}} = I_{\text{вых.мк}}^2 \cdot R_{\text{з.огр}} = 0,018^2 \cdot 180 = 0,058 \text{ Вт.}$$

Таким образом, для соблюдения теплового режима работы резистора необходимо выбрать типоразмер от 1005 [10] и выше. Для более простого монтажа используем резисторы типоразмера 3216.

С другой стороны, увеличение входного сопротивления ведет к снижению скорости нарастания напряжения на затворе транзистора [11]. Оценим влияние рассчитанного сопротивления на скорость нарастания напряжения до порогового значения $U_{\text{зи.пор}}$ полевого транзистора согласно его техническим характеристикам. Для этого проанализируем функцию напряжения конденсатора от времени:

$$U_C(t) = U_{\text{нач}} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right),$$

где $U_C(t)$ – напряжение на конденсаторе в момент времени t от начала процесса;

$U_{\text{нач}} = 3,3 \text{ В}$ – напряжение, приложенное к конденсатору;

$\tau = R \cdot C$ – постоянная времени RC -цепочки.

Выразим время из данной функции:

$$t = -\ln\left(1 - \frac{U_C(t)}{U_{\text{нач}}}\right) \cdot \tau,$$

при $U_C(t) = U_{\text{зи.пор}} = 1 \text{ В}$, $C = C_{\text{вх}} = 520 \text{ нФ} = 520 \cdot 10^{-12} \text{ Ф}$ получим:

$$t = -\ln\left(1 - \frac{1}{3,3}\right) \cdot 180 \cdot 520 \cdot 10^{-12} = 33,97 \cdot 10^{-9} \text{ с.}$$

Данное время необходимо, чтобы при заданных параметрах на затворе транзистора сформировалось напряжение равное одному вольту.

Так же при работе с полевыми транзисторами в период отсутствия управляющего сигнала не следует оставлять затвор в «подвешенном» состоянии, то есть не подключенным куда-либо. Так как данный транзистор N-типа и проводящему состоянию соответствует положительный потенциал относительно истока, через резистор с сопротивлением порядка десятка килоом [12] соединим затвор транзистора с «землей» (выполним «подтяжку»).

Таким образом, конечная принципиальная схема для управления транзистором N-типа в каждом плече коммутатора представлена на рисунке 3.7.

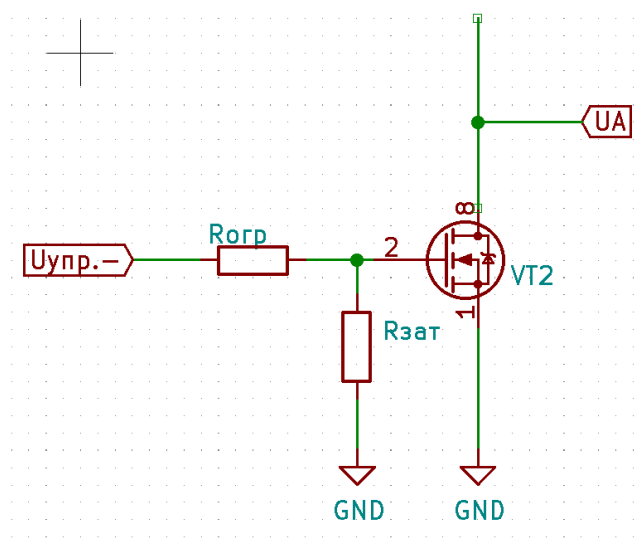


Рисунок 3.7 Схема управления N-канальным транзистором

Опишем согласующие устройства для P-канального транзистора.

Для управления транзистором с данным типом проводимости необходимо подавать на затвор отрицательное напряжение относительно истока. Выбранный микроконтроллер не может обеспечить на своих выводах

такое напряжение. В таких случаях используют систему с внешним «открытым коллектором» - рисунок 3.8 [13].

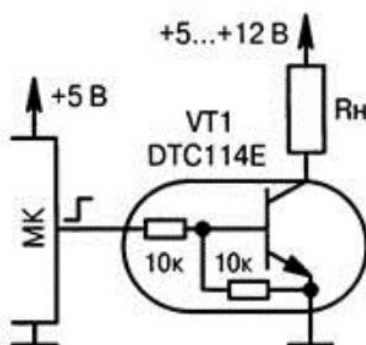


Рисунок 3.8 – Схема с внешним «открытым коллектором»

Здесь к выходу микроконтроллера подключена через токоограничивающий резистор база так называемого «цифрового» ключа. Такое соединение позволяет подключать нагрузку к общему контакту.

Так как подобное распространено при построении систем с микроконтроллерным управлением, производители полупроводниковых приборов поставляют готовые специализированные устройства. Одним из таких является транзистор BCR533. Выполнен в корпусе SOT23 и имеет в своем составе следующую структуру – рисунок 3.9 [14].

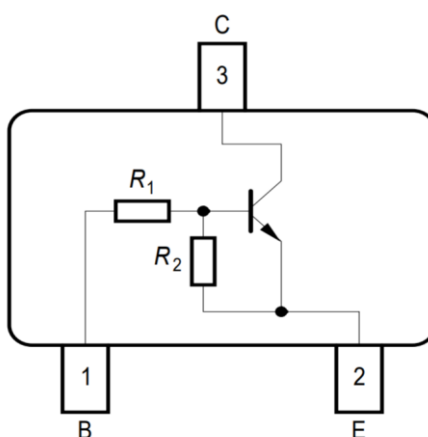


Рисунок 3.9 – Состав транзистора

Основные характеристики транзистора представлены в таблице 3.5.

Таблица 3.4 – Характеристики «цифрового» ключа

Характеристика	
Напряжение коллектор-эмиттер, В	50
Напряжение коллектор-база, В	50
Ток коллектора, А	0,5
Сопротивление R_1 , кОм	10
Сопротивление R_2 , кОм	10
Коэффициент усиления по постоянному току, о.е.	70
Напряжение открытия транзистора, В при токе коллектора $I_k = 10$ мА	1-2,5

На принципиальны схемах может быть полностью отражена структура устройства, но допускается обозначать как обыкновенный биполярный транзистор соответствующей проводимости.

И так, для формирования управляющего напряжения соединим коллектор данного транзистора с затвором Р-канального транзистора. Аналогично выполним «подтяжку» затвора, но уже к положительному напряжению соответствующим резистором.

Тогда схема управления Р-канальным полевым транзистором выглядит следующим образом – рисунок 3.10.

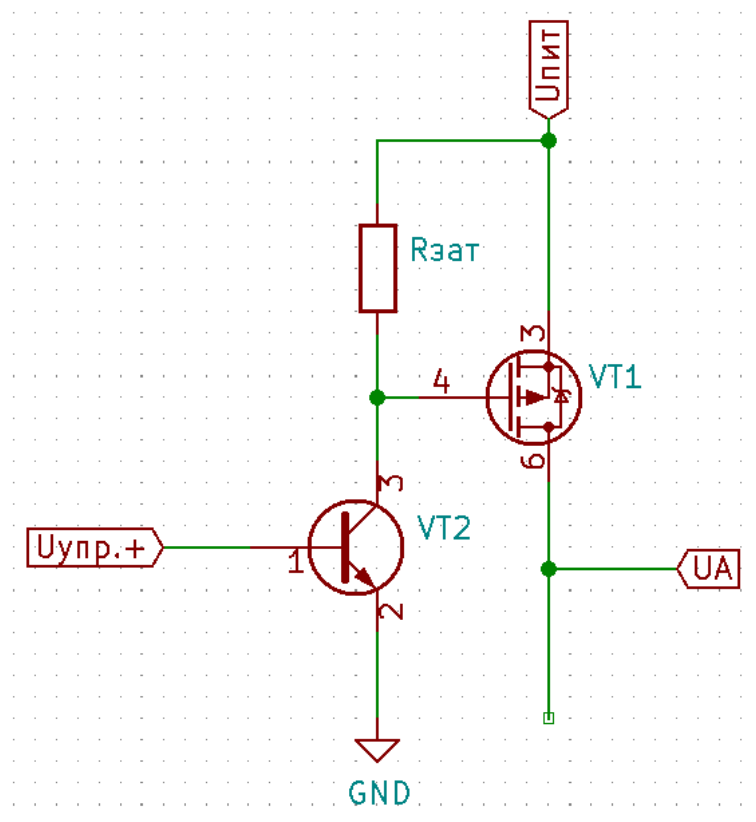


Рисунок 3.10 – Схема управления P-канальным транзистором

В логическом отношении данная схема представляет из себя инвертор сигнала. Так при подаче высокого уровня с выхода микроконтроллера, нагрузка «цифрового» ключа в виде затвора полевого транзистора подключается к контакту с низким потенциалом.

Таким образом полная силовая схема одного плеча коммутатора представлена на рисунке 3.11.

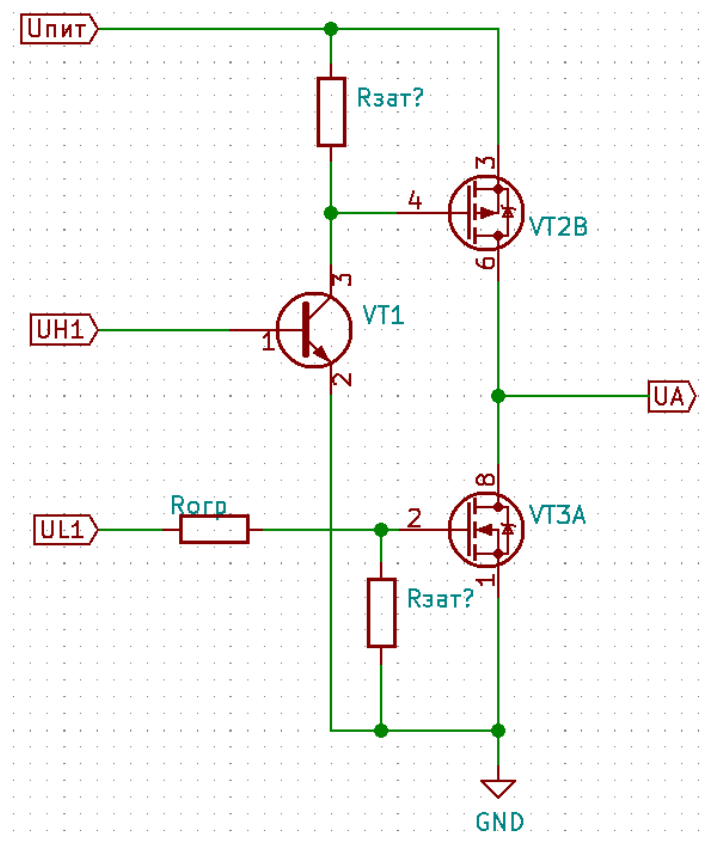


Рисунок 3.11 – Силовая схема плеча коммутатора

3.6 Органы индикации и управления

В качестве индикации состояния транзисторов применим светодиоды, включенные параллельно затворам транзисторов (в случае Р-канального – параллельно базе цифрового транзистора) – рисунок 3.12.

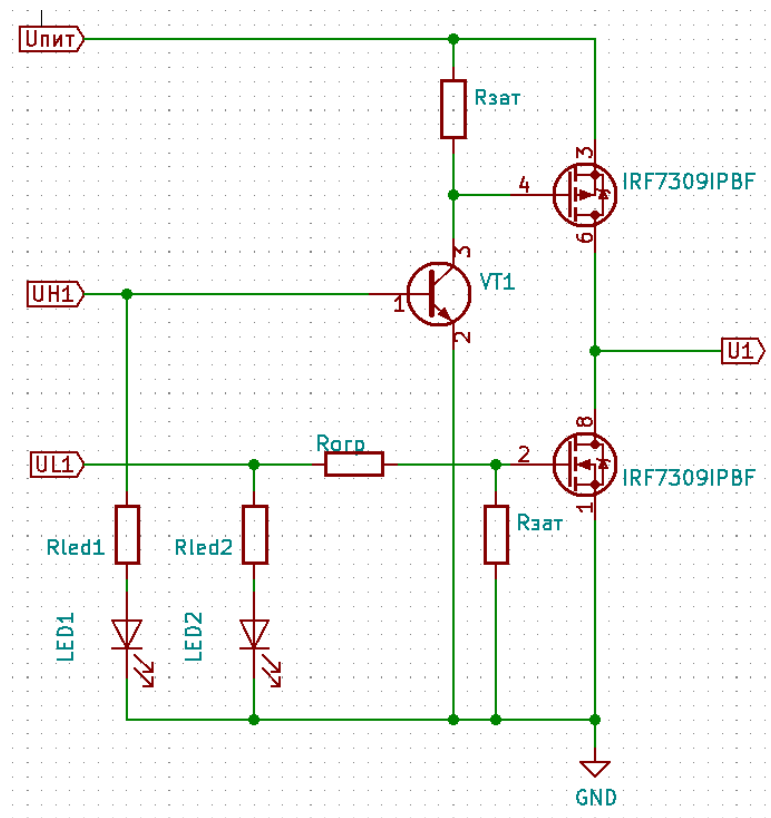


Рисунок 3.12 – Схема индикации состояния транзисторов

Для индикации режимов работы, состояния устройства и других функций так же применим светодиоды. Подключим их к выводам микроконтроллера.

При работе светодиода необходимо ограничить ток через него резистором, включенным последовательно. Его значение рассчитывается как:

$$R_{\text{огр.LED}} = \frac{U_{\text{пит}} - U_{\text{LED}}}{I_{\text{н.LED}}},$$

где $U_{\text{пит}} = 3,3 \text{ В}$ – напряжение питания светодиода;

для большинства индикаторных светодиодов:

$U_{\text{LED}} = 2 \text{ В}$ – прямое номинальное напряжение светодиода;

$I_{\text{н.LED}} = 20 \cdot 10^{-3} \text{ А}$ – прямой номинальный ток светодиода.

Тогда величина ограничительного сопротивления:

$$R_{\text{огр.LED}} = \frac{U_{\text{пит}} - U_{\text{LED}}}{I_{\text{н.LED}}} = \frac{3,3 - 2}{20 \cdot 10^{-3}} = 65 \text{ Ом}.$$

В соответствии с рядом E24 выберем резистор номиналом 68 Ом, тогда ток через светодиод и активная мощность на резисторе:

$$I_{LED} = \frac{U_{пит} - U_{LED}}{R_{огр.LED}} = \frac{3,3 - 2}{65} = 0,019A,$$

$$P_{огр.LED} = I_{LED}^2 \cdot R_{огр.LED} = 0,019^2 \cdot 68 = 0,025.$$

Аналогично выберем резисторы типоразмера 3216 для данных и остальных светодиодов в схеме.

Принципиальная схема подключения светодиода представлена на рисунке 3.13.

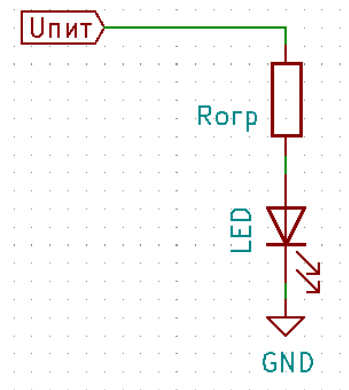


Рисунок 3.13 – Подключение светодиода

Здесь при появлении высокого уровня на выводе микроконтроллера ток начинает протекать через светодиод и ограничивающий резистор тем самым светодиод загорается. При подключении данной схемы требуется лишь сконфигурировать данный порт как выход и получить управление его состоянием, поэтому в роли источника питания для светодиода может выступать любой не занятый порт ввода-вывода.

В качестве органов управления применим тактовые кнопки и специализированный энкодер – рисунок 3.14.

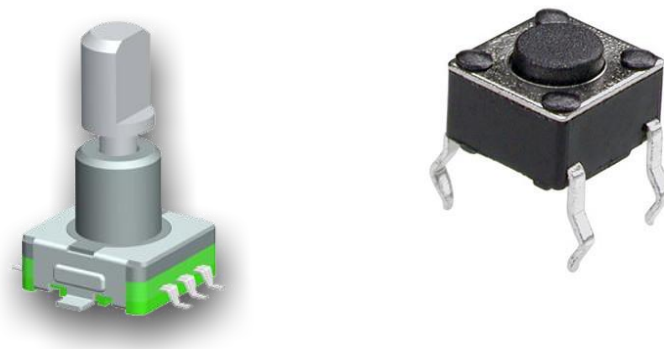


Рисунок 3.14 – Вид энкодера и тактовой кнопки

Схема подключения кнопки к микроконтроллеру представлена на рисунке 3.15.

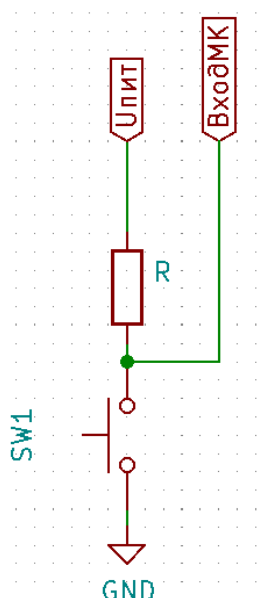


Рисунок 3.15 – Подключение кнопки

Здесь при нормально разомкнутом состоянии кнопки на вход микроконтроллера подается высокий потенциал. При переводе кнопки в ненормальное состояние на вход микроконтроллера подается низкий потенциал.

Аналогично светодиоду, подключение кнопки к микроконтроллеру не требует применение специализированных периферийных устройств. Достаточно сконфигурировать вывод микроконтроллера как вход без

использования внутреннего «подтягивающего» резистора и установить нормальный уровень выхода как высокий.

В схемном отношении энкодер подобен двум кнопкам без фиксации, которые переключаются одна за другой в зависимости от направления вращения. Также энкодер оснащен кнопкой, которая переключается при нажатии в осевом направлении на вал. Схема подключения к микроконтроллеру представлена на рисунке 3.16.

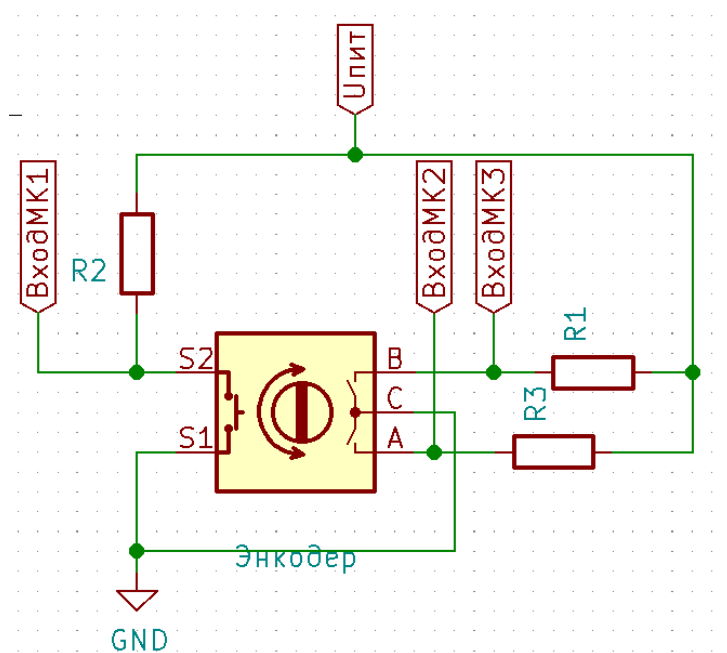


Рисунок 3.16 – Подключение энкодера

При вращении вала энкодера его контакты замыкаются поочередно, таким образом на входах микроконтроллера образуются два последовательных импульса, время между которыми отражает скорость поворота вала, а порядок следования – направление.

Для корректного считывания информации подобной формы необходимо применение специализированной периферии – таймеров общего назначения. Выбранный микроконтроллер имеет несколько таких выводов. Контакты энкодера в соответствии с рисунком подключаются к двум каналам одного таймера. После чего проводится соответствующая конфигурация.

3.7 Блок питания

В связи с небольшой общей мощностью системы в качестве преобразователя постоянного тока для питания коммутатора используем стандартный сетевой блок питания. Основными критериями выбора которого являются выходные мощность и напряжение.

Оценим мощность, потребляемую силовой частью схемы, основным потребителем которой является двигатель. На основании технических данных мощность при номинальном режиме работы составляет 4 Вт, а рассчитанный максимальный ток составляет 1,6 А. Учитывая это применим блок питания на 12В и 2А [15].

В активном режиме работы микроконтроллер не может потреблять более 350 мА тока [5]. Данный микроконтроллер имеет в своей конструкции встроенный стабилизатор напряжения это дает возможность питать микроконтроллер от источника питания напряжением в 5 В. Тогда мощность, необходимая для покрытия энергетических потребностей микроконтроллера:

$$P_{\text{мк}} = I_{\text{мк.мах}} \cdot U_{\text{пит}} = 350 \cdot 10^{-3} \cdot 5 = 1,75 \text{ Вт.}$$

Выберем соответствующий блок питания [15].

Стоит отметить, что при работе с разрабатываемым продуктом возможно совместное использование компьютера. В настоящий момент практически все персональные компьютеры оснащены интерфейсом USB 2.0 и выше. Это дает возможность использовать данный интерфейс для питания микроконтроллера, так как максимальный отдаваемый ток в таком случае равен 0,5 А [16].

3.8 Принципиальная схема

В соответствии с требованиями по подключению различных устройств к соответствующим выводам микроконтроллера, а также других элементов, была составлена принципиальная схема всего устройства – приложение А, рисунок А.1.

На основе данной схемы, выбранных ранее элементов и габаритов корпуса жесткого диска в программе Kicad была разведена печатная плата – приложение А, рисунок А.2.

С использованием ЧПУ станка данная печатная плата была отфрезерована и подготовлена к монтажу радиодеталей – приложение В. После чего был произведён монтаж элементов способом ручной пайки с использованием припоя ПОС-61 – приложение А, рисунок А.3.

С помощью отдельно разработанных моделей корпуса был собран рабочий прототип – приложение А, рисунок А.4. Здесь в корпус вставляется и фиксируется печатная плата, все это крепится к жесткому диску через стандартные установочные отверстия. Три вывода двигателя жесткого диска соответствующими проводами подсоединяются к печатной плате.

4 Программная часть

Главным преимуществом микропроцессорных систем является возможность изменения функционала реальной физической системы с помощью программных средств.

Рассмотрим основные решения, использованные в ходе разработки продукта.

4.1 Выбор программных продуктов

Производитель данных микроконтроллеров для облегчения работы с устройством выпускает комплектное программное обеспечение [17]. Данные программные продукты распространяются бесплатно и существенно упрощают работу с микроконтроллерами для непрофильных специалистов. Основными тенденциями появления и использования таких программ являются укрупнение структуры, повышение функционала и как можно большего упрощения работы с программной частью микроконтроллера.

Программа CubeMX предназначена для удобной конфигурации портов микроконтроллера с помощью графического интерфейса. Основное рабочее пространство представлен на рисунке 4.1.

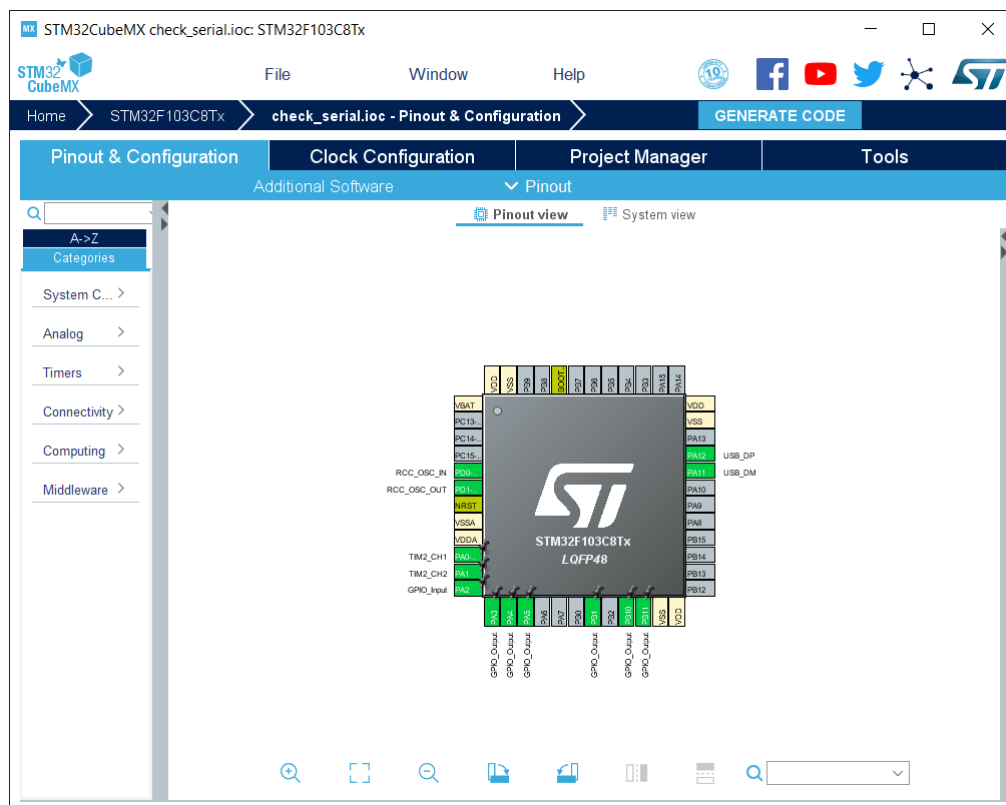


Рисунок 4.1 – Интерфейс программы CubeMX

В результате работы данной программы по окончании конфигурации портов микроконтроллера формируется набор файлов на языке «С» для последующего написания, компиляции и загрузки в микроконтроллер алгоритма работы. Данные файлы формируются на основе библиотеки HAL, которая так же облегчает работу с микроконтроллером путем ориентации на функционировании периферийных устройств и сокрытия структуры данных устройств.

Непосредственно для написания алгоритма работы микроконтроллера можно воспользоваться любым текстовым редактором, поддерживающим формат файлов языка «С» – *.h* и *.c*, формирование машинных кодов провести любым компилятором языка, а для загрузки в микроконтроллер использовать специализированное программное обеспечение, например, ST-LINK Utility. Но на сегодняшний день появилось большое количество интегрированных сред разработки (IDE), которые позволяют сделать все это используя только одну программу.

Большой популярностью пользуется программный продукт Keil μ Vision. Данная среда разработки помимо инструментов для совершения вышеописанных действий имеет в своей структуре отладчик, менеджер библиотек, расширенный анализ синтаксиса и многие другие полезные средства для работы с микроконтроллером.

Программа является условно бесплатной, так как имеет ограничение на объем созданной программы – 32 КБ. Это не является существенным ограничением при работе с необъемными алгоритмами, каким является программа для разрабатываемого устройства.

Основной интерфейс представлен на рисунке 4.2.

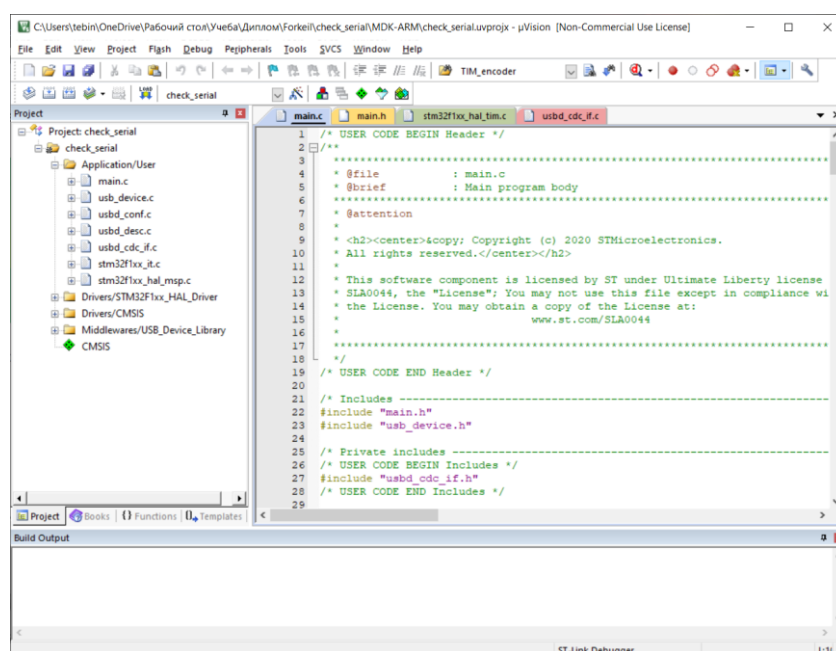


Рисунок 4.2 – Интерфейс программы Keil

4.2 Конфигурация портов ввода вывода

Для начала создадим проект в программе CubeMX и выберем используемую модель контроллера. С помощью графического интерфейса выберем выводы микроконтроллера, устройства периферии и сконфигурируем их.

4.2.1 Конфигурация портов для работы с индикацией

Как уже было отмечено, светодиоды с токоограничивающим резистором подключаются к порту микроконтроллера, который настроен на вывод информации. Сконфигурируем выводы соответствующим образом – рисунок 4.3.

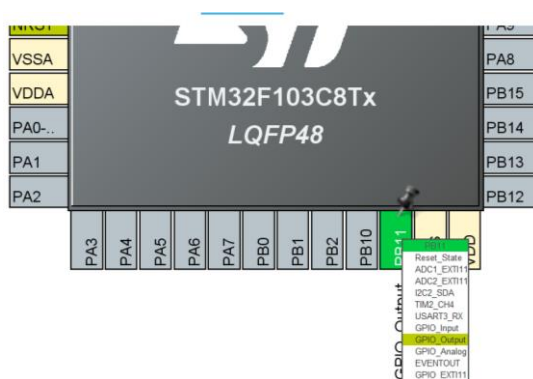


Рисунок 4.3 - Выбор порта микроконтроллера

После выбора появляется возможность внести дополнительные настройки – рисунок 4.4.

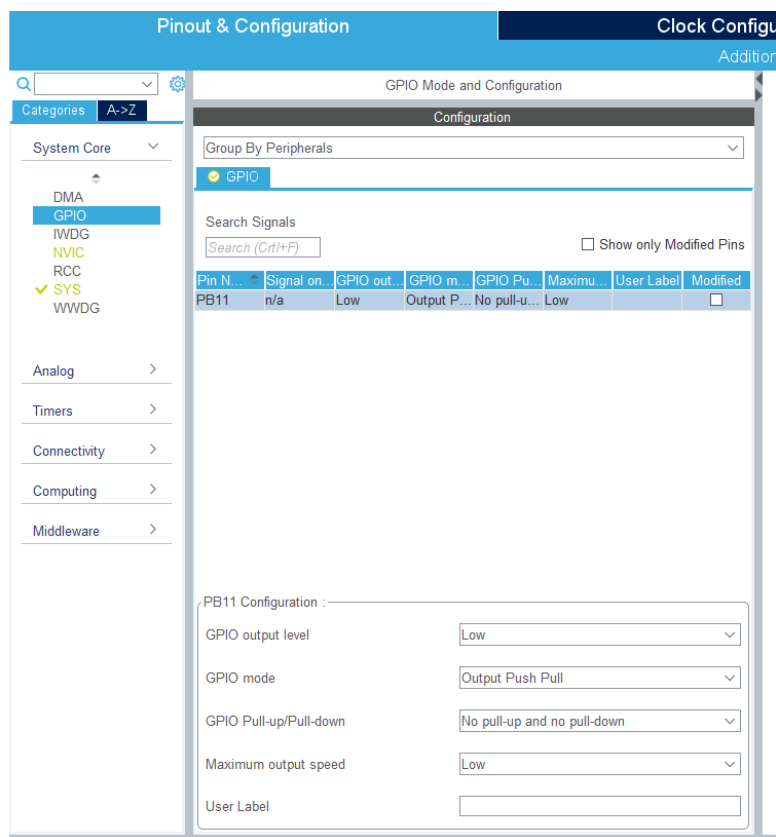


Рисунок 4.4 – Конфигурация вывода

Режим работы выхода GPIO mode позволяет выбрать конфигурацию выходных цепей между «Output Push Pull» - рисунок 4.5, и «Output Open Drain» - рисунок 4.6 [19].

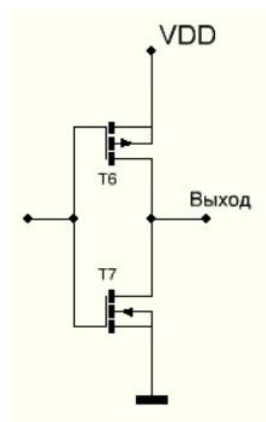


Рисунок 4.5 – «Output Push Pull» выход

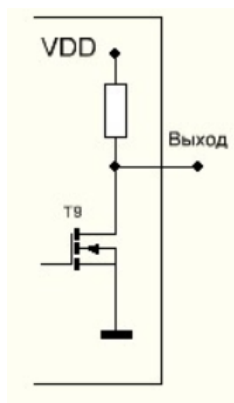


Рисунок 4.6 – «Output Open Drain» выход

Согласно принципиальной схеме на рисунке 3.6.2 необходимо, чтобы микроконтроллер обеспечивал сигнал высокого уровня на своем выходе для зажигания светодиода. В таком случае необходимо использовать схему «Output Push Pull».

Строка «GPIO output level» имеет два параметра – «Low» и «High», которые определяют нормальное состояние вывода. Так как светодиод по умолчанию должен не гореть, устанавливаем «Low».

Параметры «GPIO Pull-up/Pull-down» отвечают за «подтяжку», выполняемую в выходных цепях микроконтроллера. Для работы со светодиодом дополнительное внутреннее сопротивление не нужно.

Строка «Maximum output speed» отвечает за установку максимально возможной скорости изменения уровня сигнала на выходе микроконтроллера. Уровню «Low» соответствует максимальная частота 2 МГц, «Medium» - 25 МГц, «High» - 50 МГц. Для управления светодиодом выберем максимальную частоту 2 МГц.

Аналогичную настройку проведем для остальных выходов микроконтроллера, которые задействованы в управлении светодиодами.

В конечном итоге, после завершения всех настроек и генерации кода в файле main.c в функции инициализации портов ввода вывода появятся следующие строки, которые соответствуют выставленным настройкам – листинг 1.

Листинг 1 – Результат настройки портов для работы со светодиодами

```
static void MX_GPIO_Init(void)
{
...
/*Configure GPIO pin Output Level */
HAL_GPIO_WritePin(GPIOA,    GPIO_PIN_3|GPIO_PIN_4|GPIO_PIN_5,
GPIO_PIN_RESET);
/*Configure GPIO pins: PA3 PA4 PA5 */
GPIO_InitStruct.Pin = GPIO_PIN_3|GPIO_PIN_4|GPIO_PIN_5;
GPIO_InitStruct.Mode = GPIO_MODE_OUTPUT_PP;
GPIO_InitStruct.Pull = GPIO_NOPULL;
GPIO_InitStruct.Speed = GPIO_SPEED_FREQ_LOW;
HAL_GPIO_Init(GPIOA, &GPIO_InitStruct);
...
}
```

Приведем простую программу, которая управляет светодиодом в зависимости от состояния переменной «mode» - если переменная больше нуля, то светодиод горит, и наоборот – листинг 2.

Листинг 2 – Программа управления светодиодом

```
if (mode>0)
{
HAL_GPIO_WritePin (GPIOA, GPIO_PIN_3, GPIO_PIN_SET);
}
else
{
HAL_GPIO_WritePin(GPIOA, GPIO_PIN_3, GPIO_PIN_RESET);
}
```

}

Видно, что в таком виде программы необходимо указывать группу порта – «GPIOA» и его номер – «GPIO_PIN_3». Для удобной работы в файле main.h объявим команду для препроцессора, которая заменяет при компиляции данные строки на другие – листинг 3.

Листинг 3 – Объявление строк

```
#define LED_6 GPIOA, GPIO_PIN_3
...
#define LED_1 GPIOB, GPIO_PIN_11
```

Тогда строка, которая указывает микроконтроллеру, что на одном из выходов необходимо установить высокий уровень выглядит следующим образом – листинг 4.

Листинг 4 – Управление выводом

```
HAL_GPIO_WritePin(LED1, GPIO_PIN_SET);
```

4.2.2 Конфигурация портов для работы с кнопками

Проведем настройку портов микроконтроллера для считывания состояния кнопок. Для этого необходимо выбрать вывод и выбрать его как вход – рисунок 7.

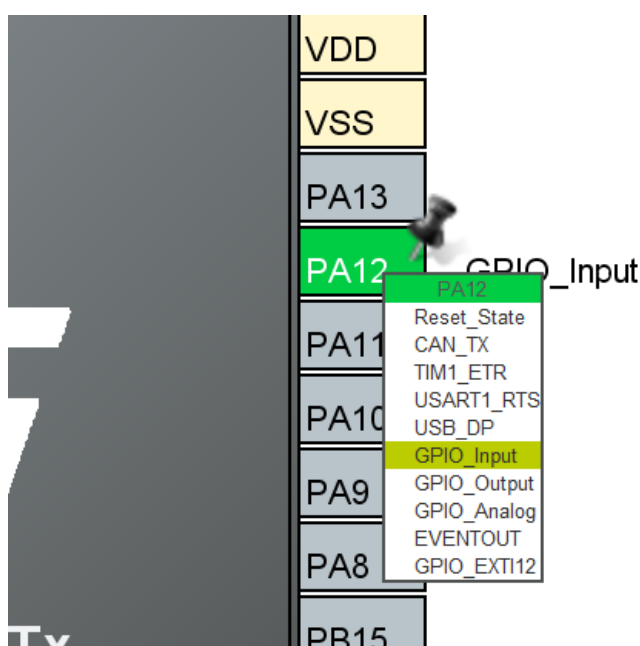


Рисунок 4.7 – Настройка порта как вход

В окне конфигурации приведены следующие параметры – рисунок 4.8.

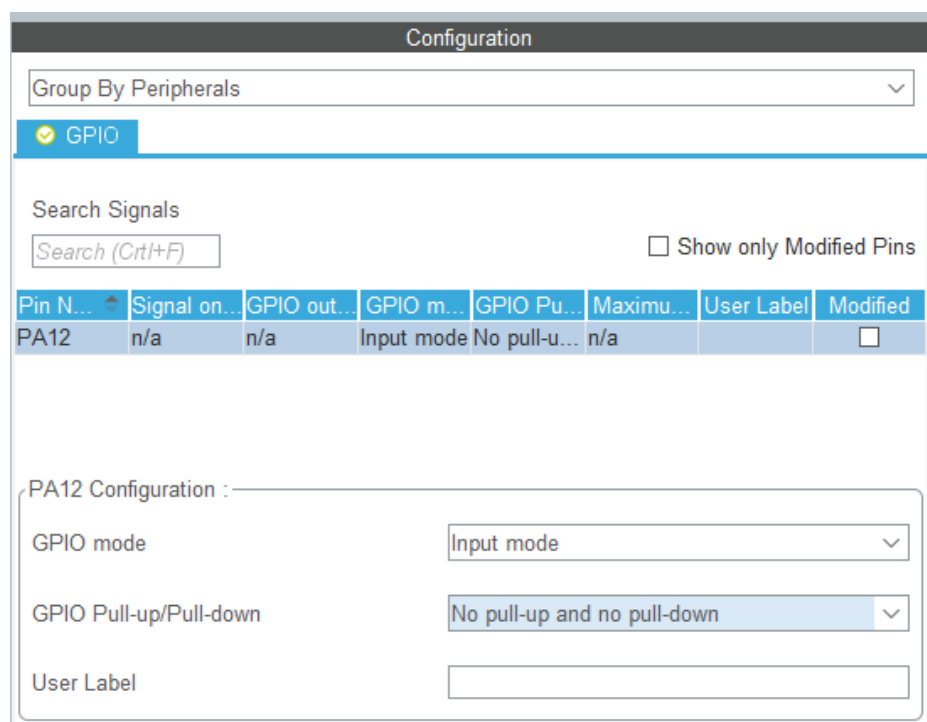


Рисунок 4.8 – конфигурация входа

Параметр «GPIO Pull-up/Pull-down» аналогично отвечает за подключение внутреннего «подтягивающего» резистора. Так как мы используем внешний резистор, то данный параметр использовать не нужно.

На этом можно считать настройку оконченной. После формирования кода программы получим соответствующие строки – листинг 5.

Листинг 5 – Результаты настройки порта как вход

```
GPIO_InitStruct.Pin = GPIO_PIN_2|GPIO_PIN_15;  
GPIO_InitStruct.Mode = GPIO_MODE_INPUT;  
GPIO_InitStruct.Pull = GPIO_NOPULL;  
HAL_GPIO_Init(GPIOA, &GPIO_InitStruct);
```

В соответствии с используемой схемой подключения кнопок, нажатому состоянию будет соответствовать низкий уровень сигнала. При считывании состояния кнопки в таком состоянии в память микроконтроллера записывается значение «0».

Тогда для выполнения какого-либо алгоритма после нажатия кнопки необходима следующая конструкция – листинг 6.

Листинг 6 - Считывание состояния кнопки

```
if (HAL_GPIO_ReadPin(GPIOA, GPIO_PIN_2)==0)
{...};
```

Для упрощения написания программы и повышения читаемости заменим следующие строки – листинг 7.

Листинг 7 – Объявление строк

```
#define BUTTON_UL1 GPIOB, GPIO_PIN_8
#define BUTTON_UH1 GPIOB, GPIO_PIN_9
...
#define BUTTON_UL3 GPIOB, GPIO_PIN_4
#define BUTTON_UH3 GPIOB, GPIO_PIN_5
```

В разрабатываемой системе кнопки необходимы для наглядной демонстрации периодов коммутации двигателя. Таким образом, каждому нажатию кнопки должно соответствовать появление сигнала на затворе транзистора. Названия выводов кнопок соответствует ключу, который работает синхронно с кнопкой.

4.2.3 Конфигурация портов при работе с энкодером

Как уже было отмечено, главный механизм энкодера представляет из себя две тактовые кнопки и при соединении в соответствии со схемой на рисунке 3.6.5. на двух входах микроконтроллера будут возникать последовательность сигналов высокого и низкого уровней. Поэтому возможно работать с ним посредством описанных выше способов обработки сигналов с портов ввода-вывода. Но в выбранном микроконтроллере реализована аппаратная возможность корректно считывать состояния энкодера – специальная настройка таймеров.

Таймер представляет из себя счетчик, который увеличивает или уменьшает свое значение на единицу при каждом такте своей работы, а при достижении определенного значения переполняется и на следующем такте принимает значение 0. Скорость счета зависит от частоты тактирования

счетчика. По достижению какого-либо значения или переполнения может формироваться прерывание или событие.

В используемом микроконтроллере отношение частоты тактирования счетчика может изменяться относительно частоты работы процессора в $2^{16} = 65536$ раз, так как делитель шестнадцати битный, а переполнение может наступать в диапазоне от 0 до $2^{16} - 1 = 65535$ из-за шестнадцати битного счетчика.

Упрощенная схема таймера общего назначения представлена на рисунке 4.9.

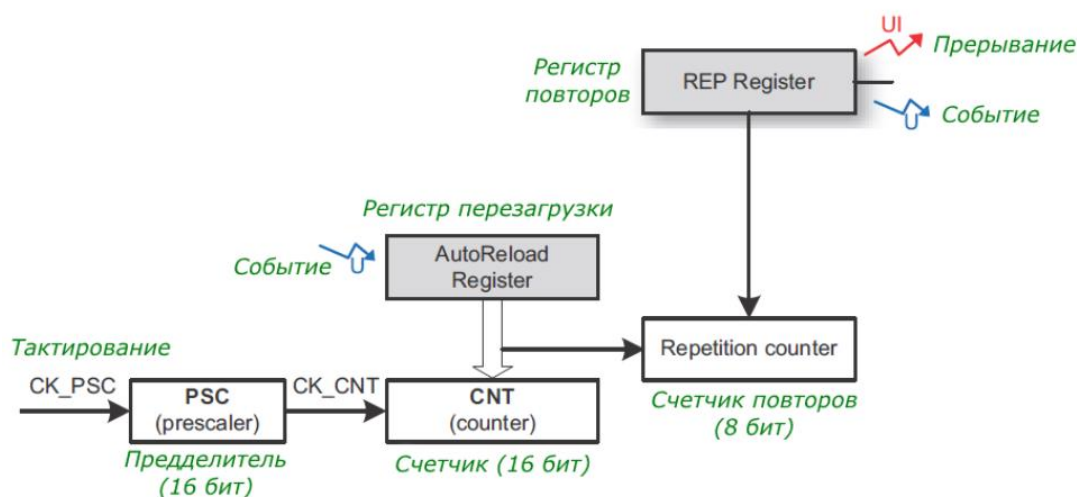


Рисунок 4.9 – Упрощенная схема счетчика

Так с помощью конфигурации порта для работы непосредственно с энкодером можно более корректно наблюдать за положением энкодера. Принцип работы заключается в том, что тактирование счетчика происходит от внешнего источника, которым является энкодер.

Для настройки порта на данный режим в соответствующем меню выберем любой свободный таймер общего назначения и применим в настройках к режиму взаимодействия двух каналов «Combined Channels» параметр «Encoder Mode» - рисунок 4.10.

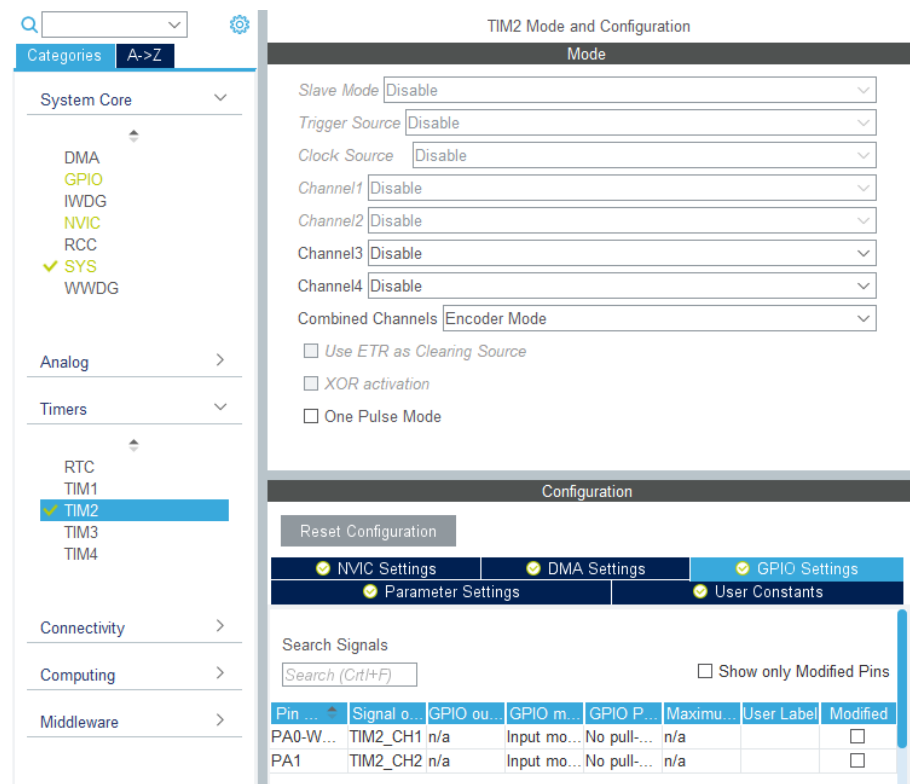


Рисунок 4.10 – Конфигурация порта энкодера

Видно, что выделилось два порта микроконтроллера. Именно к ним следует подключать энкодер.

Настроим параметры таймера – рисунок 4.11.

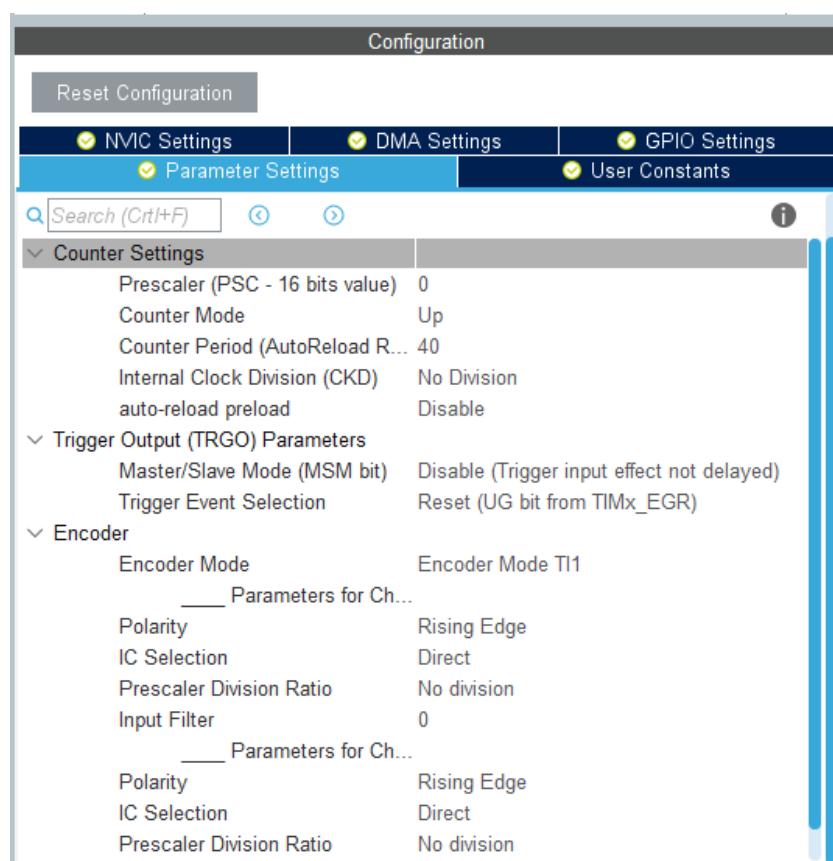


Рисунок 4.11 – Настройка параметров таймера

Здесь параметр «Prescaler» отвечает за частоту шага счетчика таймера: данное значение показывает, во сколько эта частота меньше системной тактовой частоты. Так значение «0» обеспечивает на каждый шаг системного таймера один шаг данного таймера. Значение «1» соответствует частоте в 2 раза меньшей, чем тактовая частота.

Раздел «Counter Mode» указывает, в каком направлении будет считать таймер. Для данной задачи это не принципиально.

Счетчик таймера будет считать до значения «Counter Period», после чего сбрасываться в 0.

Делитель системной частоты таймера используется для формирования «мертвого времени» при управлении силовыми ключами. Не используется при конфигурации энкодера.

«Auto-reload preload» отвечает за порядок изменения регистра переполнения счетчика: при установке «Disable» новое значение переполнения счетчика сразу записывается в соответствующий регистр, при

установке «Enable» новое значение попадет в регистр только после переполнения счетчика.

«Encoder Mode» – указывает на то, по какому из двух входов будет производится подсчет (либо с двух сразу). Далее следуют настройки каждого входа отдельно, параметры для них одинаковы.

Параметры при непосредственной настройке считывания сигналов с энкодера:

«Polarity» отвечает за считывание сигнала по фронту – «Rising Edge», или по спаду – «Falling Edge»;

«Prescaler Division Ratio» - делитель входящего сигнала;

«Input Filter» - количество тактов системного таймера, по истечению которых произойдет инкрементация счетчика энкодера в том случае, если за время тактов сигнал не изменялся.

Оставим данные параметры без изменений.

После генерации кода программой CubeMX запустим данный таймер и введем переменную, в которой будем хранить количество импульсов, совершенных энкодером относительно начального положения и запишем в нее значение регистра счетчика энкодера – листинг 8.

Листинг 8 – Считывание показаний энкодера

```
...
HAL_TIM_Encoder_Start(&htim2,TIM_CHANNEL_1);
uint8_t encoder_counter;
...
int main(void){
...
encoder_counter=TIM2->CNT;
}
```

Тактовая кнопка энкодера, работающая при осевом нажатии на вал подключается и конфигурируется аналогично обычным кнопкам.

Таким образом, в зависимости от положения и направления вращения энкодера можно формировать условия переключения режимов работы двигателя.

4.2.4 Конфигурация портов при работе с трехфазным двигателем

Как уже было сказано, для питания трехфазного БДПТ необходимо прямоугольное (трапецеидальное) напряжение. В простейшем случае формирование управляющих сигналов можно выполнить при настройке выводов микроконтроллера как обычных выходов, и в соответствии с необходимой частотой вращения двигателя подавать последовательность из высоких и низких сигналов на затворы транзисторов. Но данный способ предполагает формирования пауз в работе контроллера, что отрицательно сказывается на выполнении остальной программы, а так же не подходит для синхронных двигателей. Поэтому целесообразно использовать специализированный аппаратный таймер для работы с трехфазными двигателями.

Выполним соответствующие настройки в программе. Для этого выберем расширенный таймер- в данном случае это первый таймер TIM1 – рисунок 4.12.

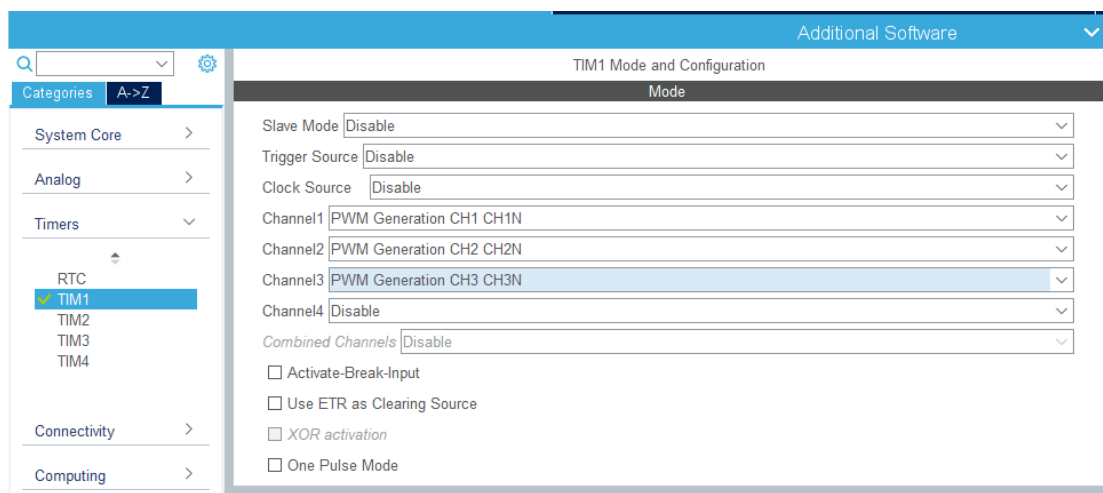


Рисунок 4.12 – Настройка таймеров для формирования ШИМ

Определим режим работы каналов таймера как генерация ШИМ. Здесь пункт «PWM Generation CH1 CH1N» отвечает за работу двух выводов инверсно относительно друг друга при формировании сигнала. Аналогично для остальных каналов.

Проведем настройку параметров предделителя и вычислим коэффициент переполнения счетчика для получения ШИМ-сигнала с частотой 20 кГц:

$$count = \frac{f_{сч}}{f_{ШИМ}},$$

где *count* – коэффициент переполнения счетчика;

$f_{сч}$, Гц – частота счетчика, определяется как отношение тактовой частоты микроконтроллера к коэффициенту предделителя;

$f_{ШИМ}$, Гц – частота ШИМ-сигнала.

Тогда при коэффициенте предделителя равном одному счетчик работает с выставленной частотой контроллера. Для примера возьмем 72 МГц. Тогда величина переполнения счетчика:

$$count = \frac{f_{сч}}{f_{ШИМ}} = \frac{72 \cdot 10^6}{20 \cdot 10^3} = 3600.$$

Данное значение находится в пределах возможности шестнадцати битного счетчика. Тогда за один период ШИМ-сигнала счетчик с частотой 72 МГц досчитает до 3600. С другой стороны, этот параметр отображает дискретность коэффициента заполнения будущего сигнала

Настройка в программе CubeMX представлена на рисунке 4.13.

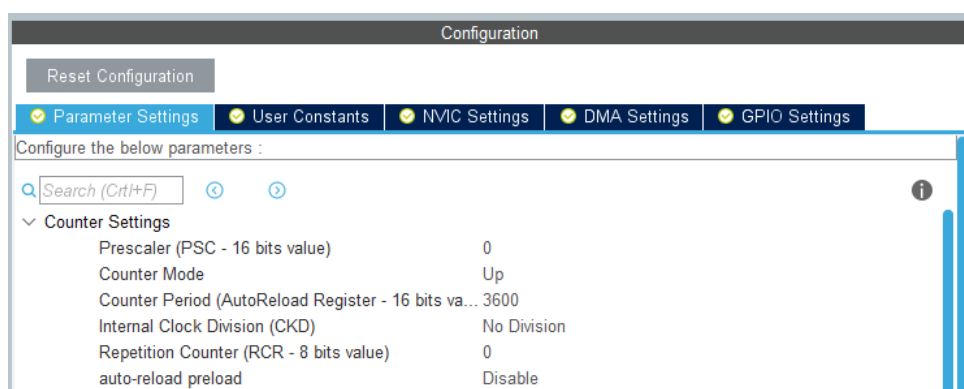


Рисунок 4.13 – Настройки счетчика

Важной особенностью управления ключами инвертора является необходимость учитывать время на полное закрытие транзисторов. Для этого

вводится задержка на включение транзистора, работающего при отрицательном напряжении, после выхода из работы «положительного» транзистора плеча – формирование «мертвого времени».

Учтем временные характеристики транзисторов из таблицы 4.4.1. Тогда минимальное время для закрытия транзистора с наибольшим временем восстановления после исчезновения сигнала управления составит

$$t_{\text{закр}} = t_{\text{зд.выкл}} + t_{\text{сп}} = 12 \cdot 10^{-9} + 25 \cdot 10^{-9} = 37 \cdot 10^{-9} \text{ с.}$$

Величина «мертвого времени» задается в тактах таймера. К примеру, при частоте тактирования в 72 МГц период составит

$$T_{\text{тм}} = \frac{1}{72 \cdot 10^6} = 14 \cdot 10^{-9} \text{ с.}$$

Тогда для корректной работы необходимо задержать открытие второго транзистора на не менее чем 3 такта работы таймера. Установим данное значение – рисунок 4.2.14.

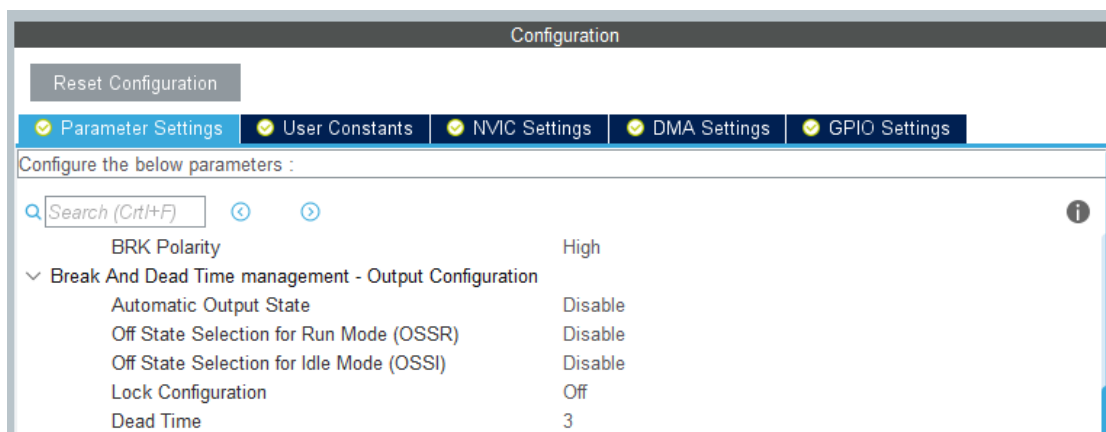


Рисунок 4.14 – Установка «мертвого времени»

Для изменения коэффициента заполнения в ходе исполнения программы необходимо изменять значение в регистре сравнения. Для этого настроим возможность прямого доступа к памяти – рисунок 4.15.

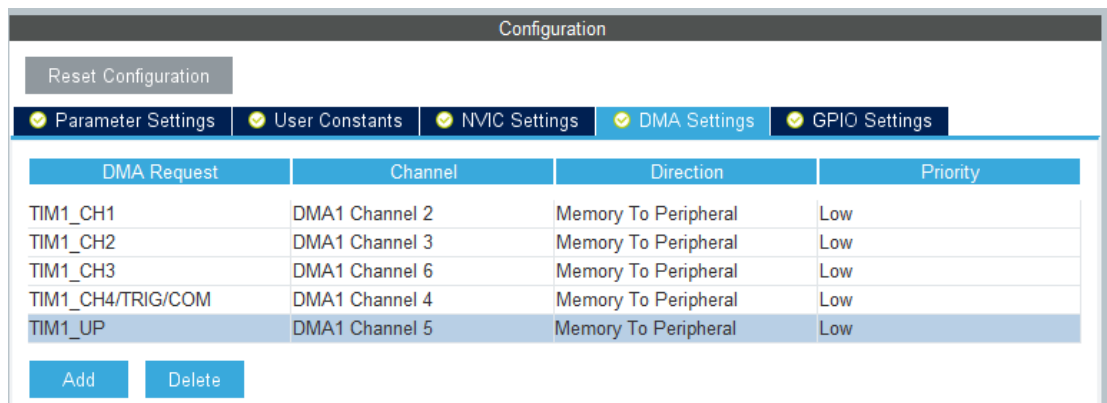


Рисунок 4.15 – Настройка прямого доступа к памяти

В результате конфигурации и последующей генерации кода получены следующие строки настройки портов ввода-вывода для генерации ШИМ-сигнала – листинг 9.

Листинг 9 - Конфигурация ШИМ-выводов микроконтроллера

```
GPIO_InitStruct.Pin = GPIO_PIN_13|GPIO_PIN_14|GPIO_PIN_15;
GPIO_InitStruct.Mode = GPIO_MODE_AF_PP;
GPIO_InitStruct.Speed = GPIO_SPEED_FREQ_HIGH;
HAL_GPIO_Init(GPIOB, &GPIO_InitStruct);

GPIO_InitStruct.Pin = GPIO_PIN_8|GPIO_PIN_9|GPIO_PIN_10;
GPIO_InitStruct.Mode = GPIO_MODE_AF_PP;
GPIO_InitStruct.Speed = GPIO_SPEED_FREQ_HIGH;
HAL_GPIO_Init(GPIOA, &GPIO_InitStruct);
```

А настройка счетчика представлена в функции инициализации таймера – листинг 10.

Листинг 10 – Настройки счетчика

```
static void MX_TIM1_Init(void) {
...
htim1.Instance = TIM1;
htim1.Init.Prescaler = 0;
htim1.Init.CounterMode = TIM_COUNTERMODE_UP;
htim1.Init.Period = 3600;
htim1.Init.ClockDivision = TIM_CLOCKDIVISION_DIV1;
htim1.Init.RepetitionCounter = 0;
htim1.Init.AutoReloadPreload
TIM_AUTORELOAD_PRELOAD_DISABLE;
...
}
```

Для формирования синусоидальной ШИМ необходимо менять скважность каждого следующего импульса в соответствии с рисунком ГЛАВА 3. При реализации с помощью таймера необходимо каждый такт счетчика сравнивать его значение со значением функции желаемого синуса в данный такт времени. Для этого рассчитаем эти значения в целых числах для синусоиды амплитудой в 3599 единичных отрезков и частотой, к примеру 50 Гц, с шагом периода модуляции:

$$T = \frac{1}{f_{\text{ШИМ}}} = \frac{1}{20 \cdot 10^3} = 5 \cdot 10^{-6} \text{с} = 50 \text{ мс},$$

то есть на один период эталонной синусоиды необходимо 400 значений

После чего занесем эти значения в переменную `uint32_t sin_A`, а эту переменную с помощью специальной функции каждый период счетчика записывать в регистр сравнения таймера – листинг 11.

Листинг 11 – Запись значений переменной

```
uint32_t sin_A[400] = {0, 57, 113,..., 3599, 175, 119, 62, 6}
...
HAL_TIM_PWM_Start_DMA(&htim1, TIM_CHANNEL_1, (uint32_t *)
uint32_t sin_A);
```

Аналогично сделаем для остальных фаз синусоидального напряжения. Тогда на выходах микроконтроллера генерируются сигналы управления для шестиключевого АИН.

5 Концепция стартап-проекта

5.1 Название

Идея спроектировать и реализовать лабораторный стенд для изучения принципов управления бесколлекторным двигателем постоянного тока, который сможет удовлетворить потребности учебных заведений и компаний, работающих в области эффективных и производительных электроприводов.

Основываясь на идею и само разрабатываемое решение, было определено название для стартап-проекта: «Универсальный лабораторный стенд для изучения бесколлекторных двигателей постоянного тока с постоянными магнитами с микропроцессорным управлением».

5.2 Описание продукта как результата НИР

Современный электропривод строится в подавляющем большинстве на микроконтроллерном управлении с различной конфигурацией периферийных устройств. Имеющиеся на данный момент оборудование у большинства вузов не позволяет в достаточной мере изучать и практиковаться в данной области.

По причине нехватки лабораторных стендов среди студентов на лабораторных работах создаются очереди, задолженности, несвоевременная сдача работ. Но основным недостатком такой ситуации является невысокие практические и теоретические знания в области микропроцессорного управления электроприводами.

В результате выполнения НИОКР решается проблема недостаточной оснащенности лабораторий стендами для исследования микропроцессорного управления бесколлекторным двигателем.

Так же удовлетворяются потребности компаний в универсальном отладочном устройстве для работы с микроконтроллерами и бесколлекторными двигателями.

Устройство представляет из себя компактный бокс, корпус которого выполнен из пластика путем печати на 3Д-принтере, жесткую основу

составляет металлический корпус от жесткого диска формата 3,5” вместе с установленным на него двигателем – рисунок 5.1.



Рисунок 5.1 -Жесткий диск

В ходе разработки была спроектирована и реализована система управления, включающая в себя полупроводниковый коммутатор и микроконтроллер с устройствами согласования управляющих сигналов. Также в конструкции присутствуют органы индикации и управления.

Основной функционал разрабатываемого устройства заключается в запуске и управлении бесколлекторным двигателем. Все вычислительные функции обеспечиваются микроконтроллером STM32 с загруженной в него программой для управления режимами работы двигателя с помощью органов управления.

Также конечный пользователь может составить свой алгоритм и загрузить его в микроконтроллер, что делает систему максимально гибкой. Несмотря на это, благодаря использованию специальных технических средств изначальный функционал сохраняется независимо от изменения загружаемой программы.

5.3 Интеллектуальная собственность

Выполнение функций, позволяющие освоить принципы работы и управления вентильными двигателями, является результатом деятельности проектной группы. Примененные совокупности технических решений будут составлять коммерческую тайну. В случае публикации информации о схожих технологиях будет оформлен патент.

5.4 Объем и емкость рынка

Предлагаемые продукт решает проблему подготовки квалифицированных кадров в вузах и сузах, а также удовлетворяет технические потребности научно-производственных компаний в области электротехники.

Для сегментации рынка выделим следующие категории: крупные, средние, мелкие вузы, сузы и компании. Пример классификации приведем для вузов. Оценку будем проводить среди вузов, которые обучают по программам «Автоматизация технологических процессов и производств» и «Электропривод и автоматика». Всего в России насчитывается 48 таких учебных заведений.

Основные статьи доходов вузов – государственное ассигнование, то есть средства из федерального бюджета страны для обучения студентов бюджетной формы, а также платные образовательные услуги. Тогда за основной критерий как отражение экономических возможностей примем контрольные цифры приема абитуриентов за 2019 год.

Вузом с наибольшим количеством мест является Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, который может принять на бюджетную форму 3528 человек, на коммерческую 5877 человек, суммарно 9405 человек. Относительно данного числа разделим остальные вузы на 3 категории: до 3135 человек, от 3136 до 6270 человек, от 6271 человек. Тогда 26 вузов (54,16%) относятся к первой категории, 15 (31,25%) ко второй, 7 (14,59%) к третьей.

По данным сайта государственных закупок только вузы из третьей и частично второй категории производят закупку лабораторных стендов на суммы более 200 тысяч рублей за единицу продукции.

Подобно проведен расчет и для сузов России. Выводы аналогичны. Результаты приведены в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Сегментирование рынка лабораторных стендов

Критерии		Решения	
		Существующие решения по цене свыше 140 т.р.	Предлагаемое решение по цене 20 т.р.
Потребители	Крупный вуз	Могут позволить	Могут позволить
	Средний вуз	Могут позволить	Могут позволить
	Мелкий вуз	Не могут позволить	Могут позволить
	Крупный суз	Могут позволить	Могут позволить
	Средний суз	Не могут позволить	Могут позволить
	Мелкий суз	Не могут позволить	Могут позволить
	Крупная компания	Могут позволить	Могут позволить
	Средняя компания	Не могут позволить	Могут позволить
	Мелкая компания	Не могут позволить	Могут позволить

Таким образом, некоторые учебные заведения не могут позволить обеспечение лабораторий более чем одним-двумя лабораторными стендами, когда для комфортной и результативной работы требуется больше единиц оборудования.

Основными поставщиками стендов с аналогичным функционалом являются компания «ЛАБСИС», которая предлагает оборудование по цене 137650 рублей за единицу, а также компания «ГалСен» - 147000 рублей за единицу. Данные модели имеют в своем составе ноутбук и USB-осциллограф как обязательные модули, что, несомненно, удорожает установку. По

рекомендации производителей за данным стендом одновременно эффективно могут работать не более чем два человека.

5.5 Анализ современного состояния и перспектив развития отрасли

На основании статистики [20], которая говорит о том, что число студентов в России растет с каждым годом, а так же политики, проводимой государством относительно высшего образования [21] можно сказать, что число студентов будет только увеличиваться. Данная тенденция с одной может привести к увеличению доходов вузов, и как следствие увеличению экономических возможностей при оснащении лабораторий, но с другой стороны поток студентов увеличится, что приведет к еще большей загруженности лабораторий и потребности в стендах

С другой стороны, из-за своей энергоэффективности и ряда других характеристик, исследуемый с помощью продукта тип двигателей так же набирает свою популярность. Развивается так же технологичность производства подобных двигателей. На данную особенность быстрее всего отреагировали компании в области внедрения электроприводов с микропроцессорным управлением. В числе их услуг и товаров появляются решения с использованием данного типа двигателей. Дальнейший рост популярности бесколлекторных моторов обуславливает так же увеличение потребности в специальных технических средствах среди компаний.

5.6 Планируемая стоимость продукта

Прямые издержки для выпуска продукта:

- печать корпуса – 200 рублей;
- работы по сборке – 450 рублей;
- жесткий диск 1 шт. – 200 рублей;
- микроконтроллер STM32 1 шт. – 150 рублей;
- элементы силовой электроники, устройств сопряжения и печатная плата – 300 рублей;

- коммутационные и индикаторные устройства – 100 рублей;
- блок питания – 200 рублей.

Компания НПО «ВЭСТ» заинтересована в скорейшей разработке первой партии продукта, поэтому предоставила свои производственные мощности, а именно паяльное, монтажное, пуско-наладочное оборудование, 3Д-принтер, производственное помещение и услуги монтажника, которые оплачиваются сдельно. Также руководство компании после реализации первой партии продукта готово предоставлять оборудование и помещение по цене 25000 рублей в месяц.

Первая партия продукта будет состоять из 25 штук, из которых 20 единиц предназначены для единовременной покупки по 10 штук для нужд учебных заведений при оснащении лабораторий, 5 штук – для розничной продажи учебным заведениям и компаниям.

Учитывая частоту закупок учебными заведениями лабораторного оборудования данный объем продукции возможно полностью продать за 4 месяца.

Налог равен 6 % от выручки, при выручке за год менее 150 млн. руб.
 $\text{Маржинальная прибыль} = \text{Выручка} * \text{Маржа, \%}$. $\text{Операционная прибыль} = \text{Маржинальная прибыль} - \text{Постоянные расходы}$. $\text{Инвестиции} = \text{Расходы в инвестиционный период (первоначальные} + \text{постоянные)} + \text{Убытки (отрицательная операционная прибыль)}$.

Таблица 5.2 – Расчет первоначальных расходов

Показатель	Цена	Количество	Сумма, руб.
Электронные компоненты	950	25	23750
Услуги монтажника	450	25	11250
ИТОГО	1400	25	35000

Таблица 5.3 – Анализ расходов на заработную плату

Категория работников	Кол-во человек	Формы оплаты труда			
		Комиссионные, % от выручки	Оклад, руб. в месяц на человека	Сдельная плата, руб./шт	Итого по окладной форме, руб. в месяц
Монтажник	1	0	0	450	11250
ИТОГО, руб. в месяц					11250

Таблица 5.4 – Бюджет проекта

		Квартал				
Показатель, , тыс. рублей	Инвестиционный период	I	II	III	VI	Итого
Выручка	0	500	500	500	500	2000
Маржинальная прибыль	0	420,35	266,3	500	500	1686,65
Постоянные расходы	0	0	25	0	0	25
Первоначальные расходы	35					35
Операционная прибыль	0	420,35	241,3	500	500	1661,65
Инвестиции	35					35

5.7 Конкурентные преимущества создаваемого продукта в сравнении с технико-экономическими характеристиками отечественных и мировых аналогов

Как уже было сказано, в составе продуктов, которые предлагают конкурирующие компании, есть дорогостоящие обязательные модули. К тому же компоновка существующих решений подразумевает формирование отдельного специального рабочего места – рисунок 5.2.

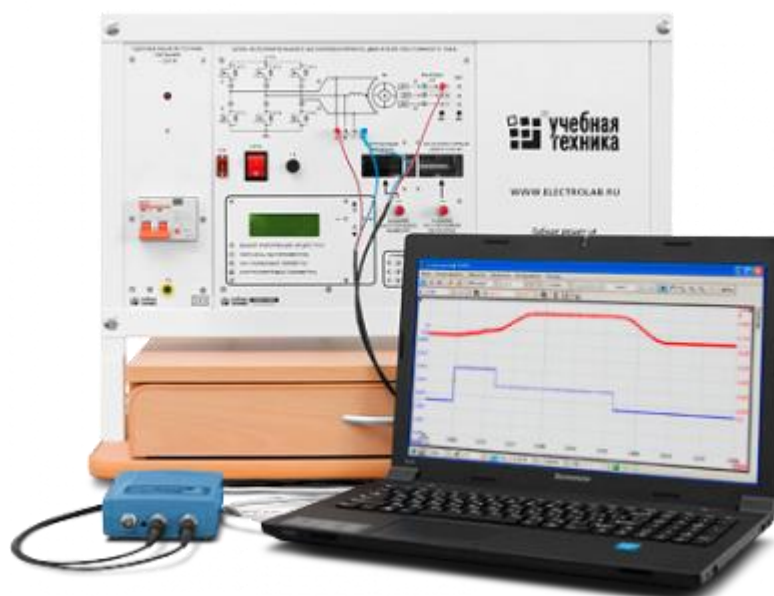


Рисунок 5.2 – Габариты и рабочее место существующих решений

Перечень лабораторных работ, которые можно выполнять с использованием решения от конкурента:

1. Определение режимных параметров бесколлекторного (вентильного) двигателя постоянного тока с датчиками Холла.
2. Определение внешней характеристики бесколлекторного (вентильного) двигателя постоянного тока с датчиками Холла.
3. Определение регулировочной характеристики бесколлекторного (вентильного) двигателя постоянного тока с датчиками Холла.
4. Определение последовательности коммутации ключей бесколлекторного

- (вентильного) двигателя постоянного тока.
5. Определение режимных параметров бесколлекторного (вентильного) двигателя постоянного тока без датчиков Холла.
6. Определение внешней характеристики бесколлекторного (вентильного) двигателя постоянного тока без датчиков Холла.

Как видно, существующее решение обеспечивает исследование исключительно данного типа двигателя, то есть представляет из себя жесткую, постоянную систему, созданную для выполнения определенных ограниченных функций. Данная особенность ограничивает использование данного продукта компаниями, занимающимися разработкой и отладкой микропроцессорных систем управления вентильными двигателями.

Оценим предлагаемое решение по аналогичным параметрам.

Основное конкурентное преимущество заключается в невысокой цене одного экземпляра лабораторного стенда, а именно порядка 20 тысяч рублей. Данный факт позволяет оснастить лаборатории несколькими установками для более комфортной работы студентов. С другой стороны, относительно невысокая стоимость позволяет небольшим научно-производственным компаниям рассматривать данный продукт к покупке.

Для работы с разрабатываемым стендом необходим любой компьютер, который имеет операционные системы Windows или Linux, а также порт USB. Поставляемое в комплекте с установкой программное обеспечение и методические указания позволяют пользователям самостоятельно провести сопряжение компьютера и лабораторного стенда.

Кроме того, габариты разрабатываемого продукта позволяют использовать его непосредственно на любом рабочем столе, где возможно использование персонального компьютера, а при необходимости свободно перемещать.

Перечень лабораторных работ, которые возможно выполнять с использованием предлагаемого решения аналогичен списку работ конкурента. В дополнение к этому разрабатываемый лабораторный стенд предназначен также для исследования микропроцессорных систем управления электроприводов и позволяет изучать практически все современные технические приемы, реализуемые на микроконтроллерах. Следствием данной особенности является гибкость системы, то есть возможность изменять функциональное назначение частей путем внесения изменений в работу программы управления двигателем.

Такое свойство, как изменение функционала путем изменения кода программы управления очень заинтересовало НПО «ВЭСТ», г. Томск. В ходе своей деятельности инженеры данной компании сталкиваются с необходимостью отлаживать свои программные разработки на подобных устройствах. Также в связи с ростом популярности бесколлекторных двигателей постоянного тока, компания проводит разработку встраиваемых систем с использованием данного типа двигателей и очень заинтересовано в реализации стенда с подобным функционалом.

В ходе разработки предлагаемого решения были проанализированы и учтены требования НПО «ВЭСТ» к интересующему их устройству относительно цены и функционала.

5.8 Целевые сегменты потребителей

В связи со спецификой разрабатываемого продукта и оценки рынка лабораторных стендов были выявлены основные целевые сегменты потребителей. Ими являются мелкие и средние технические вузы, имеющие в своем составе структуры, проводящие подготовку по программам обучения «Автоматизация промышленных процессов и производств», а также «Электропривод и автоматика».

Среди частных компаний также выделены сегменты целевых потребителей. Их составляют мелкие и средние научно-производственные компании, занимающиеся разработкой и выпуском систем электроприводов.

5.9 Бизнес-модели проекта. Производственный план и план продаж

Для успешной реализации проекта выработка бизнес-модели является ключевой, особенно для описания бизнес плана и дальнейшего продвижения на рынке. Далее в таблице 5.5 описана бизнес-модель по А.Остервальдеру.

Таблица 5.5 – Бизнес-модель

Ключевые партнеры НПО «ВЭСТ»	Ключевые виды деятельности	Ценностные предложения	Взаимоотношения с клиентами	Потребительские сегменты
	Ключевые ресурсы		Каналы сбыта	
	<ul style="list-style-type: none"> - изготовление лабораторных стендов; - общение и продвижение коммерческих предложений структурам вузов и компаниям 	<ul style="list-style-type: none"> - невысокая цена; - компактность; - гибкость; - многофункциональность. 	<ul style="list-style-type: none"> - полная техническая поддержка; - выпуск и обновление сопроводительной информации. 	<ul style="list-style-type: none"> - средние и мелкие технические вузы; - мелкие и средние профильные предприятия.
	Материалы и детали, оборудование и производственное помещение		Отправка транспортной компанией после согласования коммерческого предложения	

Структура издержек	Потоки поступления доходов
<p>Постоянные: при производстве второй партии – аренда производственных площадей и оборудования.</p> <p>Переменные: оплата монтажника, расходы на материалы и детали.</p>	<p>Доходы от единичных и оптовых поставок в учебные заведения и профильные компании</p>

5.10 Стратегия продвижения продукта на рынок

В эпоху всеобщей цифровизации и распространенности интернета закономерно использование данных технологий.

У каждого вуза существует сайт со структурой университета и контактами преподавателей. Идея распространения ценностного предложения заключается в прямой e-mail рассылке для преподавателей профильных направлений вузов с целью дальнейшего сотрудничества.

Аналогичным образом производится информирование профильных компаний.

6 Социальная ответственность

Введение

В данной работе разрабатывается и исследуется универсальный лабораторный стенд с бесколлекторным двигателем постоянного тока. Испытательный стенд позволит пользователям исследовать

При проведении лабораторных работ на разрабатываемом стенде на студента воздействуют различные факторы внешней среды. Поэтому необходимо руководствоваться правилам и нормам для обеспечения безопасности трудовой деятельности.

Разработка и испытания стенда проведены в учебной лаборатории Томского политехнического университета отделения электроэнергетики и электротехники, которая соответствует всем необходимым гигиеническим нормам, отапливается и вентилируется. Для работы предоставлены все необходимые приборы и инструменты, а также средства индивидуальной защиты.

6.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

В данном пункте рассматриваются факторы для оценки условий труда, которые могут возникнуть во время разработки и эксплуатации данного электромеханического стенда. В соответствии с трудовым кодексом РФ от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 27.12.2018) следует учитывать, что проведение работ по созданию стенда и испытаний на нём не должно превышать более восьми часов в день (пятидневная рабочая неделя) при нормальных показателях уровня шума, вибрации, освещенности и т.д.

Так как испытания на стенде предполагаются в сидячем положении, то рабочее место необходимо выполнить и оборудовать по ГОСТ 12.2.032-78

ССБТ, а именно предусмотреть требования к высоте рабочей поверхности, размещению органов управления и средств отображения информации.

Также при работе со стендом неизбежно взаимодействие человека с кнопочным пультом управления и работой за персональным компьютером (снятие показаний с датчиков), поэтому следует учитывать нормы расположения элементов по ГОСТ 22614-77 и гигиенические требования по СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03.

В конструкции стенда по ГОСТ 12.2.003-91 ССБТ была предусмотрена сигнализация нарушения нормального режима работы и кнопка аварийного отключения для экстренного останова двигателя.

6.2 Производственная безопасность

В данном пункте рассматриваются опасные и вредные факторы (ГОСТ 12.0.003-2015), которые могут возникнуть во время разработки и производства стенда. Перечисленные факторы приведены в таблице 1.

Таблица 6.1 – Вредные и опасные факторы при разработке и выполнении работ

Факторы (ГОСТ 12.0.003-2015)	Этапы работ			Нормативные документы
	Разработка	Изготовление	Испытания	
Вредные факторы				
1. Отклонения показателей микроклимата	+	+	+	СанПиН 2.2.4.548–96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений
2. Превышение уровня шума			+	ГОСТ 12.1.003-2014 ССБТ. Шум. Общие требования

				безопасности. СП 51.13330.2011. Защита от шума. Актуализированная редакция СНиП 23-03-2003. СН 2.2.4/2.1.8.562–96. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории застройки.
3. Повышенный уровень вибрации			+	СН 2.2.4/2.1.8.566–96. Производственная вибрация, вибрация в помещениях жилых и общественных зданий.
4. Недостаточная освещенность	+	+	+	СП 52.13330.2016. Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95*
Опасные факторы				
5. Повышенное значение напряжения в электрической цепи (незащищенные контакты)		+	+	ГОСТ 12.1.030-81 ССБТ. Электробезопасность. Защитное заземление, зануление. ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов.
6. Движущиеся части системы стенда			+	ГОСТ 12.2.061-81 ССБТ. Оборудование производственное. Общие требования безопасности к рабочим местам.

6.2 Отклонение параметров микроклимата

Одним из необходимых условий здорового и высокопроизводительного труда является обеспечение нормальных метеорологических условий и частоты воздуха в лаборатории. Под микроклиматом помещений понимаются условия внутренней среды помещений, которые определяются действующими на организм человека сочетаниями температуры, влажности, скорости движения воздуха и теплового излучения. Согласно СанПиН 2.2.4.548–96

осуществляется разграничение работ по категориям, данный вид деятельности относится к категории II «б» по уровню энергозатрат. В таблице 2 приведены оптимальные и допустимые микроклиматические параметры, соответствующие данной категории.

Таблица 6.2 – Оптимальные и допустимые величины показателей микроклимата на рабочем месте.

Наименование	Оптимальная		Допустимая			
			Зимний период		Летний период	
	Зимний период	Летний период	Ниже допустимой	Выше допустимой	Ниже допустимой	Выше допустимой
Температура, °С	17-19	19-21	13-15,9	18,1-21	15-17,9	20,1-26
Относительная влажность, %	60-40	60-40	15-75	15-75	15-75	15-75
Скорость движения воздуха, м/с	0,2	0,2	не более 0,2	не более 0,4	не более 0,2	не более 0,5

Лабораторное помещение должно быть оборудовано естественной вентиляцией или кондиционером, обеспечивающим постоянство температуры, скорости движения воздуха и относительной влажности воздуха в холодное и теплое время года. Также помещение должно иметь систему центрального отопления для поддержания оптимальной температуры в зимнее время.

Во время проведения работ по разработке, изготовлению и испытаниям уровень температуры и влажности воздуха были соблюдены согласно СанПиН 2.2.4.548–96.

6.3 Повышенный уровень шума на рабочем месте

Работа двигателя сопровождается выделением некоторого уровня шума.

Эксплуатация системы должна происходить в лабораторной аудитории, следовательно, подчиняться санитарным нормам СН2.2.4/2.1.8.562-96 «Шум

на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки». Уровень шума не должен превышать 60 дБА.

Таблица 6.3 – Предельно допустимые уровни звукового давления, уровни звука и эквивалентные уровни звука для основных наиболее типичных видов трудовой деятельности и рабочих мест.

Вид трудовой деятельности, рабочее место	Уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц							Уровни звука и эквивалентные уровни звука (в дБА)
	31,5	63	125	250	500	1000	2000	
Аудитория в учебном заведении	79	63	52	45	39	35	32	60

Поэтому, согласно СП 51.13330.2011 при разработке технологических процессов, проектировании, изготовлении и эксплуатации машин, при организации рабочих мест следует принимать все необходимые меры по снижению шума, воздействующего на человека, до значений, не превышающих допустимые.

Поскольку уровень шума будет постоянно варьироваться при эксплуатации стенда, то были предусмотрены индивидуальные средства защиты, которые предупреждают расстройства органов слуха и нервной системы организмы. В качестве таких средств были использованы беруши и наушники.

6.4 Повышенный уровень вибрации на рабочем месте

В ходе эксплуатации того или другого механизма, могут возникать разного рода неполадки. Одной из самых распространенных является несовпадение оси вращения ротора с центральной осью. А это приводит к неправильной и неточной работе всего устройства. К тому же несбалансированная деталь со временем может нанести вред машине за

счет постоянной вибрации. Поэтому балансировку ротора необходимо провести как можно быстрее, чтобы снизить уровень шума и вибрации и тем самым продлить срок эксплуатации машины. Дисбаланс на роторе вращающейся машины значительно сокращает ее ресурс.

Помимо машины вибрации от дисбаланса могут причинить вред и человеку, который работает с ней. При проведении испытаний на стенде возникает повышенный уровень вибраций. Данный фактор негативно влияет на центральную нервную систему человека и вестибулярный аппарат. Длительное воздействие вибрации может привести к развитию виброболести.

Присутствующий вид вибрации во время испытаний на стенде относится к 3 категории общей вибрации на постоянных рабочих местах. В таблице 4 приведены допустимые значения для данной категории согласно СН 2.2.4/2.1.8.566–96.

Таблица 6.4 – Предельно допустимые значения производственной локальной вибрации.

Среднегеометрические частоты октавных полос, Гц	ПДУ виброускорения		ПДУ виброскорости	
	м/с ²	дБ	м/с 10 ⁻²	дБ
8	1,4	123	2,8	115
16	1,4	123	1,4	109
31,5	2,8	129	1,4	109
63	5,6	135	1,4	109
125	11,0	141	1,4	109
250	22,0	147	1,4	109
500	45,0	153	1,4	109
1000	89,0	159	1,4	109

Снижение воздействия вибрирующих машин и оборудования на организм человека возможно путем:

- применения виброизоляции вибрирующих машин относительно основания (в конструкции стенда предусмотрены виброгасящие опоры, которые снизят вибрации, передаваемые на стол человека-оператора стенда);

- использования дистанционного управления в технологических процессах.

В соответствии с требованиями нормативных документов для работников виброопасных профессий должен быть предусмотрен следующий внутрисменный режим труда и отдыха:

- общее время контакта с вибрирующими машинами, вибрация которых соответствует санитарным нормам, не должно превышать $2/3$ длительности рабочего дня;
- производственные операции должны распределяться между работниками так, чтобы продолжительность непрерывного воздействия вибрации, включая микропаузы, не превышала 15 – 20 мин.;
- дополнительно рекомендуются два регламентированных перерыва (для активного отдыха, проведения производственной гимнастики по специальному комплексу гидропроцедур): 20 минут – через 1 – 2 часа. после начала смены и 30 минут – через 2 часа после обеденного перерыва.

6.5 Недостаточная освещенность на рабочем месте

В помещениях со зрительными работами I – III разрядов следует применять совмещенное освещение.

По СП 52.13330.2011 нормируемая освещенность составляет $E_n = 750$ лк, коэффициент запаса $k_z = 1,6$.

6.6 Электробезопасность

Во время работы со стендом имеется угроза повреждения электрическим током, который питает электродвигатель, также существует вероятность получения травмы при соприкосновении тела работника с оголенными проводами. В соответствии с ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ существуют допустимые значения напряжений и тока, которые может пропускать человек при частоте 50 Гц, равные 2 В и 0,3 А соответственно.

При аварийном режиме испытательного стенда существуют предельно-допустимые значения пропускания тока и напряжения человеком (Таблица 5).

Таблица 6.5 – Предельно-допустимые значения тока и напряжения в аварийной ситуации

Род тока	Нормируемая величина	Предельно-допустимые значения, не более, при воздействии t,с									
		0,08	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
Переменный, 50 Гц	Напряжение, В	550	340	160	135	120	105	95	85	75	70
	Ток, А	650	400	190	160	140	125	100	90	75	65

Для защиты при косвенном прикосновении, чтобы предупредить поражение людей электрическим током в случае повреждения изоляции, применяют специальные меры, отдельно или сразу несколько из них:

- защитное заземление;
- автоматическое отключение питания;
- уравнивание потенциалов;
- выравнивание потенциалов;
- двойная или усиленная изоляция;
- сверхнизкое (малое) напряжение;
- защитное электрическое разделение цепей;
- изолирующие (непроводящие) помещения, зоны, площадки.

6.7 Требования во время работы испытательного стенда

Во избежание травматизма из-за наличия движущихся частей во время проведения испытаний запрещается прикасаться к подвижным частям стенда руками.

Приступать к работе со стендом следует при наличии полностью исправного заземления; удостоверившись в отсутствии неисправной или нарушенной изоляции питающего электрического кабеля.

На основании ГОСТ 12.2.061-81 ССБТ рабочее место должно соответствовать требованиям обеспечения безопасности и охраны здоровья. Рабочее место должно соответствовать антропометрическим показателям работника.

Также необходимо обеспечить место средствами защиты от вибрации и шума.

6.8 Экологическая безопасность

6.8.1 Анализ влияния объекта исследования на окружающую среду и «жизненного цикла»

В конструкции стенда применен электродвигатель, который питается энергией от ТЭС. Рассмотрим в качестве основного источника загрязнения экологии данной разработки двигатель, так как более 37% техногенных выбросов в атмосферу парниковых газов приходится на объекты энергетики. Технология производства электрической энергии на ТЭС связана с большим количеством отходов, выбрасываемых в окружающую среду. Сегодня проблема влияния энергетики на природу становится особенно острой, так как загрязнение окружающей среды, атмосферы и гидросферы с каждым годом всё увеличивается. При сжигании топлива на ТЭС образуются продукты сгорания, в которых содержатся: летучая зола, частички несгоревшего пылевидного топлива, серный и сернистый ангидрид, оксид азота, газообразные продукты неполного сгорания.

Все выбросы ТЭС являются токсическими веществами, негативно воздействующими на организм человека. Полициклические ароматические углеводороды обладают мощным канцерогенным действием (т.е. вызывать рак – онкологические заболевания). Содержащиеся в выбросах тяжелые металлы и микроэлементы могут накапливаться в различных органах человека или,

сосредотачиваясь в почвах, сельскохозяйственных растениях, попадать с продуктами питания в организм человека.

6.9 Обоснование мероприятий по защите окружающей среды

Учитывая всю опасность продуктов сгорания, выбрасываемых теплоэлектростанциями, их проектирование и строительство ведётся с максимальным соблюдением экологических требований, целью которых является недопущение выбросов вредных веществ, превышающих предельно допустимые концентрации.

При непосредственном выбросе на производстве требуется применять специальные системы вентиляции воздуха для уменьшения выбросов в окружающую среду. Предельно-допустимые нормы выбросов необходимо регламентировать согласно ГН 2.2.5.3532–18.

Энергосбережение в любой сфере сводится по существу к снижению бесполезных потерь энергии. Анализ потерь в сфере производства, распределения и потребления электроэнергии показывает, что большая часть потерь – до 90% – приходится на сферу энергопотребления, тогда как потери при передаче электроэнергии составляют лишь 9–10%. Поэтому основные усилия по энергосбережению сконцентрированы именно в сфере потребления электроэнергии.

Основная роль в увеличении эффективности использования энергии принадлежит современным энергосберегающим технологиям. Для испытательного стенда был выбран маломощный электродвигатель, мощностью всего порядка 0,25 кВт. В двигателях с малой мощностью и большим КПД происходит меньше затрат энергии, тем самым уменьшаются выбросы в атмосферу.

6.10 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

6.10.1 Анализ ЧС, которые может инициировать объект исследования

Использование лабораторного стенда может инициировать несколько чрезвычайных ситуаций. Наиболее типичной ситуацией, которая может произойти на производстве – это возникновение пожара на рабочем месте при перегрузке электродвигателя и большом нагреве (неисправность оборудования). Второй чрезвычайной ситуацией является электрическое поражение током человека, а именно плохо изолированные провода.

6.10.2 Анализ ЧС, которые могут произойти во время исследования

Во время проведения испытаний могут произойти такие же чрезвычайные ситуации, а именно возгорание в лаборатории (неисправность проводки, поджог и т.д.) и электропоражение током (неправильное расположение проводки с неизолированными проводами; стихийное бедствие (землетрясение), при котором могут нарушиться электрические каналы).

6.10.3 Мероприятия для предотвращения ЧС и их устранения

В предыдущих пунктах были выявлены две основных ЧС: пожар и электропоражение током.

Пожарная профилактика обеспечивается: системой предотвращения пожара; системой противопожарной защиты; организационно - техническими мероприятиями.

К мерам предотвращения пожара относятся:

- применение средств защитного отключения возможных источников загорания (защитного зануления);
- применение искробезопасного оборудования;
- применение устройства молниезащиты здания; выполнение правил (инструкций) по пожарной безопасности.

К мерам противопожарной защиты относятся: применение пожарных извещателей; средств коллективной и индивидуальной защиты от факторов пожара; системы автоматической пожарной сигнализации; порошковых или углекислотных огнетушителей, два ящика с песком 0,5 м³.

При возникновении ЧС необходимо немедленно сообщить об этом по телефону «01» в пожарную охрану (при этом необходимо назвать адрес, место возникновения пожара, а также сообщить свою фамилию и должность); дать сигнал тревоги добровольной пожарной дружине, сообщить руководителю (генеральному директору, начальнику цеха, заведующей магазином и т.п.) или его заместителю о пожаре; принять меры по организации эвакуации людей (эвакуацию начинать из помещения, где возник пожар, а также из помещений, которым угрожает опасность распространения огня и дыма; одновременно с эвакуацией людей, приступить к тушению пожара своими силами и имеющимися средствами пожаротушения (огнетушители, вода, песок и т.п.).

Следующей чрезвычайной ситуацией является поражение электрическим током. Мероприятия по предотвращению поражения током:

- соблюдение соответствующих расстояний до токоведущих частей или путем закрытия, ограждения токоведущих частей;
- применение блокировки аппаратов и ограждающих устройств для предотвращения ошибочных операций и доступа к токоведущим частям;
- применение предупреждающей сигнализации, надписей и плакатов;
- применение устройств для снижения напряженности электрических и магнитных полей до допустимых значений;
- основная изоляция токоведущих частей.

При поражении электрическим током необходимо оказать пострадавшему первую медицинскую помощь, а именно постараться устранить источник тока (отключить рубильник), вызвать скорую помощь по телефону 03. Если пострадавший не потерял сознание, необходимо обеспечить

ему отдых, а при наличии травм или повреждений (ушибы, переломы, вывихи, ожоги и т. д.) необходимо оказать ему первую помощь до прибытия врача или доставить в ближайшее лечебное учреждение.

Если пострадавший потерял сознание, но дыхание сохранилось, необходимо ровно и удобно уложить его на мягкую подстилку — одеяло, одежду и т. д., расстегнуть ворот, пояс, снять стесняющую одежду, очистить полость рта от крови, слизи, обеспечить приток свежего воздуха, дать понюхать нашатырный спирт, обрызгать водой, растереть и согреть тело.

При отсутствии признаков жизни (при клинической смерти отсутствует дыхание и пульс, зрачки глаз расширены из-за кислородного голодания коры головного мозга) или при прерывистом дыхании следует быстро освободить пострадавшего от стесняющей дыхание одежды, очистить рот и делать искусственное дыхание и непрямой массаж сердца.

6.11 Выводы по разделу

При разработке и проведении исследований с использованием лабораторного стенда выявлены опасные и вредные факторы (шум, вибрация, освещенность и т.д.), а также мероприятия по их устранению.

Также указаны все необходимые гигиенические требования для безопасной организации рабочего места. Выявлена основная экологическая проблема: загрязнение атмосферы вредными химическими веществами от ТЭС, которая снабжает энергией движущую часть стенда - двигатель. Рассмотрены чрезвычайные ситуации, которые могут возникнуть (поражение током и пожар) и описаны действия для их предотвращения.

Заключение по работе

В настоящей выпускной квалификационной работе разработана и реализована в виде прототипа микропроцессорная система управления маломощным бесколлекторным двигателем на базе микроконтроллера STM32.

Основным при выборе микроконтроллера является наличие аппаратных инструментов для формирования трехфазной ШИМ-модуляции, наличие специализированной периферии и вычислительных возможностей для реализации задачи автоматизации. Работа с микроконтроллером и написание программы на языке «Си» происходило в специализированных программных продуктах.

Выбрана наиболее популярная и простая в управлении схема полупроводникового коммутатора на основе полевых транзисторов. Выбор ключей произведен в соответствии с рекомендациями по проектированию преобразователей энергии для систем электропривода.

Сформированы устройства согласования сигналов управления между микроконтроллером и затворами полевых транзисторов.

Реализована система индикации с использованием как программно управляемых светодиодов, так и светодиодов, работающих синхронно с силовыми ключами для индикации их состояния.

Для непосредственного управления состоянием ключей применены тактовые кнопки с использованием необходимой схемы подключения к микроконтроллеру и программы. Навигация между режимами автоматической работу устройства производится с помощью специального инкрементального механического энкодера. Для его корректной работы применены специализированные аппаратные средства микроконтроллера – таймеры, а также программный код.

Реализация настраиваемой трехфазной синусоидальной ШИМ выполнена на расширенных таймерах с применением прямого доступа к памяти.

Составлена принципиальная схема всего устройства, а на ее основе разведена печатная плата, которая была изготовлена на фрезерном станке с ЧПУ. После чего был произведен монтаж элементов, запуск и настройка аппаратной части. Далее была произведена отладка основных рабочих режимов устройства, после чего проведены испытания системы. В ходе использования разработанной системы было установлено, что она выполняет все заложенные функции.

Возможность коммерциализация проекта оценивается как хорошая. Разрабатываемое устройство может составить конкуренцию существующим решениям в некоторой области задач.

В ходе работы над концепцией стартап-проекта был проведен анализ и сегментация рынка, после чего установлены ключевые потребители предполагаемого продукта. Составлен план расходов и продаж. На основании этого была рассчитана прибыль от коммерциализации решения.

Рассмотрены опасные и вредные факторы, а также вопросы экологической безопасности при работе с разрабатываемым устройством. Основными опасными факторами являются повышенное значение напряжения в электрической цепи и движущиеся части системы.

Список использованных источников

1. Бут Д.А. Бесколлекторные электрические машины: учебное пособие для электромеханических и электроэнергетических специальностей вузов. – М.: Высш. Шк., 1990. – 416 с.
2. Аракелян А. К. Вентильные электрические машины в системах регулируемых электроприводов: Учебное пособие для вузов: В 2 т. Т.1 / А.К.Аракелян, А.А.Афанасьев. — М.: Высш. шк., 2006. — 546 с.: ил.
3. Панкратов В.В. Вентильный электропривод: от стиральной машины до металлорежущего станка и электровоза // Электронные компоненты. – 2007. – № 2. – С. 5-17.
4. Москаленко В.В. Учеб. пособие для студ. учреждений сред. проф. образования – М.: Мастерство: Высшая школа, 2000. – 368 с.
5. ST STM 32 F1 series Reference manual R0008 [Электронный ресурс] / st.com – Режим доступа: https://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/reference_manual/59/b9/ba/7f/11/af/43/d5/CD00171190.pdf/files/CD00171190.pdf/jcr:content/translations/en.CD00171190.pdf, (свободный, дата обращения: 01.05.2020).
6. Техническое описание и общие принципы ремонта HDD IDE [Электронный ресурс] / acelab.ru – Режим доступа: <https://www.acelab.ru/dep.pc/products/doc-hddtech.pdf>, (свободный, дата обращения: 05.05.2020).
7. Остриров В.Н. Проектирование электронных преобразователей для регулируемых электроприводов: учебное пособие / В.Н. Остриров. – М.: МЭИ, 2008. – 72 с.
8. Infineon IRF7309 datasheet [Электронный ресурс] / infineon.com - Режим доступа:

- <https://www.infineon.com/cms/en/product/power/mosfet/20v-60v-complementary-mosfet/irf7309/>, (свободный, дата обращения: 05.05.2020).
9. Корис Р. Справочник инженера-схемотехника / Корис Р., Шмидт-Вальтер Х. – Москва: Техносфера, 2008. – 608 с.
 10. Symmetron Каталог постоянных SMD резисторов [Электронный ресурс] / symmetron.ru – Режим доступа: <https://www.symmetron.ru/suppliers/resistors1/passive09-resistors-smd.pdf> (свободный, дата обращения: 25.05.2020).
 11. Березин О.К. Источники электропитания радиоэлектронной аппаратуры. – М.: Три Л, 2000. – 400 с.
 12. Семенов Б.Ю. Силовая электроника: от простого к сложному. – М.: СОЛОН-Пресс, 2005. – 416 с.: ил.
 13. Бобрешов А.М. Схемы управления затворами силовых транзисторов / Бобрешов А.М, Дыбой А.В., Ватхик С., Куролап М.С. // ВЕСТНИК ВГУ. Серия: Физика. Математика. - 2010. № 2. – С.189-197.
 14. Infineon BCR533 datasheet [Электронный ресурс] / infineon.com - Режим доступа: https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-BCR533-DS-v01_01-en.pdf (свободный, дата обращения: 25.05.2020).
 15. Блок питания B0L012ESB [Электронный ресурс] / voltmaster.ru Режим доступа: <http://www.voltmaster.ru/cgi-bin/qwery.pl?id=2010029976> (свободный, дата обращения: 28.05.2020).
 16. Спецификация интерфейса USB [Электронный ресурс] / usb.org Режим доступа: <https://www.usb.org/> (свободный, дата обращения: 28.05.2020).

- 17.ST Software CubeMX [Электронный ресурс] / Режим доступа: https://www.st.com/resource/en/data_brief/stm32cubemx.pdf (свободный, дата обращения: 29.05.2020).
- 18.ARM Keil [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://www2.keil.com/mdk5/uvision/> (свободный, дата обращения: 29.05.2020).
- 19.Рюмик С.М. 1000 и одна микроконтроллерная схема. Вып. 4/ - М.: ДМК-Пресс, 2017. – 336 с.: ил.
- 20.Трудовой кодекс РФ от 30.12.2001 № 197-ФЗ (ред. от 27.12.2018).
- 21.ГОСТ 12.2.032-78 ССБТ. «Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования».
- 22.ГОСТ 22614-77. «Система "человек-машина". Выключатели и переключатели клавишные и кнопочные. Общие эргономические требования».
- 23.СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03. «Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы».
- 24.ГОСТ 12.2.003-91 ССБТ. «Оборудование производственное. Общие требования безопасности».
- 25.ГОСТ 12.0.003-2015. «Опасные и вредные производственные факторы. Классификация».
- 26.СанПиН 2.2.4.548–96. «Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений».
- 27.ГОСТ 12.1.003-2014 ССБТ. «Шум. Общие требования безопасности».
- 28.СП 51.13330.2011. «Защита от шума».
- 29.СНиП 23-03-2003. «Защита от шума».
- 30.СН 2.2.4/2.1.8.562–96. «Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки».

- 31.СП 52.13330.2016. «Естественное и искусственное освещение».
- 32.СНиП 23-05-95*. «Естественное и искусственное освещение».
- 33.ГОСТ 12.1.030-81 ССБТ. «Электробезопасность. Защитное заземление. Зануление»
- 34.ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. «Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов».
- 35.ГОСТ 12.2.061-81 ССБТ. «Оборудование производственное. Общие требования безопасности к рабочим местам».

Приложение А

(обязательное)

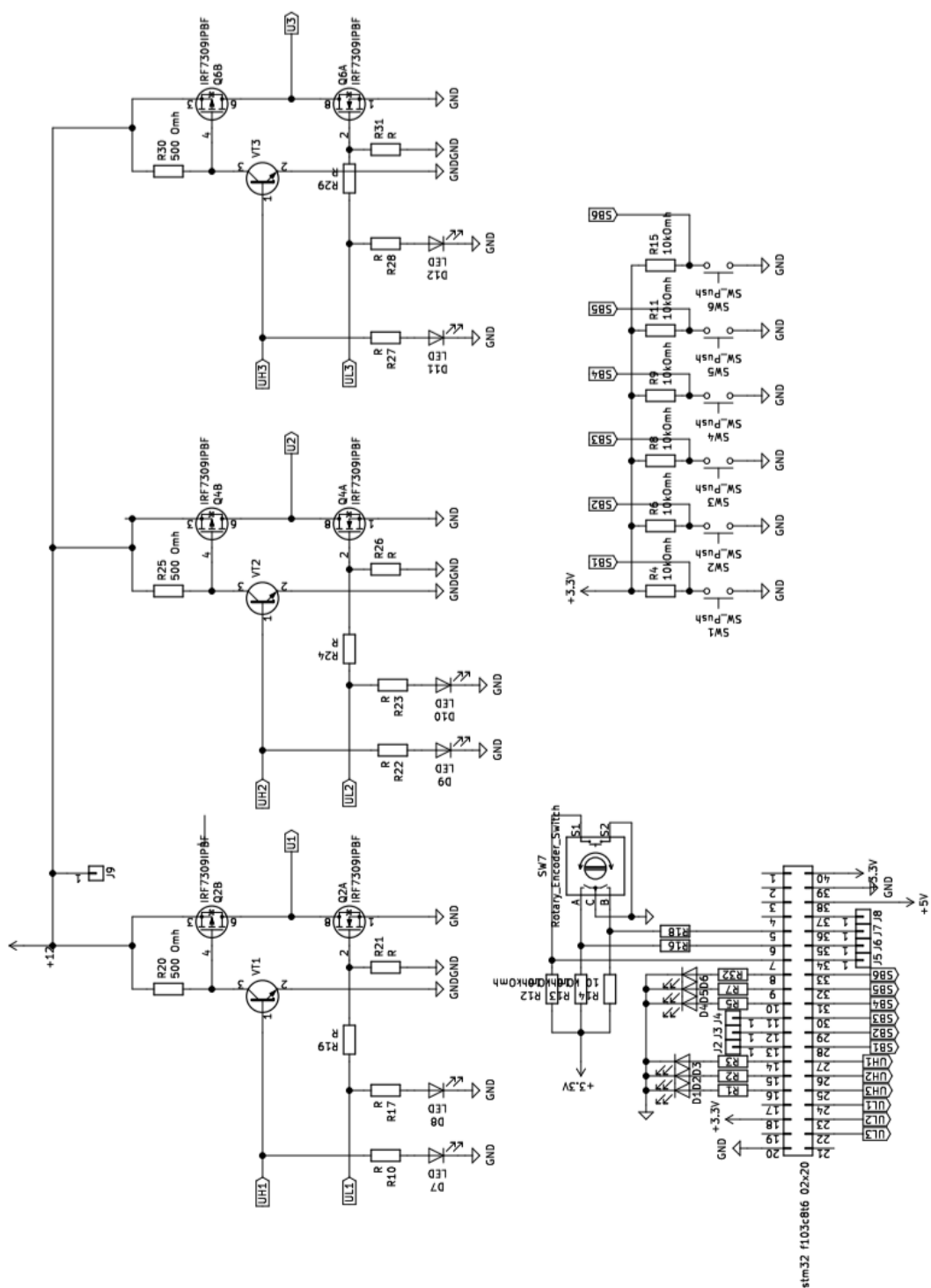


Рисунок А.1 – Принципиальная схема

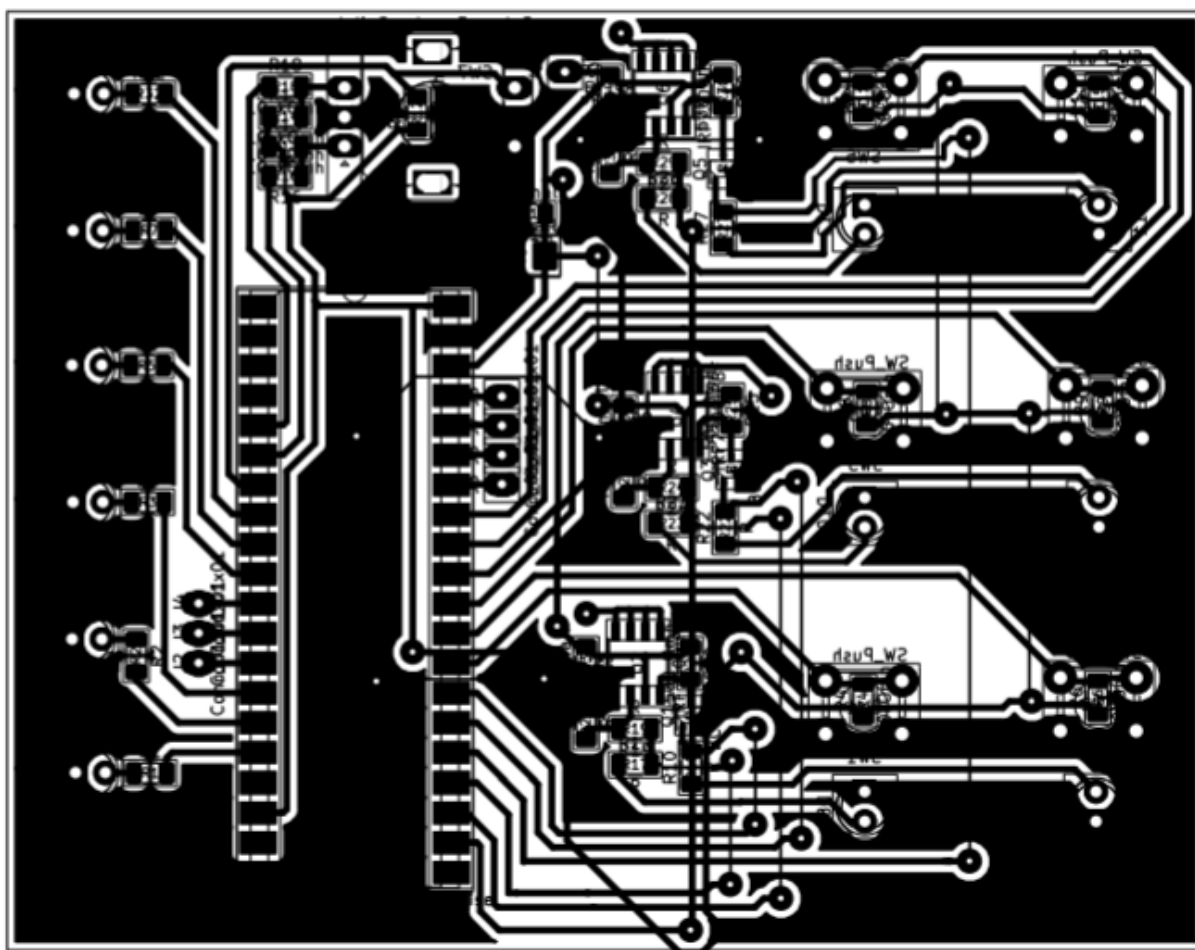


Рисунок А.2 – Принципиальная схема

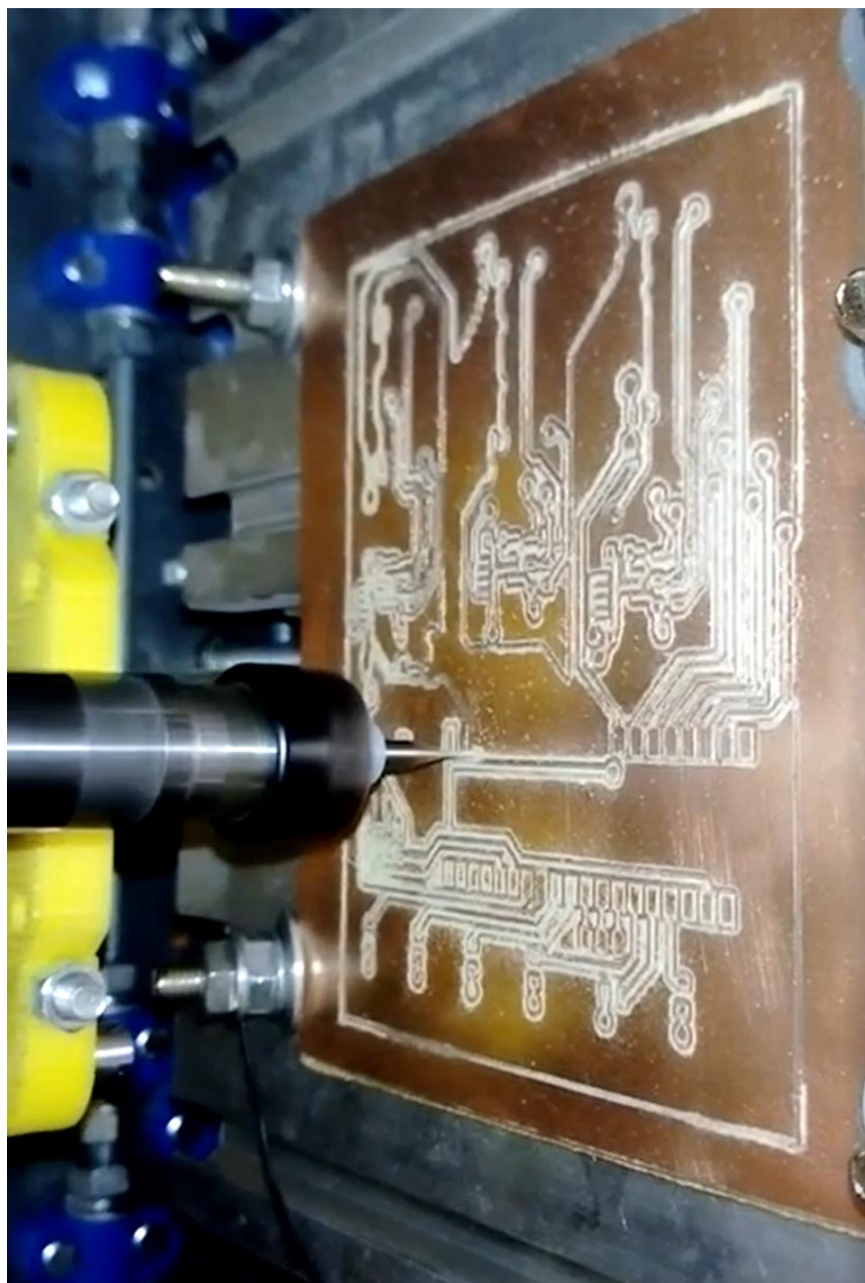


Рисунок А.3 – Фрезеровка печатной платы

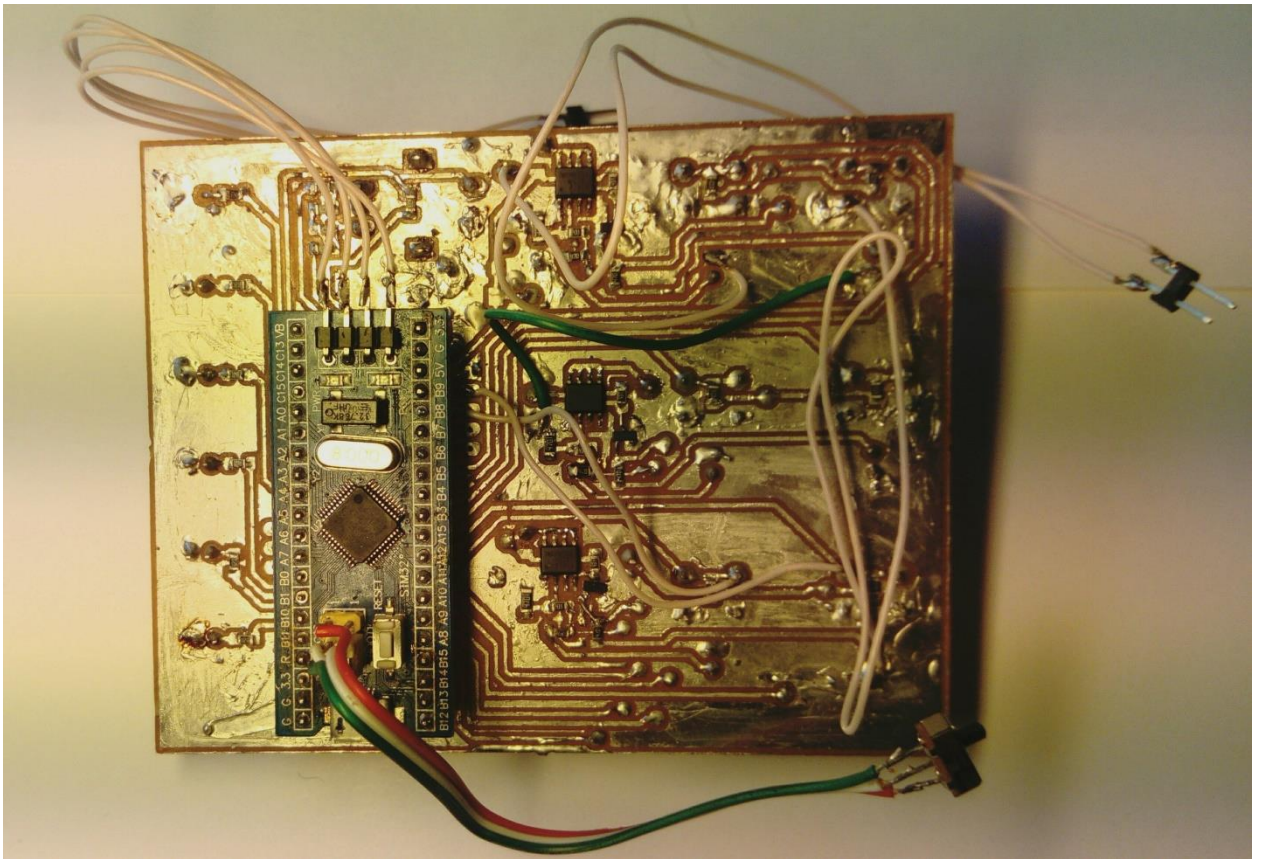


Рисунок А.4 – Печатная плата с установленными элементами

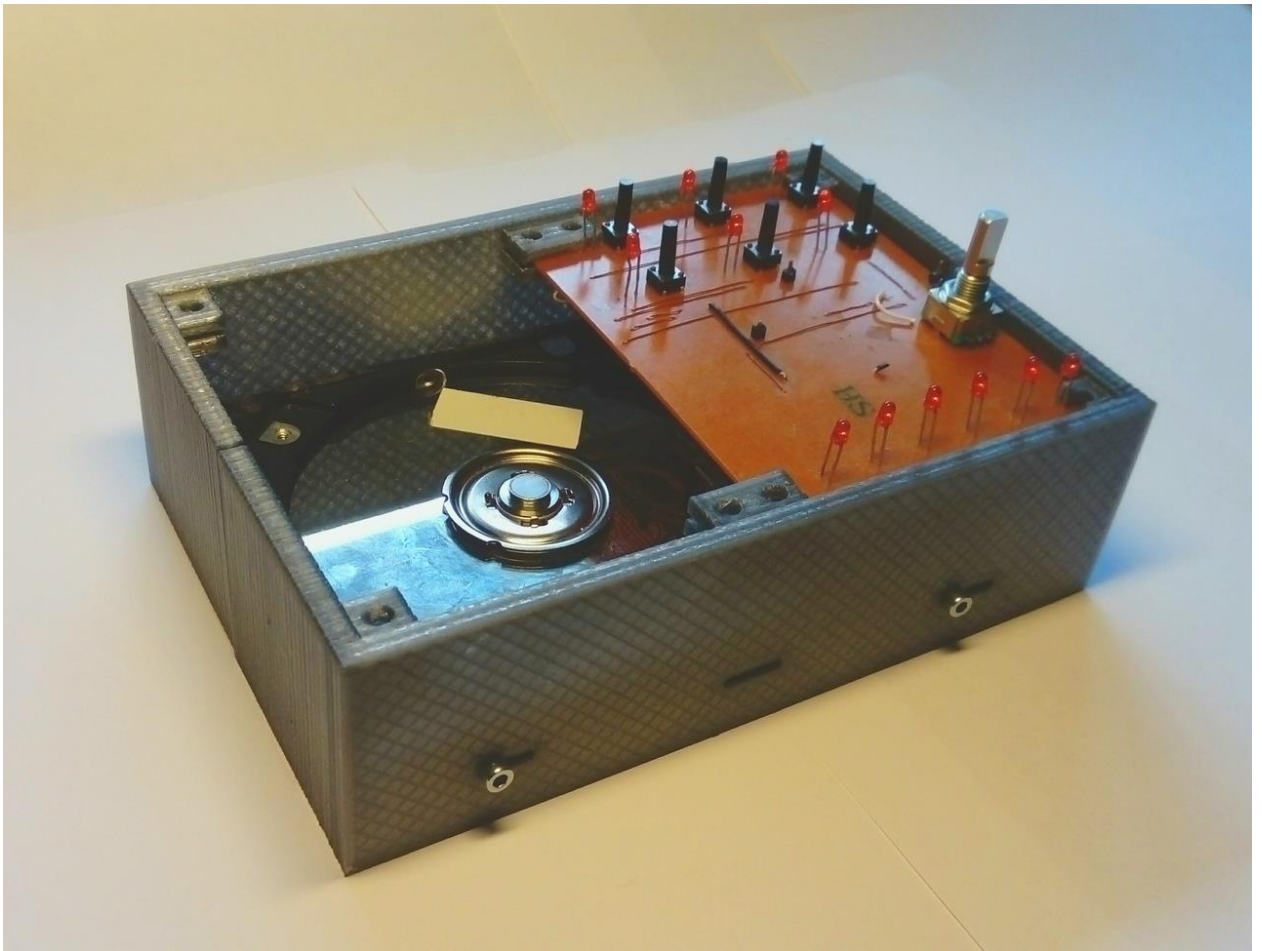


Рисунок А.5 – Прототип устройства