

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации**  
**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ**  
**УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ**  
**НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИТМО**  
**ITMO University**

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА/GRADUATION THESIS**

**Разработка макета электропривода с бесконтактным моментным электродвигателем**

**Автор/ Author**

Иванов Владислав Андреевич

**Направленность (профиль) образовательной программы/Major**

Интеллектуальная робототехника 2017

**Квалификация/ Degree level**

Бакалавр

**Руководитель ВКР/ Thesis supervisor**

Бойков Владимир Иванович, доцент, кандидат технических наук, Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники, доцент (квалификационная категория "ординарный доцент")

**Группа/Group**

R3435

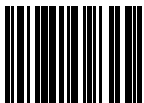
**Факультет/институт/кластер/ Faculty/Institute/Cluster**

факультет систем управления и робототехники

**Направление подготовки/ Subject area**

15.03.06 Мехатроника и робототехника

Обучающийся/Student


Документ подписан	
Иванов Владислав Андреевич	
19.05.2021	

(эл. подпись/ signature)

Иванов  
Владислав  
Андреевич

(Фамилия И.О./ name  
and surname)

Руководитель ВКР/  
Thesis supervisor

Документ подписан	
Бойков Владимир Иванович	
19.05.2021	

(эл. подпись/ signature)

Бойков  
Владимир  
Иванович

(Фамилия И.О./ name  
and surname)

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИТМО  
ITMO University**

**ЗАДАНИЕ НА ВЫПУСКНУЮ КВАЛИФИКАЦИОННУЮ РАБОТУ /  
OBJECTIVES FOR A GRADUATION THESIS**

**Обучающийся / Student** Иванов Владислав Андреевич

**Группа/Group** R3435

**Факультет/институт/кластер/ Faculty/Institute/Cluster** факультет систем управления и робототехники

**Квалификация/ Degree level** Бакалавр

**Направление подготовки/ Subject area** 15.03.06 Мехатроника и робототехника

**Направленность (профиль) образовательной программы/Major** Интеллектуальная робототехника 2017

**Специализация/ Specialization**

**Тема ВКР/ Thesis topic** Разработка макета электропривода с бесконтактным моментным электродвигателем

**Руководитель ВКР/ Thesis supervisor** Бойков Владимир Иванович, доцент, кандидат технических наук, Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники, доцент (квалификационная категория "ординарный доцент")

**Срок сдачи студентом законченной работы до / Deadline for submission of complete thesis** 17.05.2021

**Техническое задание и исходные данные к работе/ Requirements and premise for the thesis**

Разработать стенд для исследования динамических характеристик электропривода на базе бесколлекторного двигателя постоянного тока. Стенд должен быть информационно связан с компьютером и работать под управлением программы MatLab Simulink в режиме реального времени. Стенд должен отвечать следующим требованиям: Исследуемый двигатель – ДБМ63; Нагрузочный двигатель – коллекторный постоянного тока; Напряжение питания стенда – 220 В 50 Гц, использовать покупной преобразователь питания; Стенд должен содержать датчики: тока и напряжения питания исследуемого двигателя, датчик момента нагрузки и датчик угла поворота вала двигателя; Тип встроенного микроконтроллера стенда – демомодуль на базе STM32F407;

**Содержание выпускной квалификационной работы (перечень подлежащих разработке вопросов)/ Content of the thesis (list of key issues)**

Введение

- 1 Обзор существующих решений систем управления бесколлекторными двигателями
- 2 Разработка функциональной схемы стенда
- 3 Разработка конструкции стенда. Определение конструктивных характеристик
- 4 Разработка структурной схемы системы управления. Определение параметров
- 5 Синтез системы управления двигателем

6 Результаты моделирования  
Заключение  
Список использованных источников

**Перечень графического материала (с указанием обязательного материала) / List of graphic materials (with a list of required material)**

Схема электрическая функциональная  
Схема электрическая структурная  
Схема электрическая принципиальная  
Сборочный чертеж  
Презентация

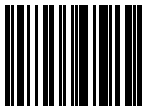
**Исходные материалы и пособия / Source materials and publications**

1. Акелян А.К., Афанасьев А.А. Вентильные электрические машины в системах регулируемых электроприводов. Том 1. Учебное пособие для вузов. – М.: Высшая школа. 2006.
2. Калачев Ю.Н. Векторное регулирование (заметки практика) . Методическое пособие. – М.: ЭФО. 2013.

**Дата выдачи задания/ Objectives issued on 28.12.2020**

**СОГЛАСОВАНО / AGREED:**


Руководитель ВКР/  
Thesis supervisor

Документ подписан	
Бойков Владимир Иванович	
28.12.2020	

(эл. подпись)

Бойков  
Владимир  
Иванович

Задание принял к  
исполнению/ Objectives  
assumed by

Документ подписан	
Иванов Владислав Андреевич	
28.12.2020	

(эл. подпись)

Иванов  
Владислав  
Андреевич

Руководитель ОП/ Head  
of educational program

Документ подписан	
Бобцов Алексей Алексеевич	
29.04.2021	

(эл. подпись)

Бобцов Алексей  
Алексеевич

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИТМО  
ITMO University**

**АННОТАЦИЯ  
ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ /  
SUMMARY OF A GRADUATION THESIS**

**Обучающийся/ Student**

Иванов Владислав Андреевич

**Наименование темы ВКР / Title of the thesis**

Разработка макета электропривода с бесконтактным моментным электродвигателем

**Наименование организации, где выполнена ВКР/ Name of organization**

Университет ИТМО

**ХАРАКТЕРИСТИКА ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ/  
DESCRIPTION OF THE GRADUATION THESIS**

**1. Цель исследования / Research objective**

Разработать учебный стенд для исследования динамических характеристик электропривода на базе бесколлекторного двигателя постоянного тока

**2. Задачи, решаемые в ВКР / Research tasks**

1. Анализ существующих учебных или тестовых стендов на базе бесколлекторных двигателей; 2. Исследование методов управления бесколлекторными двигателями; 3. Разработка конструкции стенда. Подготовка конструкторской документации для его изготовления; 4. Синтез и демонстрационное моделирование систем управления бесколлекторными двигателями, которые могут быть реализованы с использованием разработанного учебного стенда; 5. Анализ полученных результатов моделирования.

**3. Краткая характеристика полученных результатов / Short summary of results/conclusions**

Разработанный стенд можно использовать для исследований или тестирования бесколлекторных двигателей. Стенд позволяет снимать различные параметры двигателя, такие как, например, ток в обмотках, напряжение или создаваемый крутящий момент. Также с помощью стенда можно исследовать работу двигателя под нагрузкой, либо же, наоборот, исследовать работу двигателя в условиях, близких к идеальным в плане трения. Данные со стенда могут быть отправлены на компьютер для дальнейшей обработки и анализа, это возможно благодаря тому, что стенд поддерживает интерфейс USB (виртуальный COM порт) и двадцатипятипиновый разъем DB-25, на базе которого может быть реализован собственный интерфейс передачи данных. Стенд проектировался под отладочную плату STM32F407G-DISC1, однако его использование возможно с любым микроконтроллером, который поддерживает ШИМ, АЦП и SPI.

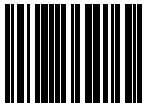
**4. Наличие публикаций по теме выпускной работы/ Have you produced any publications on the topic of the thesis**

**5. Наличие выступлений на конференциях по теме выпускной работы/ Have you produced any conference reports on the topic of the thesis**

**6. Полученные гранты, при выполнении работы/ Grants received while working on the thesis**

**7. Дополнительные сведения/ Additional information**

Обучающийся/Student

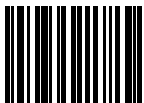
Документ подписан	
Иванов Владислав Андреевич	
19.05.2021	

(эл. подпись/ signature)

Иванов  
Владислав  
Андреевич

(Фамилия И.О./ name  
and surname)

Руководитель ВКР/  
Thesis supervisor

Документ подписан	
Бойков Владимир Иванович	
19.05.2021	

(эл. подпись/ signature)

Бойков  
Владимир  
Иванович

(Фамилия И.О./ name  
and surname)

## СОДЕРЖАНИЕ

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ . . . . .	8
ВВЕДЕНИЕ . . . . .	9
1 ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ УЧЕБНЫХ СТЕНДОВ НА БАЗЕ БЕСКОЛЛЕКТОРНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ . . . . .	11
1.1 Типовой комплект учебного оборудования «Вентильный двигатель» . . . . .	11
1.2 Стенд SkyRC Extreme BMC-01 для проверки бесколлек- торных двигателей . . . . .	12
1.3 Типовой комплект учебного оборудования «Микропро- цессорная система управления вентильным двигателем», исполнение моноблочное с ноутбуком» . . . . .	13
2 РАЗРАБОТКА ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ СХЕМЫ СТЕНДА . . .	14
3 РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ СТЕНДА . . . . .	16
3.1 Бесконтактный моментный двигатель . . . . .	16
3.2 Нагрузочный двигатель постоянного тока . . . . .	20
3.3 Измерительные устройства . . . . .	22
3.4 Микроконтроллер . . . . .	25
3.5 Модуль управления . . . . .	26
3.6 Блок питания . . . . .	27
3.7 Описание конструкции . . . . .	27
4 РАЗРАБОТКА СТРУКТУРНОЙ СХЕМЫ СИСТЕМЫ УПРАВ- ЛЕНИЯ. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ . . . . .	28
4.1 Синхронная машина . . . . .	28
4.2 Коммутатор . . . . .	30
4.3 ШИМ . . . . .	31
4.4 Двигатель . . . . .	32
5 СИНТЕЗ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДВИГАТЕЛЕМ . . . . .	34
5.1 Линейная непрерывная модель . . . . .	34

Подп. и дата	3.3	Измерительные устройства . . . . .	22
	3.4	Микроконтроллер . . . . .	25
	3.5	Модуль управления . . . . .	26
	3.6	Блок питания . . . . .	27
	3.7	Описание конструкции . . . . .	27
Инв. № дубл.	4	РАЗРАБОТКА СТРУКТУРНОЙ СХЕМЫ СИСТЕМЫ УПРАВ- ЛЕНИЯ. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ . . . . .	28
	4.1	Синхронная машина . . . . .	28
	4.2	Коммутатор . . . . .	30
	4.3	ШИМ . . . . .	31
	4.4	Двигатель . . . . .	32
Взам. инв. №	5	СИНТЕЗ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДВИГАТЕЛЕМ . . . . .	34
	5.1	Линейная непрерывная модель . . . . .	34
Подп. и дата			
Инв. № подл.			

					ФСУиР.205.R3435.001 ПЗ			
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата				
Разраб.		Иванов В. А.			Разработка макета электропривода с бесконтактным моментным электродвигателем			
Пров.		Бойков В. И.						
					Университет ИТМО ФСУиР гр. R3435			
Н. контр.								
Утв.								
					Лит.	Лист	Листов	
						6	46	



## СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

## АЦП - Аналого-цифровой преобразователь

## БМП - Бесконтактный моментный привод

ВСВ - Вход-состояние-выход

# ГЛОНАСС - Глобальная навигационная спутниковая система

## ДБМ - Двигатель бесконтактный моментный

ДПТ - Двигатель постоянного тока

МДС - Магнитодвижущая сила

ПИ(-регулятор) - Пропорционально-интегральный(-регулятор)

ПК - Персональный компьютер

## ПП - Переходной процесс

ПФ - Передаточная функция

## ШИМ - Широтно-импульсная модуляция

## SPI - Serial Peripheral Interface

## USB - Universal Serial Bus

[illegible]



## ВВЕДЕНИЕ

В современном мире электропривод — это, без преувеличения, одна из важнейших частей систем автоматизации производственных процессов. Основной задачей конструкторов является проектирование и реализация электроприводов с как можно большими скоростными и точностными характеристиками.

В наши дни все большую популярность набирают появившиеся относительно недавно бесконтактные моментные электродвигатели. Главное отличие таких двигателей от обычных ДПТ — это отсутствие корпуса, вала, подшипников и, конечно, коллекторов. Такие двигатели предназначены для встраивания в объект управления без редуктора. Это важно, потому что редуктор — это дорогостоящий и шумный узел, но еще важнее то, что он отрицательно влияет на точность управляемого электропривода из-за наличия зазоров и упругих деформаций. Также немаловажно, что отсутствие коллекторных щеток исключает явление искрения этих самых щеток и значительно повышает надежность и срок эксплуатации электромашины, а также допускает применение таких двигателей, например, на взрыво-/огнеопасных производствах.

Двигатели такого типа предназначены для работы в локально замкнутой (с датчиками положения ротора) или разомкнутой по углу системам регулирования и находят широкое применение в:

- быстродействующих следящих системах высокой точности;
- системах автоматического управления, работающих в особо тяжелых условиях эксплуатации;
- исполнительных системах управления роботов и манипуляторов;
- сфере медицинского приборостроения, потому что к медицинской технике предъявляются повышенные требования к уровню шума, уровню пульсаций вращающего момента и другим подобным характеристикам;
- бытовых товарах, например, стиральные машины;
- военной промышленности.

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата	<b>ФСУиР.205.R3435.001 ПЗ</b>					Лист
										9
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата						

На сайте [1] разработчиков и производителей двигателей серии ДБМ ОАО «МАШИНОАППАРАТ» представлены конкретные примеры применения, вот лишь некоторые из них:

- Оптико-локационная станция ОЛС-УЭ для самолетов-истребителей;
- Панорамический прицел командира, устанавливаемый на башню танка;
- Солнечные датчики 331К, использующиеся на спутниках системы ГЛОНАСС.

Такие сферы применения обусловлены тем, что моментные двигатели обеспечивают высокие вращающие моменты на небольшой скорости и одновременно высокую повторяемость, динамику и точность позиционирования.

Очевидно, что для управления приводами, построенными на бесконтактных моментных электродвигателях необходимы несколько иные системы управления и, как следствие, схемотехнические и программные решения. Разработанный макет нужен как раз таки для решения исследовательских и образовательных задач.

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата	<div style="text-align: center; font-size: 1.2em; font-weight: bold;">ФСУиР.205.R3435.001 ПЗ</div>					Лист
										10
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата						

Инва. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инва. № дубл.	Подп. и дата

Стенд (рисунок 1.1) предназначен для разработки и исследований новых двигательных установок транспортных и подъемно-перегрузочных систем, основанных на использовании бесколлекторного двигателя постоянного тока с постоянными магнитами, систем управления такими установками, с использованием датчиков Холла и различными способами коммутации обмоток двигателя, а также особенностей их конструкции и электромеханических узлов и агрегатов, рабочих электромеханических процессов.

Одним из главных недостатков данного стенда является то, что двигатель спрятан от глаз пользователя. Задача обучения включает в себя не толь-

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата

Этот прибор является высокоточным электронное устройством специально разработанное для проверки бесколлекторных электромоторов. Он может измерять такие значения как:

- а также, проверять функционирование датчика Холла (для датчиковых моторов). Стенд оснащён жидкокристаллическим дисплеем 2х16 знаков, который отображает в режиме реального времени измерения значений.

Прибор поддерживает работу с датчиковыми и бездатчиковыми бесколлекторными моторами.

В комплект поставки сам двигатель не входит. Более существенный минус заключается в том, что снятые данные сложно обрабатывать. Такой модуль годится только для простых лабораторных работ, просто ради ознакомления с изучаемой темой. Зато, он имеет относительно невысокую цену - 10 562 рублей на момент апреля 2021 года.

### 1.3 Типовой комплект учебного оборудования «Микропроцессорная система управления вентильным двигателем», исполнение моноблочное с ноутбуком»



Рисунок 1.3 – Внешний вид комплекта

Лабораторный стенд представляет собой моноблок, в котором реализована микропроцессорная система управления вентильным электродвигателем. Функционально стенд состоит из двух частей – бесколлекторный двигатель и микроконтроллер AVR.

Из недостатков этого комплекта можно отметить, опять же, высокую цену - 111 804 рублей на момент апреля 2021 года, а также выбор микроконтроллера. Стенд выполнен на базе микроконтроллера Atmega 8535, который является восьмибитным, имеет всего 8 килобайт флеш-памяти и подходит не для всех вычислительных задач.

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата

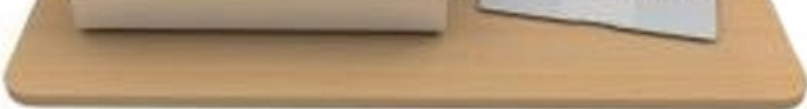


Рисунок 1.3 – Внешний вид комплекта

Лабораторный стенд представляет собой моноблок, в котором реализована микропроцессорная система управления вентильным электродвигателем. Функционально стенд состоит из двух частей – бесколлекторный двигатель и микроконтроллер AVR.

Из недостатков этого комплекта можно отметить, опять же, высокую цену - 111 804 рублей на момент апреля 2021 года, а также выбор микроконтроллера. Стенд выполнен на базе микроконтроллера Atmega 8535, который является восьмибитным, имеет всего 8 килобайт флеш-памяти и подходит не для всех вычислительных задач.

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	ФСУиР.205.R3435.001 ПЗ	Лист
						13

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата

Описанной выше конфигурации хватает для изучения скоростных и точностных характеристик исследуемого двигателя. Тем не менее, для изучения силовых параметров был добавлен еще один двигатель для создания

искусственной нагрузки на валу. Этот двигатель также управляется с помощью микроконтроллера через драйвер. Было решено не реализовывать возможность реверса этого двигателя, потому что этот функционал просто не нужен.

Данные о моменте не валу предлагается собирать с помощью тензодатчика. Более подробно данное решение будет описано в следующей главе.

Исходя из изложенных выше требований была разработана функциональная схема, представленная в документе ФСУиР.205.R3435.001 Э2.

[illegible]

Инва. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инва. № дубл.	Подп. и дата

В качестве основного двигателя, на базе которого и построен БМП, был выбран двухфазный двигатель ДБМ 63 - 0,06 - 3 - 2. Его примерный внешний вид приведен на рисунке 3.1, а его характеристики представлены в таблице 3.1.

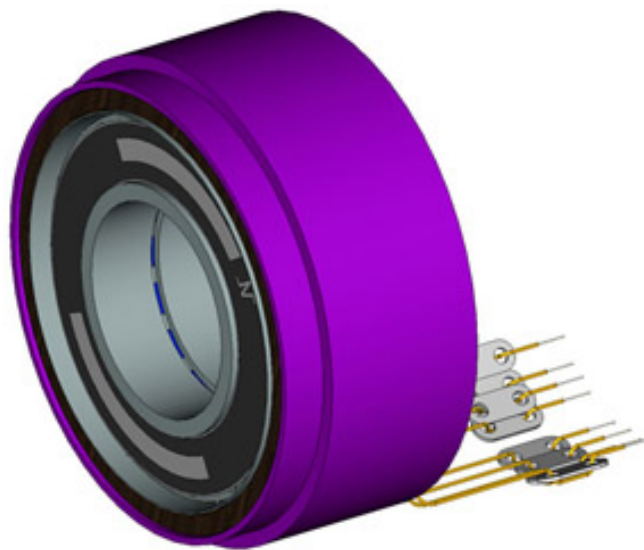


Таблица 3.1 – Характеристики двигателя ДБМ 63 - 0,06 - 3 - 2

Наружный диаметр статора, мм	63
Внутренний диаметр ротора, мм	28
Осевая длина (не более), мм	28
Число пар полюсов, шт	8
Номинальное напряжение питания, В	27
Частота вращения при идеальном холостом ходе, об/мин	2700-3400
Материал магнитов	Самарий-Кобальт

Принцип работы двигателя заключается в создании вращающего момента путем взаимодействия электромагнитного поля статора и магнитного



поля ротора. Вращение поля статора осуществляется переключением обмоток по какому-либо закону управления. Простым переключением реализуется дискретный или импульсный закон управления, что заставит ротор вращаться неравномерно, а скачками. Иногда это неприемлемо, поэтому существует еще один закон управления - гармонический или аналоговый.

Его суть заключается не просто в переключении обмоток статора, а также в регулировании амплитуды фазных напряжений, что позволяет получать более плавное движение результирующего вектора МДС, а следовательно и ротора.

У двигателя ДБМ 63 4 обмотки и по-умолчанию они не соединены друг с другом общим проводом. Различные схемы коммутации приведены на рисунке 3.2.

Внутри каждой из фаз обмотки двигателя можно соединить последовательно или параллельно, что позволяет повысить скорость вращения или момент на валу. Один из вариантов подключения - вовсе не использовать по одной обмотке из каждой фазы. Также, есть вариант автономного питания, то есть питания отдельно каждой обмотки. Однако, у всех этих схем подключения есть один существенный минус - необходима возможность смены полярности напряжения на обмотке. При работе с постоянным током это неудобно, к тому же лишний раз усложняет схемотехнику. Поэтому для модуля был выбран способ подключения, при котором обмотки соединяются в звезду с общим проводом. Таким образом, менять полярность на обмотках не нужно, а форму сигнала можно задавать с помощью ШИМ-модуляции. В стенде используется именно такой вариант подключения.

Посмотрев на циклограммы изменения фазных напряжений на рисунке 3.2, можно заметить, что самый простой запуск двигателя возможен путем подачи на любую обмотку первой фазы сигнала синуса и вместе с тем подачи на любую обмотку второй фазы сигнала косинуса. Так двигатель будет работать в режиме синхронного двигателя. Частоту обоих сигналов ради эксперимента можно принять за 50 герц - частота переменного напряжения в бытовой сети 220 вольт. Однако при такой частоте, ротор двигателя будет неприятно гудеть и стоять на месте. Это связано с выходом двигателя из синхронизма. Он физически не может моментально разогнаться до частоты вра-

Ине. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Ине. № дубл.	Подп. и дата

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	ФСУиР.205.R3435.001 ПЗ	Лист
						17

Тип обмотки	Схемы обмотки		$k_R$	$k_C$	$k_m$	$k_E$	$k_n$	$k_3$
	Схема соединения фаз (секций)	Циклограмма изменения фазных напряжений						
Двухфазная четырёхсекционная	Последовательное соедине- ние секций фазы (вспомог. схема)		2	1	1	1	1	1
			2	1	$\sqrt{2}$	0,785	0,9	2
	Параллельное соединение секций фазы		0,5	0,5	1	1	1	1
			0,5	0,5	$\sqrt{2}$	0,785	0,9	2
	Раздельное (автономное) пи- тание секций фазы		1	0,5	2	1	1	2
			1	0,5	$2\sqrt{2}$	0,785	0,9	4
Двухфазная четырёхсекционная	Питание одной секции фазы		1	0,5	1	1	1	1
			1	0,5	$\sqrt{2}$	0,785	0,9	2
	Соединение в звезду с общим проводом		1	0,5	1	1	1	1
			1	0,5	$\sqrt{2}$	0,785*	0,9	2

Рисунок 3.2 – Схемы коммутации двухфазного двигателя серии ДБМ [2]

щения равной частоте сигналов, поэтому нужно позаботиться о плавном раз-  
гоне. Огромный плюс синхронных машин заключается в том, что они не те-  
ряют обороты при любых значениях момента ниже максимального. Здесь же  
кроется и минус - при превышении значения максимального момента двига-  
тель выходит из синхронизма и просто останавливается. Решением проблемы  
являются различные улучшения, например, механизмы автосинхронизации  
или аварийного перезапуска. В общем то, это и есть главный минус этого ре-  
жима работы. Такой режим работы подходит для приводов, где нет работы с  
большими нагрузками, например, вентиляторы. Однако, без механизма кор-

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата					
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	<div style="text-align: center;"> <h1>ФСУР.205.R3435.001 ПЗ</h1> </div>				

Копировал
Формат А4

ректного запуска все равно не обойтись. В рассмотренном режиме работы управление двигателем заключается в регулировании частоты фазных сигналов.

Конечно, существуют и другие режимы работы двигателя, которые достигаются различными способами управления. Например, снабдив описанную ранее синхронную машину специальным электромеханическим устройством - электронным коммутатором, можно получить так называемый вентильный привод. Под электронным коммутатором подразумевается специальное устройство, осуществляющее коммутацию обмоток двигателя, чаще представляющее из себя связку из датчика положения ротора или датчика скорости и какого-либо вычислительного узла. Обычно устанавливаются датчики Холла, это удобно, потому что вращающаяся часть двигателя - большой магнит, но также вполне возможно установить энкодер на ротор или даже реостат с полным поворотом. Такой способ управления принято называть датчиковым. Суть такого управления заключается реализации обратной связи по датчику положения и/или датчику скорости, более просто это можно объяснить как переключение обмоток в зависимости от сигналов с датчиков, что очень напоминает работу обычных коллекторных ДПТ. Но все таки есть большое отличие - коммутация обмоток происходит не механическим путем, а электрическим. Логично, что для реализации такого метода управления необходим микроконтроллер, либо же просто специальная электрическая схема. И то, и то нужно для обработки сигналов с датчиков и подачи напряжения на обмотки двигателя. Существенный минус данного решения - как раз таки необходимость применения электронных модулей, что зачастую довольно дорого и не всегда обоснованно.

Еще один интересный метод управления - бездатчиковый. Информация о положении ротора вычисляется математически в режиме реального времени на основании той информации, которая имеется в системе управления. При вращении ротора двигателя в обмотках генерируется обратная ЭДС, которую можно измерить. Более того, по этому измерению можно сделать вывод о том, в каком положении ротор находится в данный момент, получается, что отдельный датчик положения ротора вовсе и не нужен. Данный метод управления набирает все большую популярность ввиду того, что вносит

Ине. № подл.	Подп. и дата
Взам. инв. №	Инв. № дубл.
Подп. и дата	

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	<div> <div> ФСУиР.205.R3435.001 ПЗ </div> <div> <div>Лист</div> <div>19</div> </div> </div>

упрощение в конструкцию привода. У такого способа управления, к сожалению, тоже есть минусы:

- Как в случае и с датчиковым управлением, необходим микроконтроллер;
- На низких оборотах (около 10% от номинальной частоты вращения) величина обратной ЭДС, генерируемой в обмотках недостаточна для определения положения ротора [3]. Эту особенность необходимо учитывать при проектировании системы управления.

В макете управление двигателем реализовано с помощью силовых ключей BTS3256D. Каждый из четырех ключей осуществляет коммутацию нужной обмотки в конкретный момент времени. Эти интеллектуальные ключи имеют логический уровень 3.3 вольта, что позволяет подключить их напрямую к пинам микроконтроллера. Немаловажно и то, что эти ключи поддерживают ШИМ-модуляцию и работают с частотой переключения до 12 кГц, что дает возможность создавать на обмотках нужные амплитуды напряжений. Каждая обмотка двигателя ДБМ одним проводом подключена к плюсу внешнего блока питания на 24 вольта. А замыкается цепь при подаче логической единицы на вход силового ключа. Такие ключи называются ключами нижней стороны, так как они осуществляют коммутацию со стороны общего провода.

Также, нельзя упускать, что двигатели серии ДБМ выпускаются в двух исполнениях статора: пазовом и беспазовом или гладком. ДБМ 63 имеет беспазовый статор, что позволяет обеспечить отсутствие реактивного остаточного момента сопротивления, и как следствие пульсаций вращающего момента по углу поворота ротора. Также, статор такого типа обеспечивает малые электромагнитные постоянные времени обмоток.

### 3.2 Нагрузочный двигатель постоянного тока

В качестве нагрузочного двигателя был выбран обычный коллекторный ДПТ Д5-ТР (рисунок 3.3). Этот двигатель используется для создания искусственной нагрузки на валу двигателя ДБМ для исследования и изучения БМП под нагрузкой. Некоторые его характеристик представлены в таблице 3.2.

Подп. и дата		Инв. № дубл.		Взам. инв. №		Подп. и дата		Инв. № подл.	
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	ФСУиР.205.R3435.001 ПЗ				Лист
									20



Рисунок 3.3 – Двигатель Д5-ТР

Таблица 3.2 – Характеристики двигателя Д5-ТР

Длина, мм	112
Диаметр, мм	40
Момент на валу, г·см	90
Мощность, Вт	3.8
Частота вращения, об/мин	4100
Масса, кг	0.5

Принцип работы этого двигателя...

Д5-ТР относится к классу исполнительных, то есть рассчитанных на большие кратковременные нагрузки. В макете заложена возможность использовать двигатель не только для создания нагрузки, но и, наоборот, при старте как бы помогать двигателю ДБМ, чтобы свести трение от подшипников к минимуму и таким образом приблизиться к идеальным условиям. На стенде этот двигатель не закреплен и имеет одну степень свободы - может вращаться. Это достигается установкой двигателя в подшипник. Это нужно для того, чтобы поворотом двигателя в подшипнике воздействовать на тензометрический датчик и таким образом измерять момент.

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
Ине. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Ине. № дубл.	Подп. и дата

ФСУиР.205.R3435.001 ПЗ



ющих резисторов были выбраны двухваттные резисторы номиналом 0.1 ом. Они обеспечивают приемлемое падение напряжения, при этом достаточно мощные, чтобы выдерживать достаточно большие токи в цепи нагрузки.

В качестве датчика угла положения ротора был выбран магнитный энкодер AS5048A. Буква А на конце означает, что эта модификация поддерживает передачу данных по SPI. Также, данный энкодер поддерживает работу с помощью ШИМ. Такое решение было выбрано по ряду причин:

- Поддержка логического уровня 3.3 вольт;
- 14-битное разрешение;
- Бесконтактное вращение на все 360 градусов без ограничений;
- Программируемое начальное положение.

Принцип работы (рисунок 3.4) заключается в реагировании на изменение магнитного поля у поверхности корпуса микроконтроллера. Мощный неодимовый магнит закреплен с торца вала двигателя таким образом, чтобы не наблюдалось биений. При вращении магнита датчики Холла, расположенные внутри вокруг центра микросхемы регистрируют изменения магнитного поля, результат специальным образом конвертируется и отправляется на микроконтроллер для дальнейшей обработки. Данная микросхема выполнена в TSSOP14 корпусе.



Рисунок 3.4 – Принцип работы магнитного энкодера

В макете будет использоваться неодимовый магнит в форме диска (рисунок 3.5) намагниченный диаметрально (как показано на рисунке 3.4). При аксиальном намагничивании при вращении магнита вокруг своей оси, магнитное поле изменяться не будет, следовательно датчик не сможет регистри-

Подп. и дата	
Инв. № дубл.	
Взм. инв. №	
Подп. и дата	
Инв. № подл.	

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	ФСУиР.205.Р3435.001 ПЗ	Лист
						23



ровать изменение магнитного поля, а значит и вращение. Размеры магнита — 5х3 мм.



Рисунок 3.5 – Неодимовый магнит

Стоит отметить, что сплав неодима, железа и бора практически не подвержен размагничиванию (потеря намагниченности не более 1% в десятилетие) [4].

Было решено разместить датчик угла положения ротора на отдельной печатной плате для удобства монтажа, так как было бы довольно трудно установить весь модуль перпендикулярно ротору, да еще при этом соблюсти все требования к расположению датчика. Плата для датчика была изготовлена в домашних условиях путем переноса тонера для лазерных принтеров на текстолит и последующего травления раствором пищевой соли и лимонной кислоты в перекиси водорода. Результат всех действий представлен на рисунке 3.6.

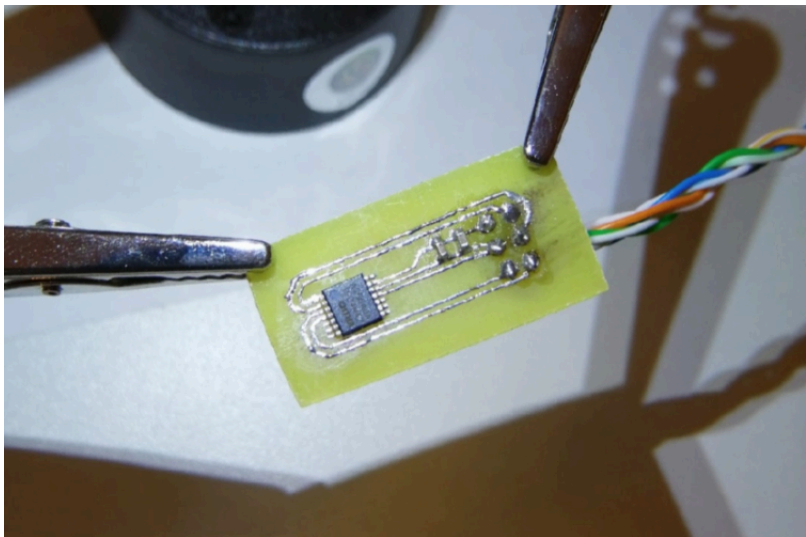


Рисунок 3.6 – Печатная плата с магнитным энкодером

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата	домашних условиях путем переноса тонера для лазерных принтеров на текстолит и последующего травления раствором пищевой соли и лимонной кислоты в перекиси водорода. Результат всех действий представлен на рисунке 3.6.						
											
					Рисунок 3.6 – Печатная плата с магнитным энкодером						
										Лист	
					ФСУиР.205.R3435.001 ПЗ					24	
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата							



Наиболее интересным решением в плане датчиков было использовать тензометрический датчик для измерения создаваемого на валу двигателя момента. Тензометрический датчик жестко крепится на корпус макета, а его упругий элемент предотвращает поворот нагрузочного двигателя в подшипнике. Таким образом, если момент на валу становится достаточно большим, чтобы преодолеть сопротивление упругого элемента тензометрического датчика, последний подвергается деформации, деформация регистрируется электронной частью датчика и отправляется на микроконтроллер. Благодаря этому можно сделать вывод о том, какое сейчас значение момента на валу. Тензометрический датчик представляет из сложное аналоговое устройство, его связь с микроконтроллером поддерживается через инструментальный усилитель AD627ARZ. Выход усилителя подключен к АЦП микроконтроллера и таким образом мы достаточно точно можем измерять нагрузку на упругом элементе тензодатчика.

Можно заметить, что для чтения данных со всех измерительных устройств используется АЦП и это неспроста. Быстродействие АЦП для выбранного микроконтроллера - не менее двух миллионов преобразований в секунду. Фактически это означает, что возможно получить не менее двух миллионов значений, например, угла в секунду, что довольно много.

### 3.4 Микроконтроллер

В качестве вычислительного модуля для стенда был выбран микроконтроллер STM32F407VGT6, а точнее специальная отладочная плата на базе этого микроконтроллера (рисунок 3.7). Огромным плюсом отладочных плат является тот факт, что вся необходимая для работы обвязка микроконтроллера уже реализована на этой самой плате. Прямо на ней размещен программатор и различные другие модули для комфортной работы. Также, все пины микроконтроллера разведены в 2 пятидесятипиновых разъема для быстрого и удобного прототипирования.

Отладочная плата работает «из коробки» и поддерживает большое количество сред разработки, все драйверы устанавливаются автоматически при подключении к компьютеру. Отладочная плата имеет отличную интеграцию

Подп. и дата	
Инв. № дубл.	
Взм. инв. №	
Подп. и дата	
Инв. № подл.	

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	ФСУиР.205.R3435.001 ПЗ	Лист
						25

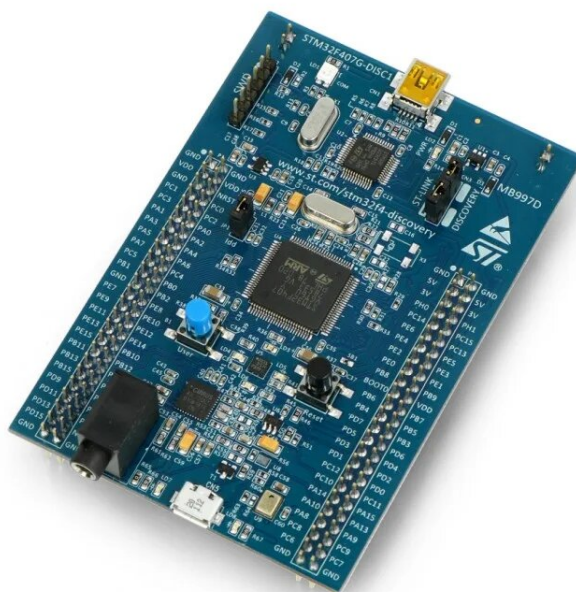


Рисунок 3.7 – Внешний вид отладочной платы

в пакеты MATLAB и Simulink благодаря библиотеке STM32-MAT/TARGET. Эта библиотека позволяет разрабатывать структуру системы управления в пакете Simulink, а затем по нажатию одной кнопки конвертировать ее в машинный код для микроконтроллера платы. Благодаря этому при изучении систем управления бесколлекторным моментным двигателем без погружения в программные аспекты, можно полностью абстрагироваться от сложных вещей, например, работы с регистрами ARM-ядра, на котором базируется микроконтроллер.

### 3.5 Модуль управления

Модуль управления представляет из себя печатную плату с коннектором для отладочной платы, необходимыми разъемами и другой электроникой. Здесь расположены силовые ключи для управления двигателями и другие устройства для обеспечения корректной работы датчиков. Схема электрическая принципиальная приведена в документе ФСУиР.205.R3435.003 ЭЗ.

Име. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата	<p>Эта библиотека позволяет разрабатывать структуру системы управления в пакете Simulink, а затем по нажатию одной кнопки конвертировать ее в машинный код для микроконтроллера платы. Благодаря этому при изучении систем управления бесколлекторным моментным двигателем без погружения в программные аспекты, можно полностью абстрагироваться от сложных вещей, например, работы с регистрами ARM-ядра, на котором базируется микроконтроллер.</p> <h3>3.5 Модуль управления</h3> <p>Модуль управления представляет из себя печатную плату с коннектором для отладочной платы, необходимыми разъемами и другой электроникой. Здесь расположены силовые ключи для управления двигателями и другие устройства для обеспечения корректной работы датчиков. Схема электрическая принципиальная приведена в документе ФСУиР.205.R3435.003 ЭЗ.</p>	
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	<div>ФСУиР.205.R3435.001 ПЗ</div>	Лист
						26

Печатная плата выполнена в заводских условиях из двухстороннего фольгированного текстолита, ее чертеж представлен в документе ФСУ-иР.205.R3435.004.

3.6 Блок питания

Для питания силовых частей макета используется блок питания NES-100-24. Его характеристики представлены в таблице 3.3

Таблица 3.3 – Характеристики блока питания

Выходное напряжение, В	24
Номинальный ток, А	4.5
Номинальная мощность, Вт	108

3.7 Описание конструкции

Сам макет представляет из себя основание, с закрепленными к нему блоком питания, подшипником Z8009 с внутренним диаметром 40 миллиметров, стаканом с двигателем ДБМ и электроникой. В подшипник с натягом устанавливается двигатель Д5-ТР. С помощью специальной муфты валы двигателей жестко соединяются, при этом двигатель Д5-ТР свободно вращается. С другой, относительно двигателя ДБМ, стороны на вал устанавливается неодимовый магнит. К корпусу крепится специальный кронштейн таким образом, чтобы магнитный энкодер оказался прямо напротив магнита на валу. При этом расстояние не должно превышать 5 миллиметров. Также к корпусу крепится тензометрический датчик, который своим упругим элементом ограничивает свободное вращение двигателя Д5-ТР.

С выключенным питанием ротор нагрузочного двигателя свободно прокручивается. Затем, при подаче напряжения на нагрузочный двигатель, его ротор начинает вращаться либо в том же направлении, что и двигатель ДБМ, либо в обратном. Таким образом происходит либо дополнительный разгон, либо сопротивление вращению соответственно. Это позволяет исследовать работу двигателя ДБМ под нагрузкой, а также работу в условиях, близких к идеальным с точки зрения трения.

Подп. и дата	
Инв. № дубл.	
Взм. инв. №	
Подп. и дата	
Инв. № подл.	

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	ФСУиР.205.R3435.001 ПЗ	Лист
						27



Инва. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инва. № дубл.	Подп. и дата

Копировал \_\_\_\_\_ Форм \_\_\_\_\_

---

---

---

Копировал

---

---

---

 $\Phi op.$ 

$\text{mat } A4$

- Токи в фазах  $A$  и  $B$ ;
- Угол положения ротора;
- Угловую скорость;
- Угловое ускорение;
- Крутящий момент, создаваемый синхронной машиной;
- Результирующий момент с учетом  $M_{ext}$ .

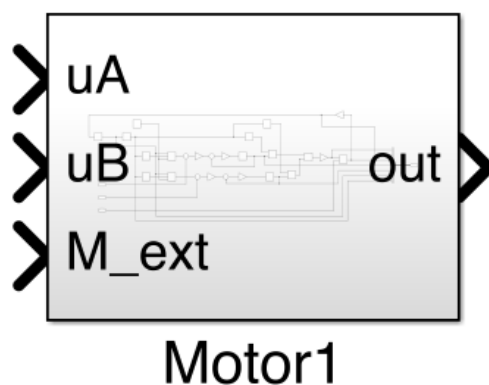


Рисунок 4.1 – Блок, представляющий модель двигателя ДБМ

Однако, этого не достаточно для полноценной работы двигателя - необходим генератор фазных напряжений. Для этого была разработана следующая подсистема - коммутатор.

## 4.2 Коммутатор

Задача коммутатора (рисунок 4.2) заключается в том, чтобы подавать напряжение на нужные обмотки в нужный момент. Этот самый «нужный момент» определяется исходя из угла положения ротора  $\theta$ . Грубо говоря, реализуется коллектор ДПТ, точнее его электронный вариант.

В реальной системе нет возможности менять полярность напряжения на обмотке. Как было отмечено ранее, используется специальная схема подключения обмоток. При работе с MATLAB Simulink такая возможность имеется и используется для упрощения модели.

Правильность работы коммутатора была проверена подачей на вход  $\theta$  время, а на вход  $u$  - единицы. Выходы были подключены к компоненту XY Graph из пакета Simulink (первый вход - фаза  $A$ , второй - фаза  $B$ ). На

графике была построена окружность, при этом в момент построения можно было видеть направление вращения вала двигателя. Окружность строилась против часовой стрелки, то есть в сторону увеличения угла.

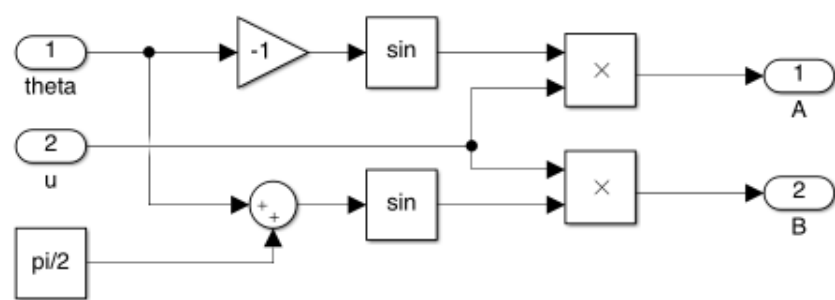


Рисунок 4.2 – Структурная схема коммутатора

В зависимости от угла  $\theta$  изменяются значения выходов  $A$  и  $B$ , а с помощью входа  $u$  задается амплитуда выходных сигналов.

### 4.3 ШИМ

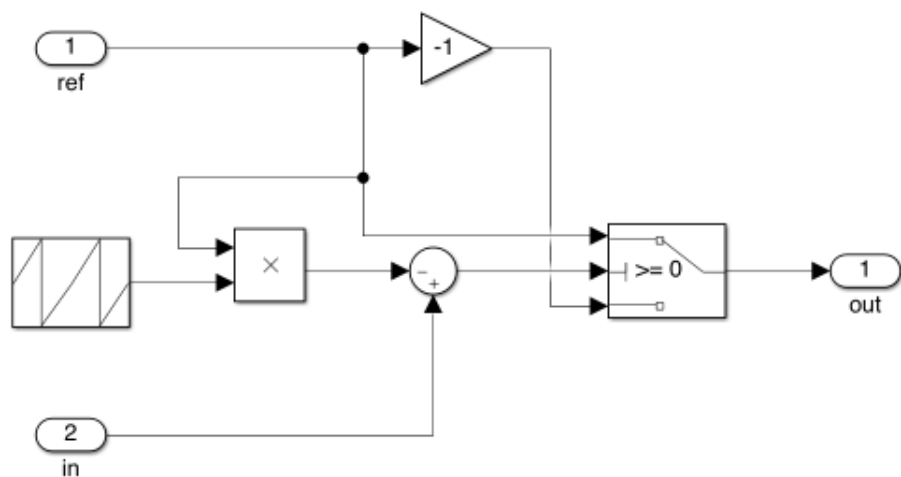


Рисунок 4.3 – Структурная схема широтно-импульсного модулятора

В системе для задания амплитуд фазных напряжений используется широтно-импульсная модуляция, поэтому для этого тоже был собран специальный модуль. В основе блока (рисунок 4.3) лежит генератор пилообразных сигналов с частотой 1 килогерц. Принцип работы блока заключается в сравнении входного сигнала  $in$  с референсным сигналом  $ref$  и переключении по-

Име. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Име. № дубл.	Подп. и дата

лярности выхода *out* в зависимости от результата сравнения. Опять же, стоит отметить, что благодаря средствам MATLAB Simulink реализация ШИМ является двухполюсной, то есть выходной сигнал принимает значения в диапазоне  $[-ref; ref]$ , а не  $[0, ref]$  как обычно делается в электронике.

На рисунке 4.4 демонстрируется работа этого блока (частота для наглядности уменьшена).

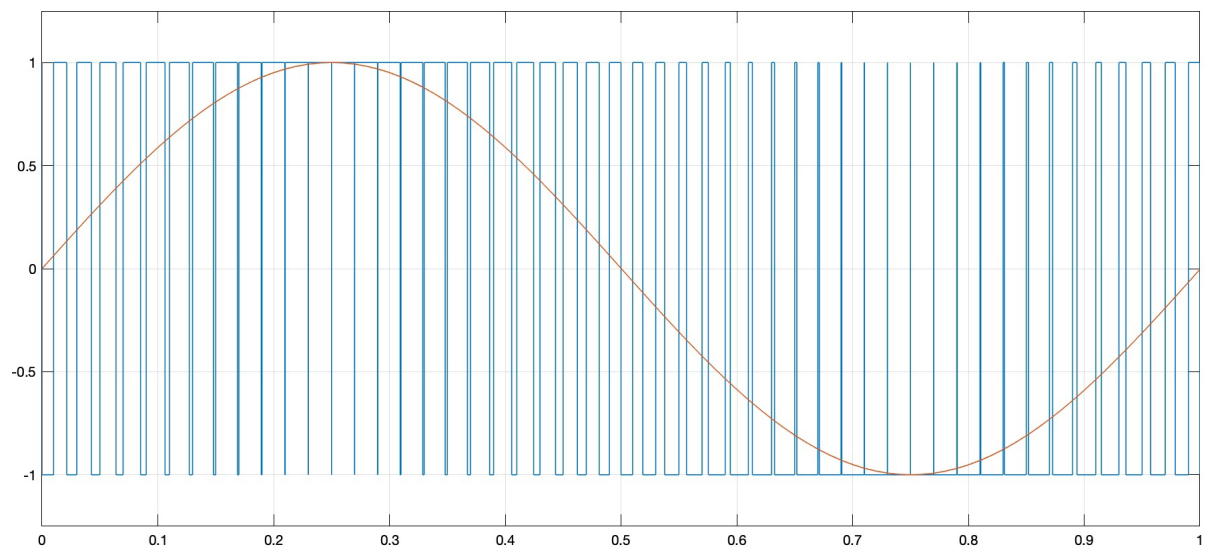


Рисунок 4.4 – Демонстрация работы ШИМ-генератора

### 4.4 Двигатель

После создания всех необходимые блоков была построена структурная схема двигателя ДБМ в режиме ДПТ (рисунок 4.5).

Затем, система была промоделирована без какой-либо нагрузки при номинальном входном напряжении 27 вольт и средних значениях  $R$ ,  $C_e$  и  $C_m$ . На графике (рисунок 4.6) представлена зависимость угловой скорости  $\omega$  от времени. Установившееся значение скорости - 318 рад/сек. Заявленная производителем частота вращения при идеальном холостом ходе - 2700 – 3400 об/мин или 282 – 386 рад/сек. Это не достаточное, но необходимое условие для того, чтобы говорить о корректности построенной модели.

Име. № подл.	Подп. и дата	Взм. инв. №	Име. № дубл.	Подп. и дата



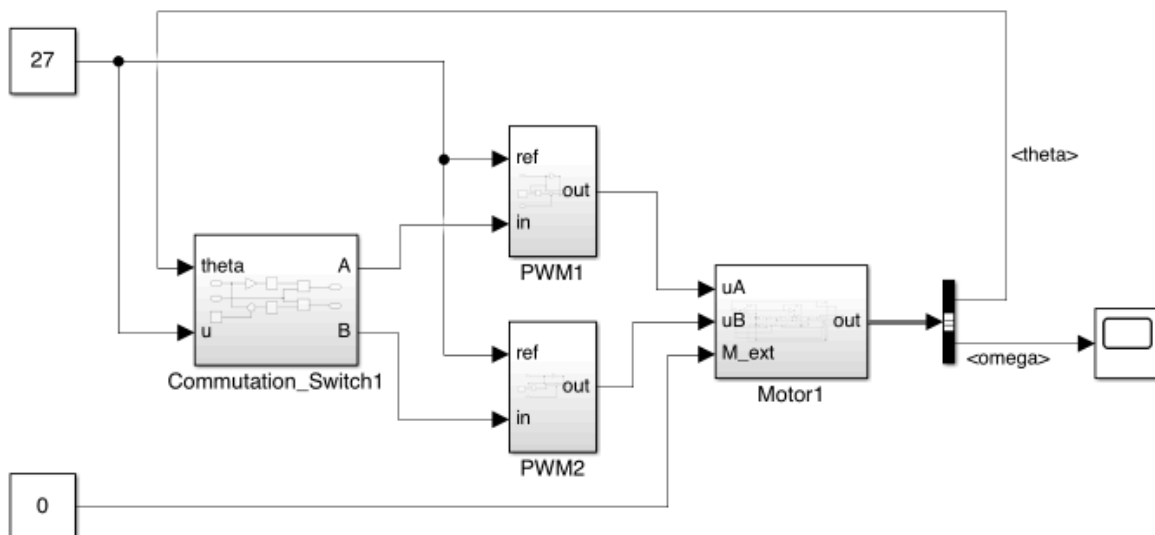


Рисунок 4.5 – Структурная схема двигателя

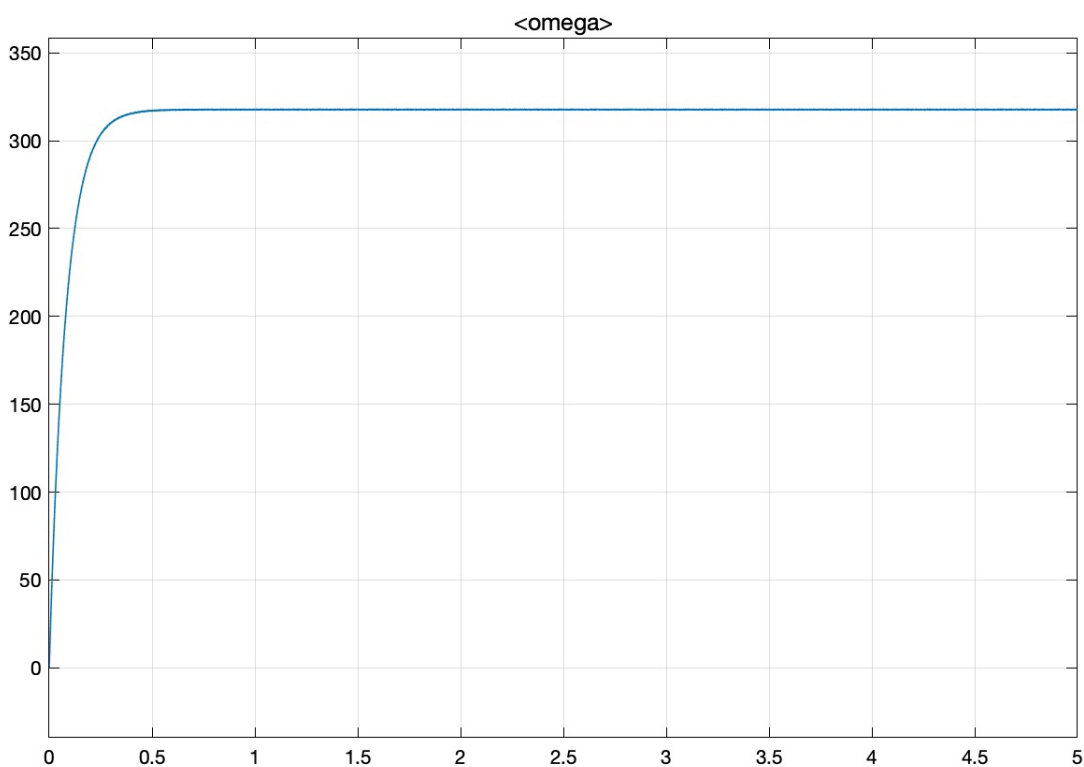


Рисунок 4.6 – Зависимость угловой скорости  $\omega$  от времени

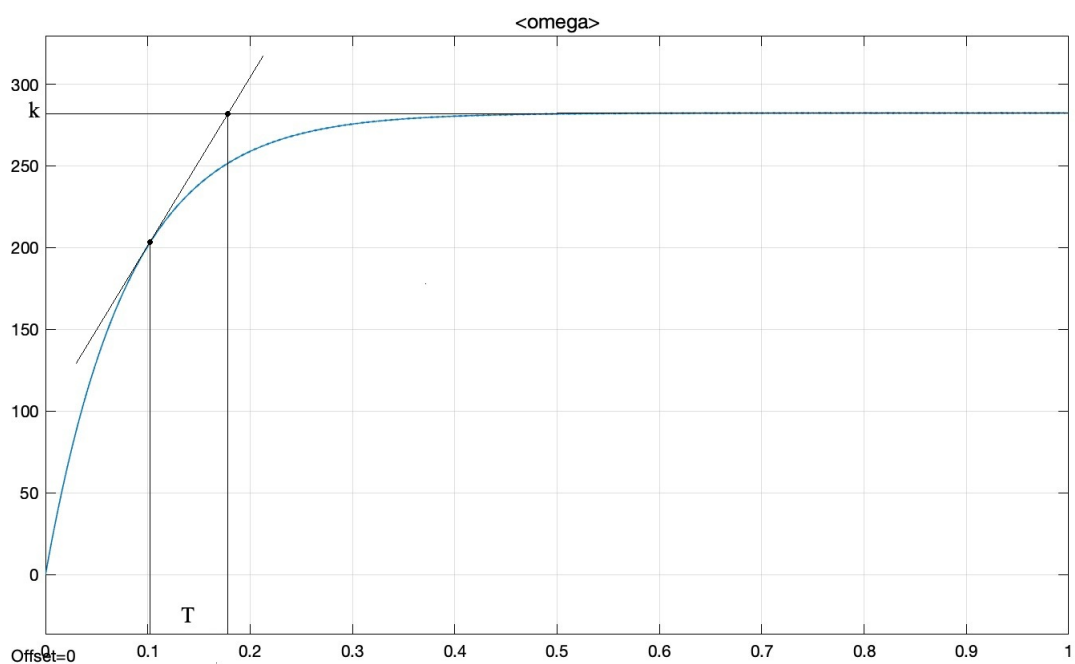
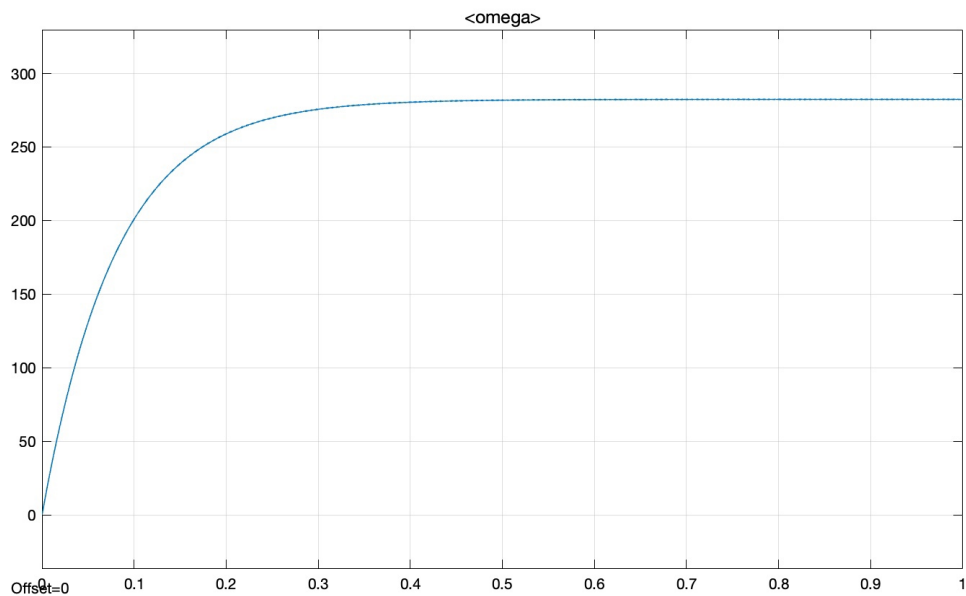
Инв. № подл.	Подп. и дата				Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата						
Изм.	Лист	№ докум.			Подп.	Дата	ФСУиР.205.R3435.001 ПЗ						
							Лист						
							33						
							Копировал						
							Формат А4						

Time (сек)	Angular Velocity ω (град/сек)
0.0	0
0.1	150
0.2	250
0.3	300
0.4	320
0.5	330
1.0	330
1.5	330
2.0	330
2.5	330
3.0	330
3.5	330
4.0	330
4.5	330
5.0	330

Рисунок 4.6 – Зависимость угловой скорости  $\omega$  от времени

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата

Формат А4



$$W(s) = \frac{11.7645}{0.0805s + 1}, \quad (5.3)$$

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата

<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>

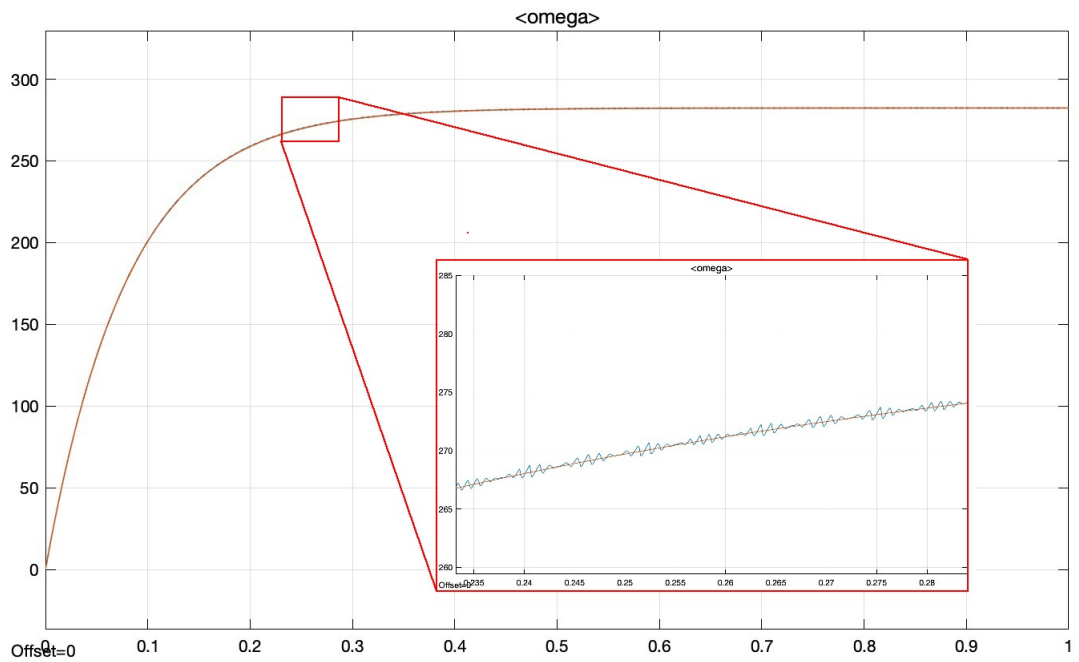


Рисунок 5.3 – Сравнение ПП исходной и непрерывной линейной моделей

График ошибки линейной непрерывной модели относительно исходной представлен на рисунке 5.4.

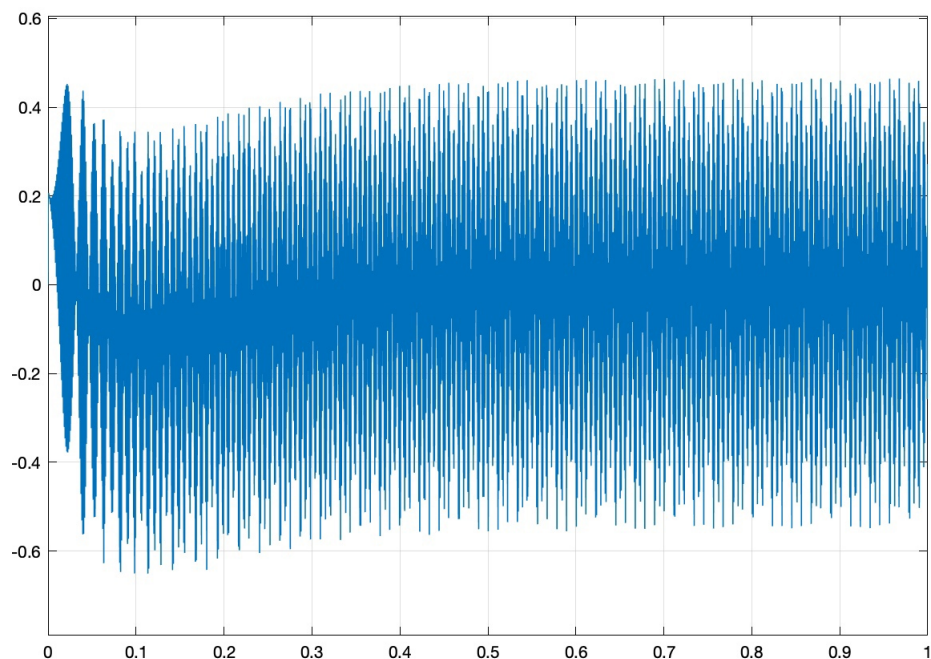


Рисунок 5.4 – График ошибки

Можно заметить, что пиковое значение ошибки лежит около  $-0.7$ , это означает, что ошибка составляет  $\approx 0.25\%$ .

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взм. инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата

Рисунок 5.4 – График ошибки

Можно заметить, что пиковое значение ошибки лежит около  $-0.7$ , это означает, что ошибка составляет  $\approx 0.25\%$ .

					Лист	
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		36
ФСУиР.205.R3435.001 ПЗ						

## 5.2 Синтез регулятора угла положения ротора для линейной модели

Пусть поставлена задача синтеза регулятора по углу со следующими показателями качества:

- Перерегулирование  $\sigma = 0\%$ ;
- Время переходного процесса  $t_{\text{п}} = 0.5 \text{ с}$ ;

Обычно, в задачах регулирования угла важна точность позиционирования, поэтому для демонстрации были выбраны именно такие показатели.

Выходом линейной непрерывной недели, представленной ранее, является угловая скорость  $\omega$ . Для синтеза системы управления по углу был введено еще одно интегрирующее звено (рисунок 5.5).



Рисунок 5.5 – Структурная схема объекта управления

Передаточной функции интегрирующего звена соответствует дифференциальное уравнение 5.4

$$\dot{x}_1 = x_2. \quad (5.4)$$

Передаточной функции апериодического звена 1 порядка соответствует дифференциальное уравнение

$$0.0805\dot{x}_2 + x_2 = 11.7645u,$$

или, относительно  $\dot{x}_2$

$$\dot{x}_2 = -\frac{1}{0.0805}x_2 + 146.1429u. \quad (5.5)$$

Путем объединения уравнений 5.4 и 5.5 в систему уравнений было получено описание системы в форме вход-состояние-выход (ВСВ)

					Передаточной функции интегрирующего звена соответствует дифференциальное уравнение 5.4
					$\dot{x}_1 = x_2. \quad (5.4)$
					Передаточной функции апериодического звена 1 порядка соответствует дифференциальное уравнение
					$0.0805\dot{x}_2 + x_2 = 11.7645u,$
					или, относительно $\dot{x}_2$
					$\dot{x}_2 = -\frac{1}{0.0805}x_2 + 146.1429u. \quad (5.5)$
					Путем объединения уравнений 5.4 и 5.5 в систему уравнений было получено описание системы в форме вход-состояние-выход (ВСВ)
Инв. № подл.	Подп. и дата	Взм. инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата	
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	<i>ФСУиР.205.R3435.001 ПЗ</i>
					Лист
					37

$$\begin{cases} \dot{X} = AX + Bu; \\ Y = CX, \end{cases}$$

$$\text{где } X = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}, A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -12.4224 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ 146.1429 \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix}.$$

Необходимыми условиями для синтеза алгоритмов управления методом модального управления являются полная управляемость и полная наблюдаемость объекта управления [6].

$$U = \begin{bmatrix} B & AB \end{bmatrix}; Q = \begin{bmatrix} C \\ CA \end{bmatrix},$$

где  $U$  - матрица управляемости,  $Q$  - матрица наблюдаемости.

$$\text{rank}(U) = \text{rank}(Q) = n,$$

где  $n$  - порядок системы.

Выражение выше означает, что система годится для синтеза управления методом модального управления.

В качестве регулятора был выбран ПИ-регулятор. Этот регулятор является частным случаем ПИД-регулятора и довольно часто применяется на практике ввиду своих достоинств:

- Обеспечивает нулевую статическую ошибку регулирования;
- Малая чувствительность к шумам в канале измерения (в отличие, например, от ПИД-регулятора);
- Простота настройки.

Задача синтеза ПИ-регулятора сводится к выбору матриц эталонной модели  $\Gamma$  и  $H$  и решению матричного уравнения Сильвестра 5.6[7]

$$M\Gamma - AM = -BH. \quad (5.6)$$

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взм. инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата	<p>Выражение выше означает, что система годится для синтеза управления методом модального управления.</p> <p>В качестве регулятора был выбран ПИ-регулятор. Этот регулятор является частным случаем ПИД-регулятора и довольно часто применяется на практике ввиду своих достоинств:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>– Обеспечивает нулевую статическую ошибку регулирования;</li><li>– Малая чувствительность к шумам в канале измерения (в отличие, например, от ПИД-регулятора);</li><li>– Простота настройки.</li></ul> <p>Задача синтеза ПИ-регулятора сводится к выбору матриц эталонной модели <math>\Gamma</math> и <math>H</math> и решению матричного уравнения Сильвестра 5.6[7]</p> $M\Gamma - AM = -BH. \tag{5.6}$	
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	<div>ФСУиР.205.R3435.001 ПЗ</div>	Лист
						38

И нахождению матрицы обратных связей с помощью выражения 5.7

$$K = -HM^{-1}. \quad (5.7)$$

С учетом требуемого перерегулирования  $< 1\%$  в качестве эталонной модели был выбран полином Ньютона (биномиальный) 3 порядка (5.8)[6]. Третий порядок модели обусловлен наличием интегрирующего звена в регуляторе и вторым порядком объекта управления.

$$D^*(\lambda) = \lambda^3 + 3\omega_0\lambda^2 + 3\omega_0^2\lambda + \omega_0^3. \quad (5.8)$$

Затем был построен график переходного процесса (рисунок 5.6) по полученной нормированной передаточной функции (5.9).

$$\begin{cases} W(s) = \frac{1}{D^*(\lambda)}; \\ \lambda = s; \\ \omega_0 = 1. \end{cases} \quad (5.9)$$

Горизонтальными линиями на графике (рисунок ??) обозначена  $\Delta$ -область, равная  $\pm 5\%$  от установившегося значения ПП.

Временем переходного процесса или временем регулирования принято считать момент времени, когда переходной процесс попадает в  $\Delta$ -область и больше ее не покидает. В случае полинома Ньютона 3 порядка время переходного процесса  $t_{\Pi}^* = 6.316c$ .

Исходя из требуемого времени переходного процесса  $\omega_0$  вычисляется как

$$\omega_0 = \frac{t_{\Pi}^*}{t_{\Pi}} = \frac{6.316}{0.5} = 12.632.$$

Так, характеристический полином принимает вид

$$D^*(\lambda) = \lambda^3 + 37.896\lambda^2 + 478.7023\lambda + 2015.66. \quad (5.10)$$

$$\lambda_{1,2,3} = -12.632.$$

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взм. инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата	<div style="text-align: center;"> <p>ФСУиР.205.R3435.001 ПЗ</p> </div>					Лист				
										39				
										Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

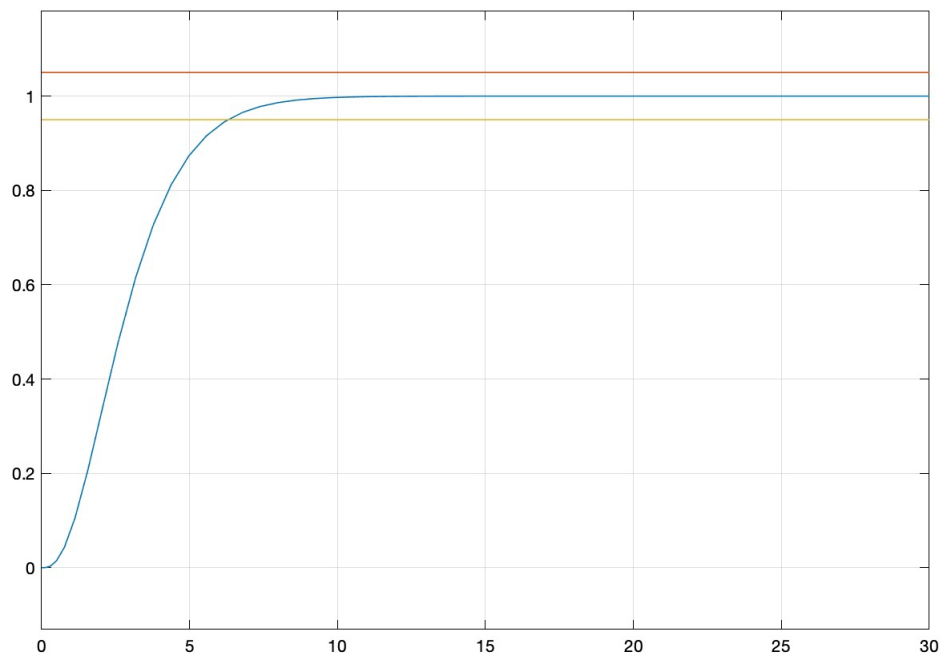


Рисунок 5.6 – Переходной процесс нормированной ПФ

Все корни характеристического полинома (5.10) равны и вещественны, значит матрицы эталонной модели на основе диагональной канонической формы задаются как:

$$\Gamma = \begin{bmatrix} -12.632 & 1 & 0 \\ 0 & -12.632 & 1 \\ 0 & 0 & -12.632 \end{bmatrix}, H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Можно заметить, что получившаяся матрица имеет размерность 3 на 3. Однако данные матрицы  $A$  и  $B$  имеют размерность 2 на 2. Если решить уравнение Сильвестра так, то неизвестная матрица  $M$  не будет квадратной, а значит мы не сможем посчитать обратную матрицу для нахождения матрицы обратных связей  $K$ .

В [6] описывается расширение матриц  $A$  и  $B$  5.11 при формировании расширенной модели ошибок в процессе синтеза астатического (ПИ-) регулятора.

$$\bar{A} = \begin{bmatrix} 0 & C \\ 0 & A \end{bmatrix}, \bar{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ B \end{bmatrix}. \quad (5.11)$$

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата	$\Gamma = \begin{bmatrix} -12.632 & 1 & 0 \\ 0 & -12.632 & 1 \\ 0 & 0 & -12.632 \end{bmatrix}, H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$
<p>Можно заметить, что получившаяся матрица имеет размерность 3 на 3. Однако данные матрицы <math>A</math> и <math>B</math> имеют размерность 2 на 2. Если решить уравнение Сильвестра так, то неизвестная матрица <math>M</math> не будет квадратной, а значит мы не сможем посчитать обратную матрицу для нахождения матрицы обратных связей <math>K</math>.</p>					
<p>В [6] описывается расширение матриц <math>A</math> и <math>B</math> 5.11 при формировании расширенной модели ошибок в процессе синтеза астатического (ПИ-) регулятора.</p>					
$\overline{A} = \begin{bmatrix} 0 & C \\ 0 & A \end{bmatrix}, \overline{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ B \end{bmatrix}.$ <div style="text-align: right;">(5.11)</div>					
Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата	$\Phi C Y u P . 205 . R 3435 . 001 ПЗ$
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Лист
					40





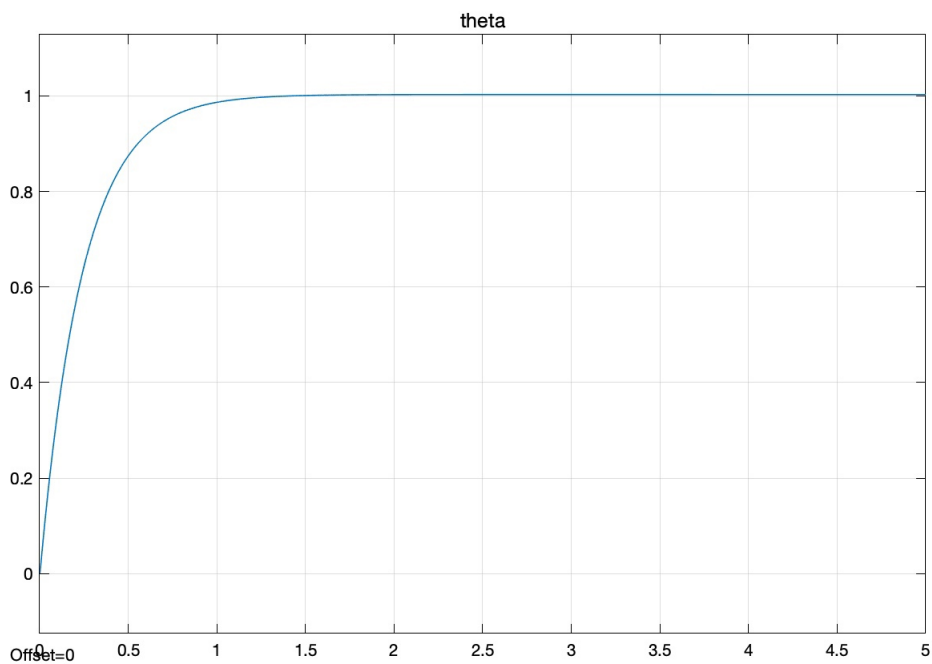


Рисунок 5.8 – График переходного процесса

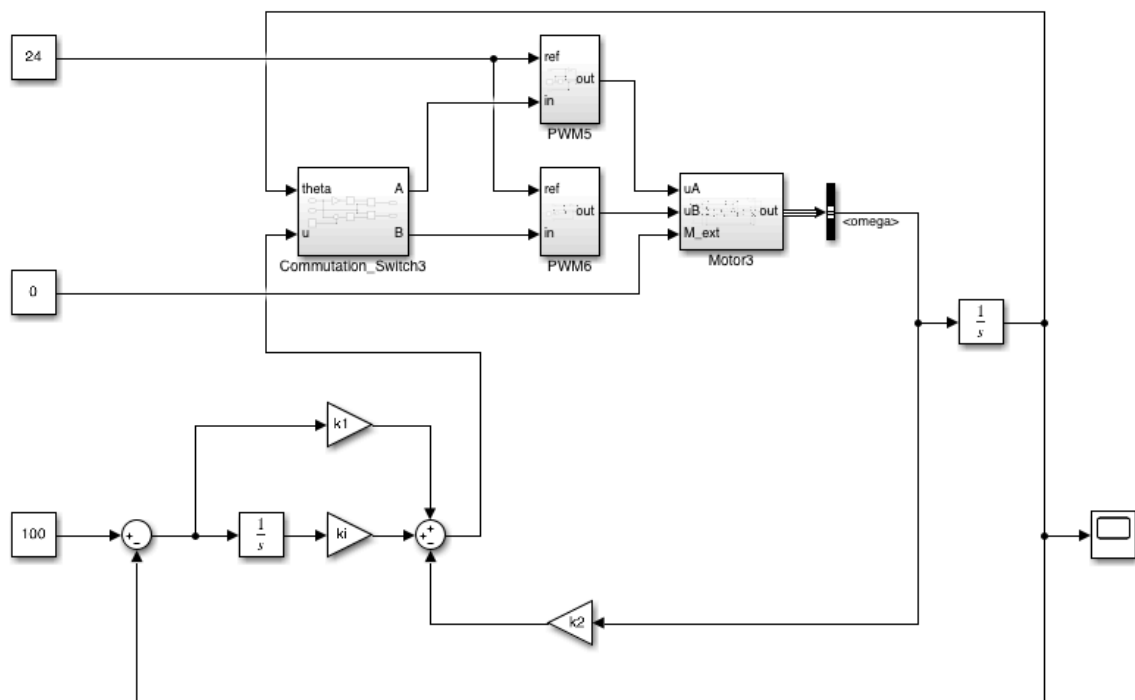


Рисунок 5.9 – Структурная схема системы управления

Инв. № подл.	Подп. и дата				Лист
	Инв. № дубл.				
	Взам. инв. №				
	Подп. и дата				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	42

The diagram illustrates a closed-loop control system for a motor. The reference input is a constant value of 24. The feedback loop consists of a summing junction where the reference is compared with the motor position. The error signal is then processed by a proportional gain  $k_1$  and an integrator  $\frac{1}{s}$  to generate the control signal. This signal is fed into a Commutation\_Switch3 block, which outputs to two PWM blocks (PWM5 and PWM6). These blocks drive a Motor3 block, which outputs the motor's angular velocity  $\omega$ . The output is integrated to produce the motor position, which is fed back to the reference input and the feedback loop. The system also includes a Commutation\_Switch3 block and a Motor3 block.

Рисунок 5.9 – Структурная схема системы управления

ФСУР.205.R3435.001 ПЗ

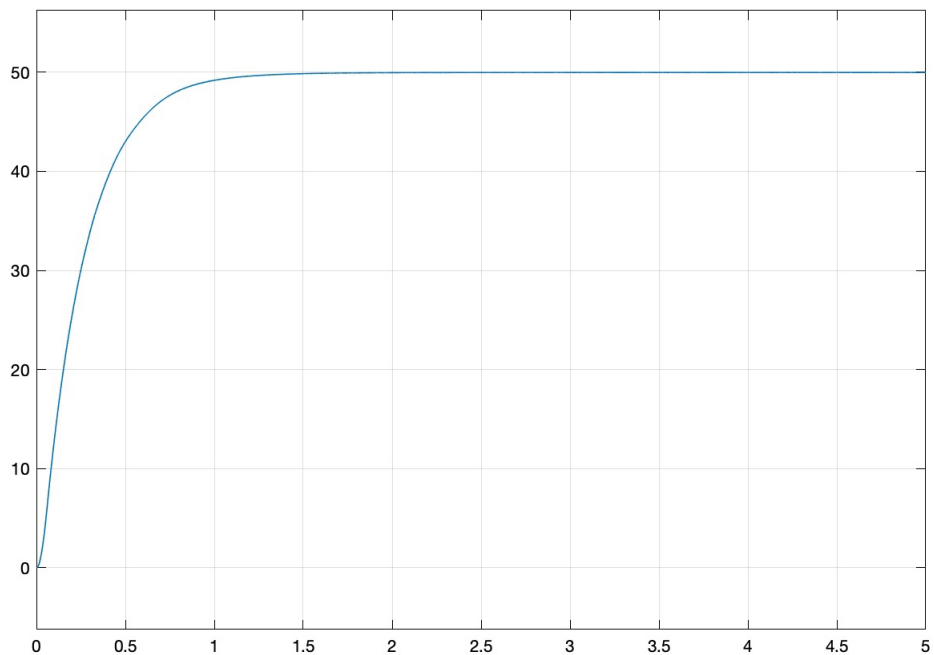


Рисунок 5.10 – График переходного процесса

В итоге время переходного процесса составило  $\approx 0.778$  с, а перерегулирование  $\approx 0.16\%$ , что можно считать вполне приемлемым результатом.

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата	<div>ФСУиР.205.R3435.001 ПЗ</div>					Лист
										43
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата						

6 РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

...

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата	ФСУиР.205.R3435.001 ПЗ					Лист
										44
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата						

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

...

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

ФСУиР.205.R3435.001 ПЗ

Лист
45

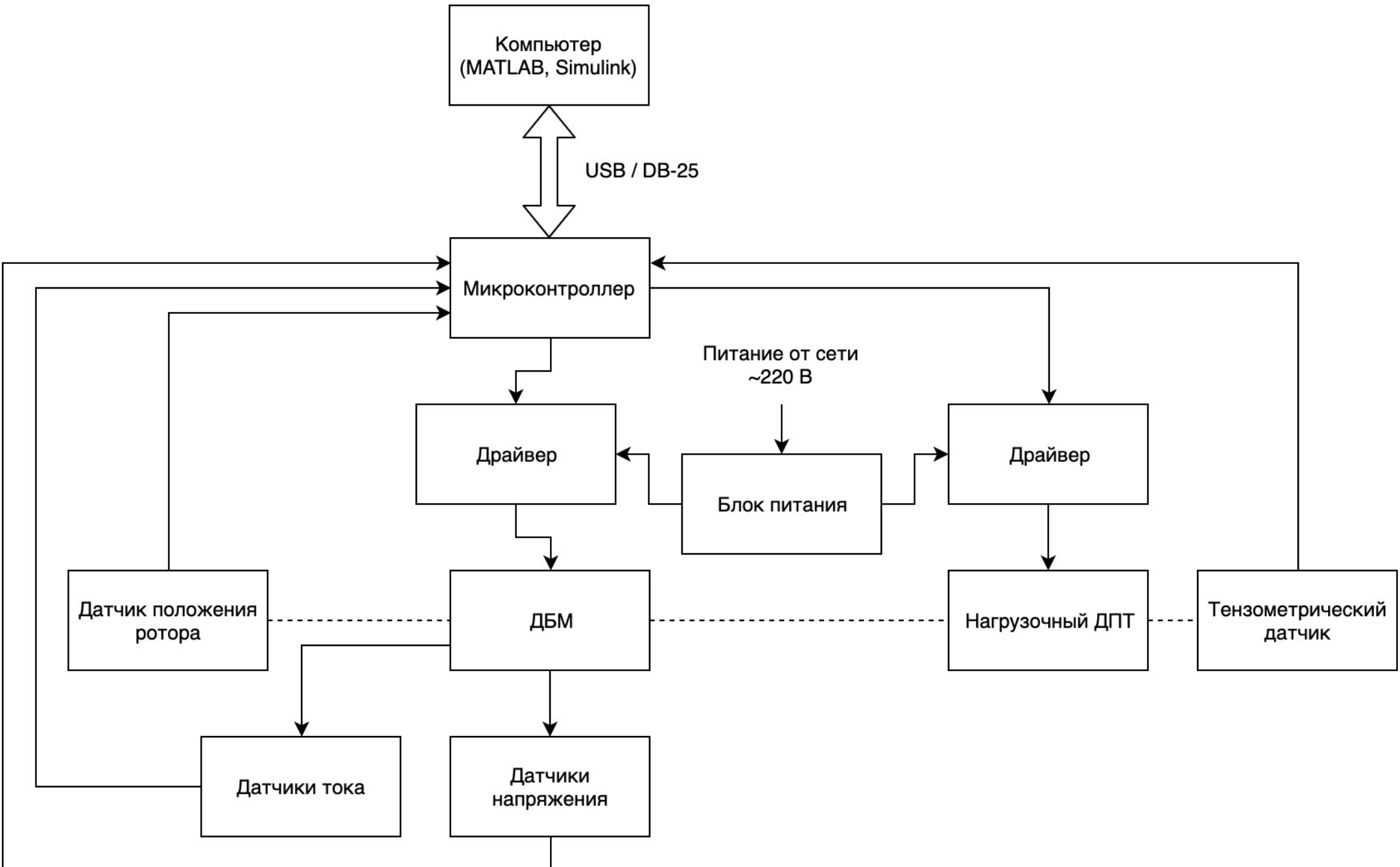
## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Примеры применения. — ОАО "МАШИНОАППАРАТ", 2015. — Обращение: 10.04.2021. <http://mashap.maverick.ru/>.
2. Бельский Ю. М., Микеров А. Г. Бесконтактный моментный привод для многофункциональных систем автоматического управления. — Москва : Энергоатомиздат, 1991.
3. Бездатчиковое полеориентированное управление электродвигателем с постоянными магнитами. — Инженерные решения, 2021. — Обращение: 01.05.2021. <https://engineering-solutions.ru/motorcontrol/sensorless/>.
4. МАГНИТ СТАНДАРТ, — 2019. — Обращение: 01.05.2021. <http://www.magnetstandart.ru/magazin/kolco-shajba>.
5. ДБМ 63 - 0,06 - 3 - 2. — ОАО "МАШИНОАППАРАТ", 2015. — Обращение: 10.04.2021. [http://mashap.maverick.ru/MenuVert/StatorGlad/63\\_0.06\\_3\\_2.html](http://mashap.maverick.ru/MenuVert/StatorGlad/63_0.06_3_2.html).
6. Синтез систем автоматического управления методом модального управления / В. В. Григорьев, Н. В. Журавлёва, Г. В. Лукьянова, К. А. Сергеев. — Санкт-Петербург : СПбГУ ИТМО, 2007.
7. Цифровые системы управления / В. В. Григорьев, С. В. Быстров, В. И. Бойков, Г. И. Болтунов, О. К. Мансурова. — Санкт-Петербург : СПбГУ ИТМО, 2007.

Инв. № подл.	Подп. и дата				Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата
ев. — Санкт-Петербург : СПбГУ ИТМО, 2007.							
7. Цифровые системы управления / В. В. Григорьев, С. В. Быстров, В. И. Бойков, Г. И. Болтунов, О. К. Мансурова. — Санкт-Петербург : СПбГУ ИТМО, 2007.							

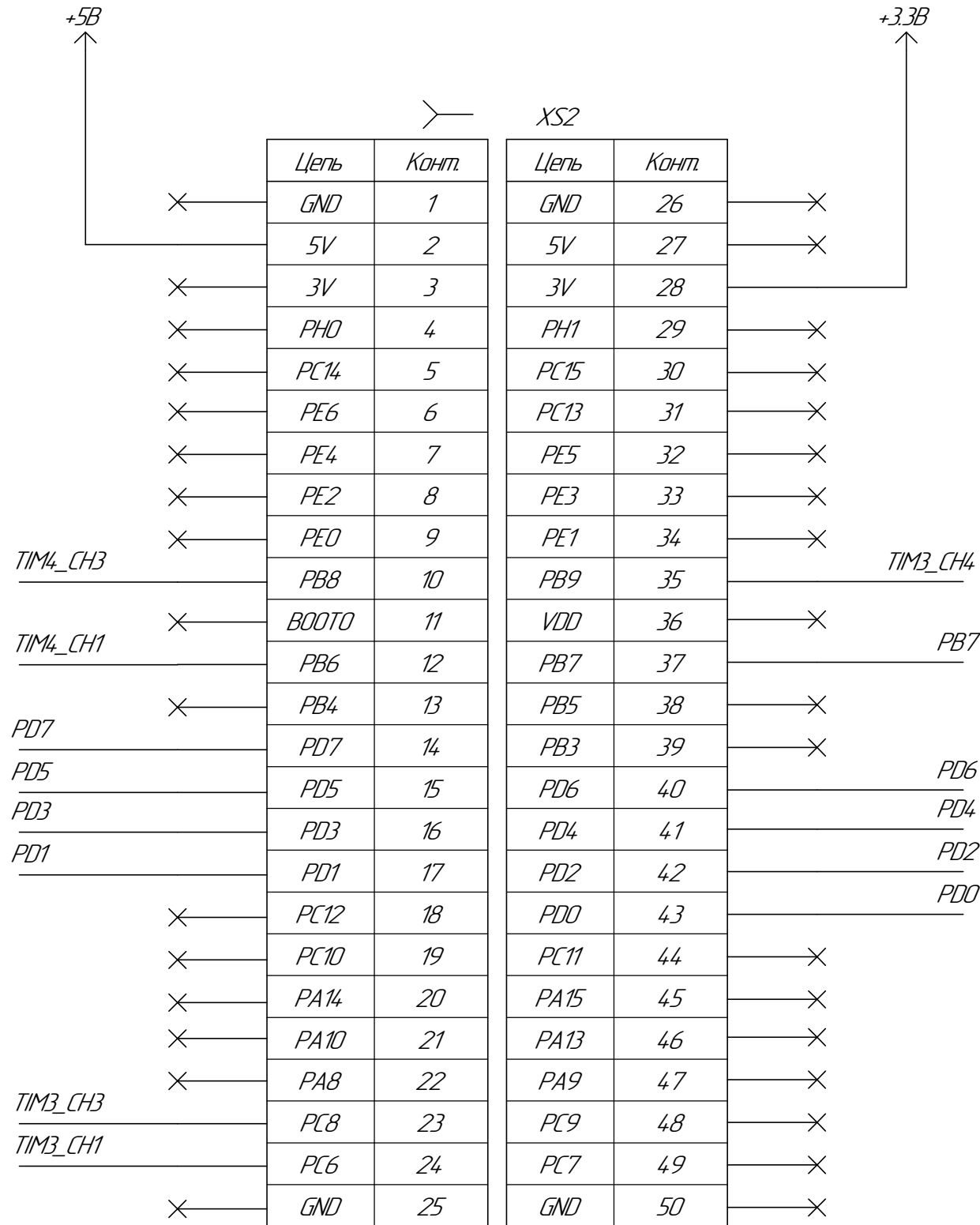
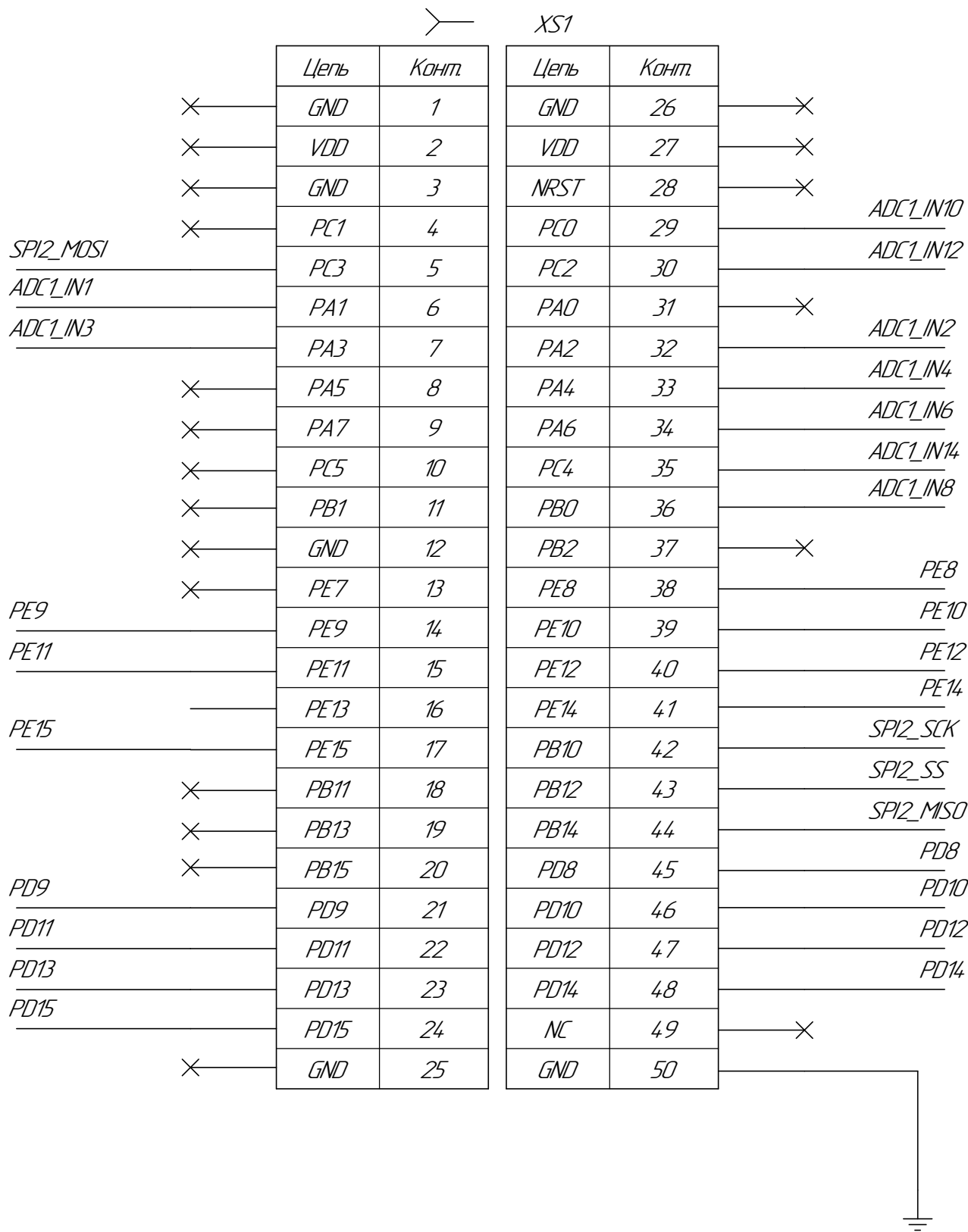
Изм. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата	Справ. №	Перв. примен.

ФСЧУР.205.R34.35.002 Э2



					ФСЧУР.205.R34.35.002 Э2			
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Макет на базе бесколлекторного двигателя	Лист	Масса	Масштаб
Разраб.	Иванов В. А.							
Пров.	Бойков В. И.							
Т.контр.						Лист	Листов	1
И.контр.					Университет ИТМО			
Утв.					ФСЧУР зр. R34.35			

ФСЧУР.205.R3435.003 ЭЗ



					ФСЧУР.205.R3435.003 ЭЗ				
					Модуль управления бесколлекторным двигателем	Лист		Масса	Масштаб
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата					
Разраб.		Иванов В. А.		03.05.21					
Пров.		Бойков В. И.							
Т.контр.									
						Лист 1		Листов 3	
Н.контр.						Университет ИТМО			
Утв.						ФСЧУР гр. R3435			

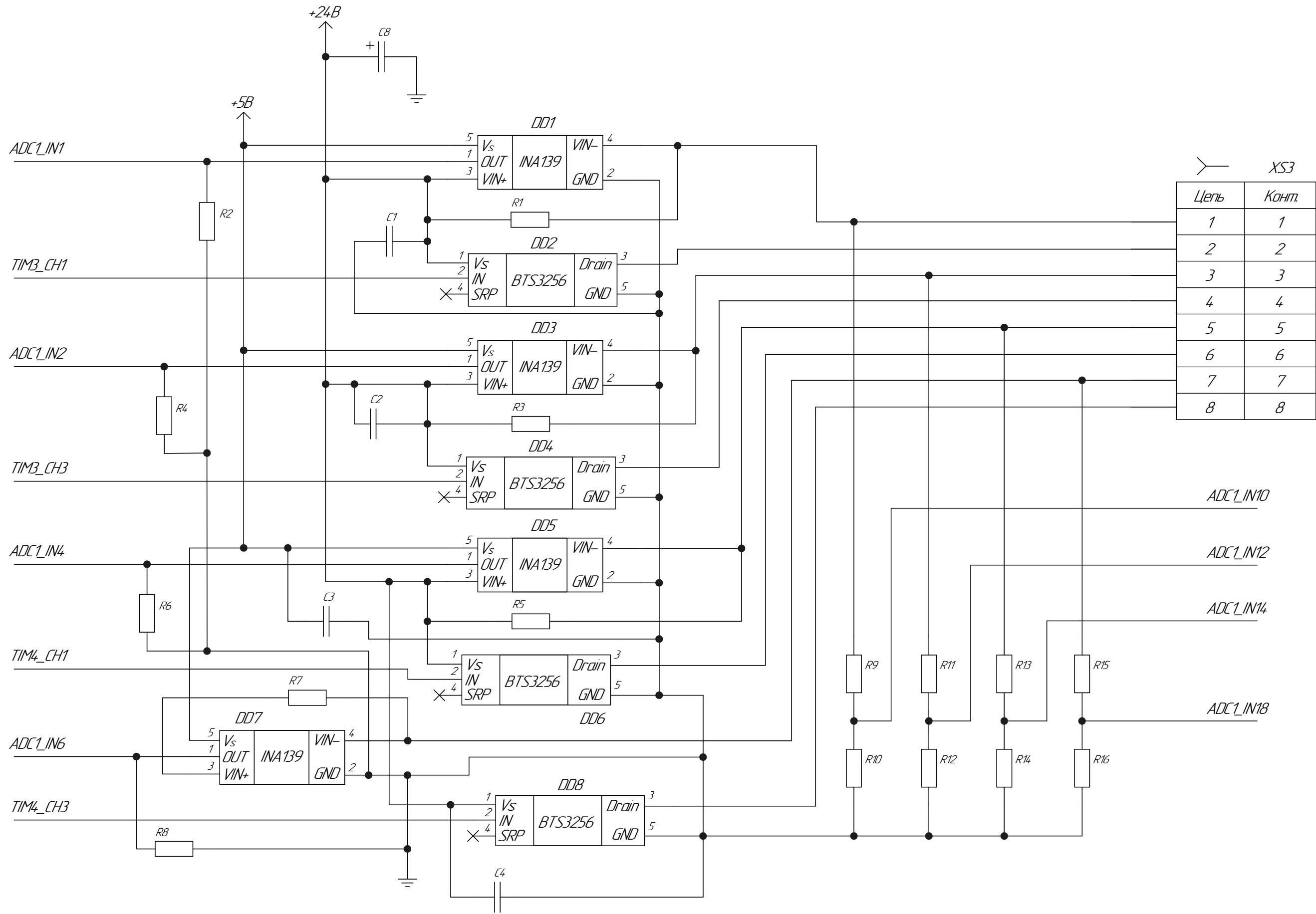


КОМПАС-3D v18.1 Учебная версия © 2019 ООО "АСКОН-Системы проектирования", Россия. Все права защищены.

Изм. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата

Не для коммерческого использования

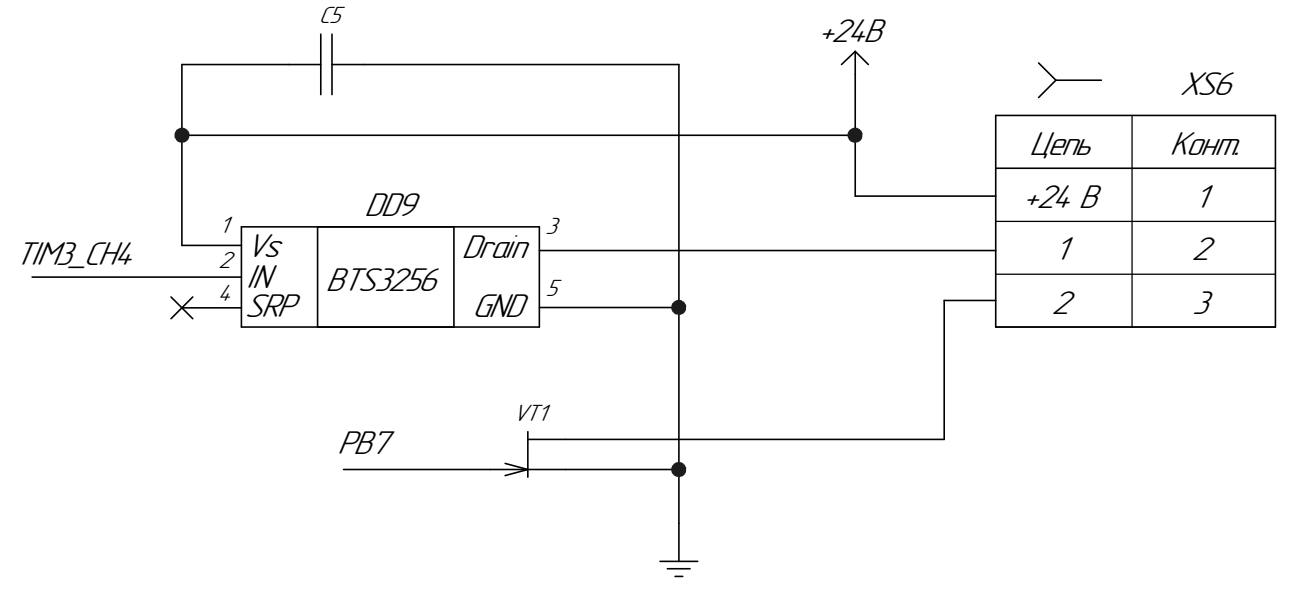
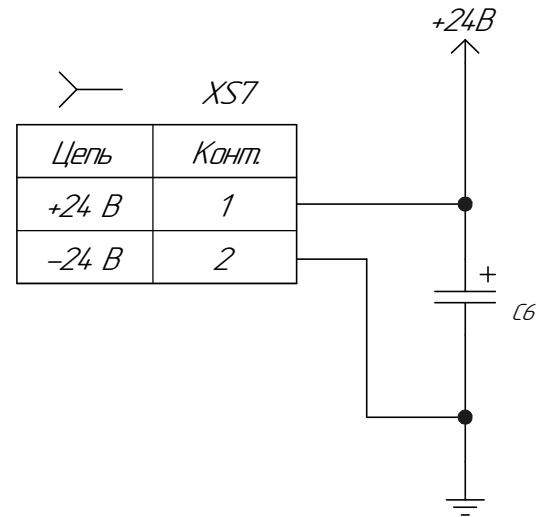
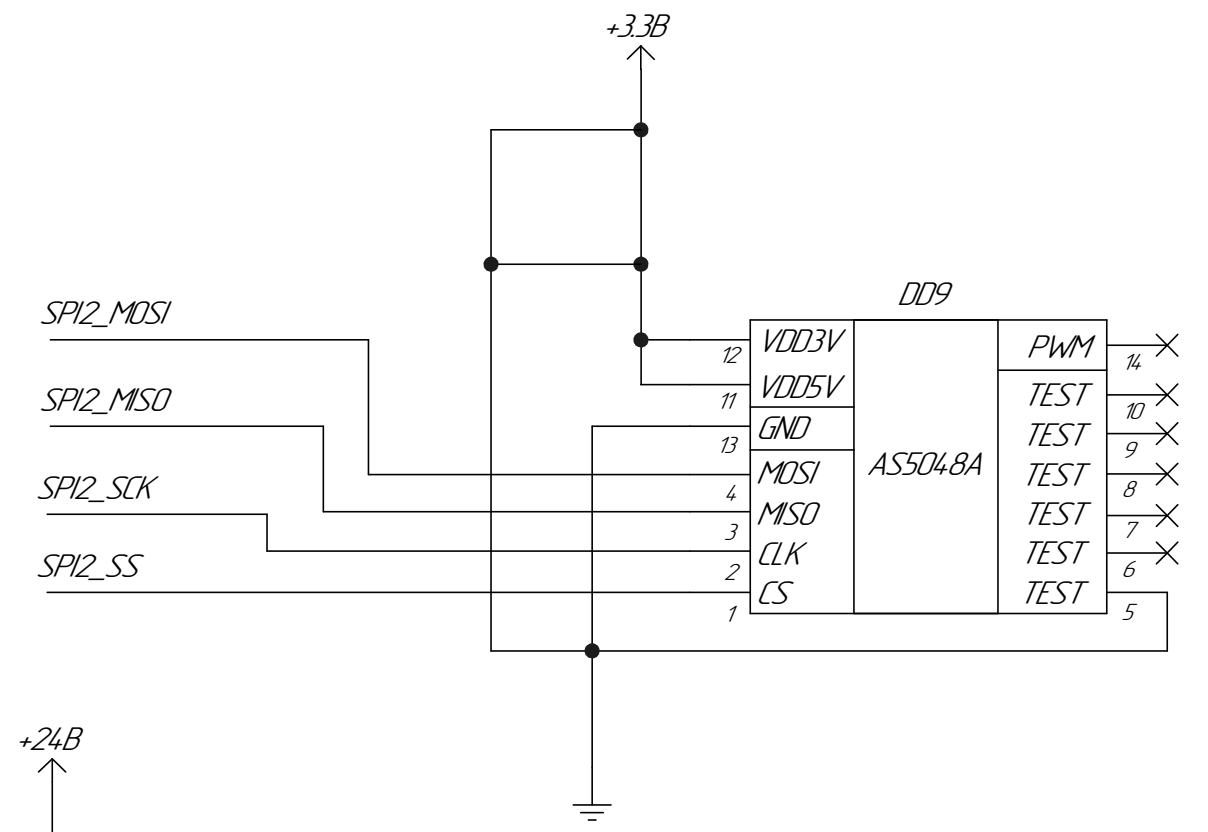
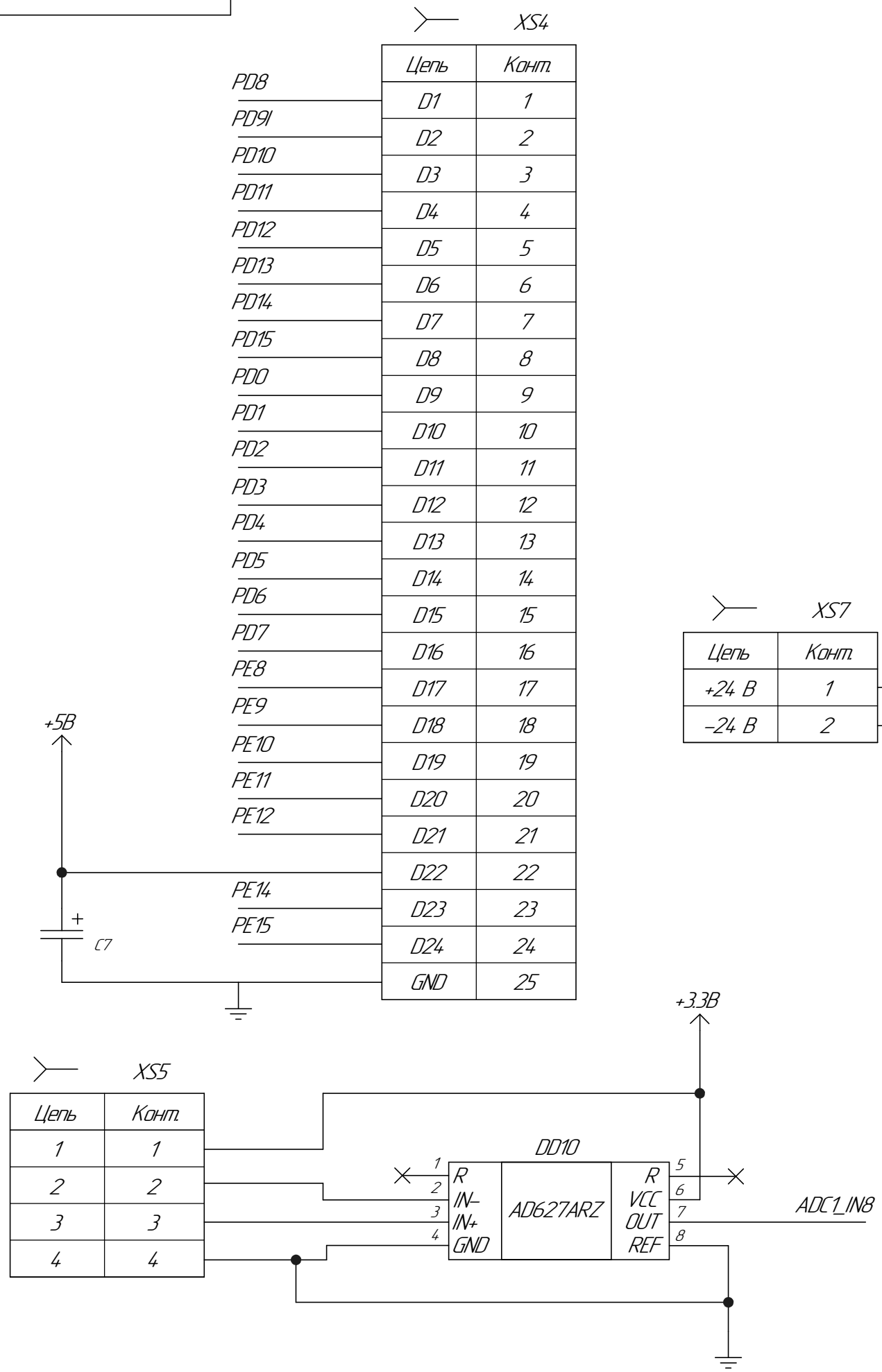
ФСЧУР.205.R34.35.003 ЭЗ



Цепь	Комп.
1	1
2	2
3	3
4	4
5	5
6	6
7	7
8	8

Изм. №	Изм. №	Изм. №	Изм. №	Изм. №	Изм. №
Изм. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инд. № дубл.	Подп. и дата	

ФСУП.205.R34.35.003 ЭЗ



КОМПАС-3D v18.1 Учебная версия © 2019 ООО "АСКОН-Системы проектирования", Россия. Все права защищены.

Инд. № подл.

Подп. и дата

Взам. инв. №

Инд. № дубл.

Спраб. №

Перв. примен.

Изм. Лист

№ докум.

Подп.

Дата

Разраб. Иванов В. А.

Пров. Байков В. И.

Т.контр.

Н.контр.

Утв.

ФСЧУР.205.R34.35.004

Плата печатная

Лист

1

Листов

2

Лит.

Масса

Масштаб

1:1

Не для коммерческого использования

Копировал

Формат А3

170

150

125

100

75

50

25

0

25

50

75

100

110

170±0,5

110±0,435

170

150

125

100

75

50

25

0

25

50

75




100

110

ФСЧУР.205.R34.35.004

Инд. № подл.	Подп. и дата	Взам. инд. №	Инд. № дудл.	Подп. и дата

- 1. Материал для изготовления печатной платы – стеклотекстолит FR4.
- 2. Печатная плата должна соответствовать ГОСТ Р 53429–2009 класс 4.
- 3. Шаг координатной сетки 5 мм.
- 4. Ширина проводников не менее 0.2 мм, зазор между проводниками не менее 0.2 мм.
- 5. Параметры отверстий приведены в таблице.

Условное обозначение	Диаметр, мм	Размер конт. площадки, мм	Металлизация	Количество
	1	2.4	Да	31
	0.8	1.6	Да	139
	0.3	0.8	Да	56

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

Формат А4