

## СОДЕРЖАНИЕ

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ . . . . .		6
ВВЕДЕНИЕ . . . . .		7
1 ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ УЧЕБНЫХ СТЕНДОВ НА БАЗЕ БЕСКОЛЛЕКТОРНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ . . . . .		9
1.1 Типовой комплект учебного оборудования «Вентильный двигатель» . . . . .		9
1.2 Стенд SkyRC Extreme BMS-01 для проверки бесколлекторных двигателей . . . . .		10
1.3 Типовой комплект учебного оборудования «Микропроцессорная система управления вентильным двигателем», исполнение моноблочное с ноутбуком» . . . . .		11
2 РАЗРАБОТКА ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ СХЕМЫ СТЕНДА . . .		12
3 РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ СТЕНДА . . . . .		14
3.1 Бесконтактный моментный двигатель . . . . .		14
3.2 Нагрузочный двигатель постоянного тока . . . . .		18
3.3 Измерительные устройства . . . . .		20
3.4 Микроконтроллер . . . . .		22
3.5 Модуль управления . . . . .		24
3.6 Блок питания . . . . .		24
3.7 Описание конструкции . . . . .		24
4 РАЗРАБОТКА СТРУКТУРНОЙ СХЕМЫ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ . . . . .		26
4.1 Синхронная машина . . . . .		26
4.2 Коммутатор . . . . .		28
4.3 ШИМ . . . . .		29
4.4 Двигатель . . . . .		30
5 СИНТЕЗ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДВИГАТЕЛЕМ . . . . .		32
5.1 Линейная непрерывная модель . . . . .		32

Подп. и дата								
Инв. № дубл.								
Взам. инв. №								
Подп. и дата								
Инв. № подл.	Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	<div> <div>ФСУиР.205.R3435.001 ПЗ</div> <div>Разработка макета электропривода с бесконтактным моментным электродвигателем</div> <div> <div>Лит.</div> <div>Лист</div> <div>Листов</div> </div> </div>		
	Разраб.	Иванов В. А.						
	Пров.	Бойков В. И.						
	Н. контр.							
	Утв.							
						<div> <div>4</div> <div>40</div> </div> <div> <div>Университет ИТМО</div> <div>ФСУиР гр. R3435</div> </div>		

5.2 Синтез регулятора угла положения ротора . . . . . 35

6 РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ . . . . . 38

ЗАКЛЮЧЕНИЕ . . . . . 39

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ . . . . . 40

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

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

ФСУиР.205.R3435.001 ПЗ

Лист
5

## 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
										7
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				
										8				
										Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

# 1 ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ УЧЕБНЫХ СТЕНДОВ НА БАЗЕ БЕСКОЛЛЕКТОРНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

## 1.1 Типовой комплект учебного оборудования «Вентильный двигатель»



Рисунок 1.1 – Внешний вид комплекта

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.

Комплект представляет из себя полный набор всего, что нужно: двигатель для исследования, нагрузочный двигатель, осциллограф. В комплектацию продажи может быть добавлен даже стол.

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

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	<div> <div>ФСУиР.205.R3435.001 ПЗ</div> <div>Копировал</div> </div>	Лист
						9

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

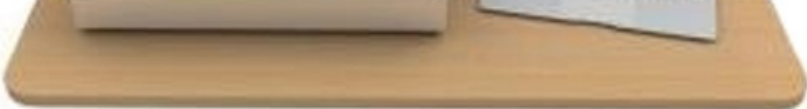


Рисунок 1.3 – Внешний вид комплекта

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
11



## 2 РАЗРАБОТКА ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ СХЕМЫ СТЕНДА

При разработке функциональной схемы главной задачей было разъяснить и описать процессы, протекающие как между отдельными цепями стенда, так на стенде в целом.

Главным компонентом стенда является исследуемый двигатель - двигатель ДБМ. Двигатель нужно обеспечить питанием, поэтому на стенде предусмотрена установка покупного блока питания. Однако, сигналы на управление двигателем не могут работать с таким напряжением, а пины микроконтроллера просто не выдержат протекающего тока. Отсюда формулируется задача разработки специального драйвера, который с помощью силовых ключей позволял бы осуществлять управление двигателем.

В качестве объекта изучения предлагается осуществлять сбор и обработку различных метрик, таких как:

- положение ротора;
- токи на обмотках;
- напряжения на обмотках;
- момент на валу.

Это стало возможным благодаря установке определенных датчиков. Каждый из этих датчиков должен осуществлять отправку данных на какое-либо управляющее устройство. И в качестве такого устройства было решено использовать микроконтроллер. В таком случае микроконтроллер сможет либо сам реализовывать алгоритм управления, либо же просто собирать данные и в формате единого пакета отправлять их на компьютер.

Микроконтроллер должен быть достаточно мощным, так как известны случаи, когда вычислительных мощностей для управления такими двигателями просто не хватало [можно вставить источник]. Микроконтроллер должен поддерживать соединение с компьютером для отправки показаний или же приема команд управления. При этом на микроконтроллер также ложится еще одна немаловажная задача - управление драйвером для двигателя.

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

Подп. и дата		Инв. № дубл.		Взм. инв. №		Подп. и дата		Инв. № подл.	
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	ФСУиР.205.R3435.001 ПЗ				Лист
									12

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 на 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.

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

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.

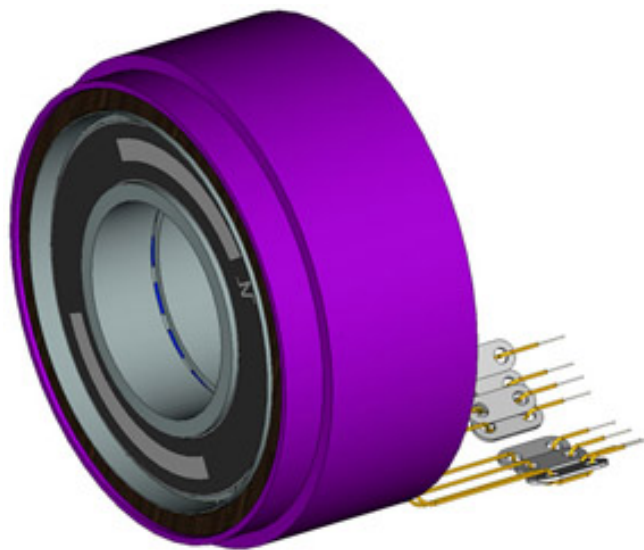


Рисунок 3.1 – Примерный внешний вид двигателя

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 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	Взм. инв. №	Ине. № дубл.	Подп. и дата

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	ФСУиР.205.R3435.001 ПЗ	Лист
						15

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(взвешенная схема)			2	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	<div>ФСУиР.205.R3435.001 ПЗ</div>					Лист 16
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	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. №	Ине. № дубл.
Подп. и дата	

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

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
						18



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.

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

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

ФСУиР.205.Р3435.001 ПЗ



Управление двигателем реализовано с помощью того же силового ключа - BTS3256D. Было решено не предусматривать даже возможность реверса двигателя, так как она просто не нужна ввиду того, что имеется возможность реверса двигателя ДБМ. Силовой ключ используется для того, чтобы была возможность регулировать частоту оборотов двигателя.

У двигателя Д5-ТР с завода установлена электромуфта, которая блокирует ротор, если на нее не подано напряжение, проще говоря тормоз. По умолчанию при подаче напряжения на клеммы двигателя, питание поступает и на обмотки, и на электромуфту, что отключает торможение. Это поведение было исправлено отсоединением контактов тормоза от цепи коллектора - тормоз и сам двигатель включаются отдельно друг от друга. Контроль над тормозом осуществляется также с помощью микроконтроллера, однако управление реализовано с помощью обычного N-канального транзистора IRLZ34NSPBF.

### 3.3 Измерительные устройства

Для измерения различных параметров двигателя ДБМ на стенде предусмотрен целый набор датчиков, а именно:

- Устройство измерения тока для каждой обмотки двигателя ДБМ;
- Устройство измерения напряжения для каждой обмотки двигателя ДБМ;
- Датчик угла положения ротора;
- Тензометрический датчик

Показания со всех датчиков собираются микроконтроллером и отправляются на компьютер с помощью USB-соединения.

Датчики тока и напряжения нужны для снятия электрических показателей двигателя в момент работы. В качестве монитора напряжения используется самый обычный делитель напряжения в связке с микроконтроллерным АЦП. Для снятия показаний тока регистрируется падение напряжение на шунтирующем резисторе в цепи нагрузки, напряжение на резисторе подается на входы микросхемы INA139, которая представляет из себя операционный усилитель с некоторой дополнительной обвязкой. Сигнал с выхода микросхемы подается на вход АЦП микроконтроллера. В качестве шунтиру-

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата	смонтирен целый набор датчиков, а именно:						
					– Устройство измерения тока для каждой обмотки двигателя ДБМ;						
					– Устройство измерения напряжения для каждой обмотки двигателя ДБМ;						
					– Датчик угла положения ротора;						
					– Тензометрический датчик						
Показания со всех датчиков собираются микроконтроллером и отправляются на компьютер с помощью USB-соединения.											
Датчики тока и напряжения нужны для снятия электрических показателей двигателя в момент работы. В качестве монитора напряжения используется самый обычный делитель напряжения в связке с микроконтроллерным АЦП. Для снятия показаний тока регистрируется падение напряжение на шунтирующем резисторе в цепи нагрузки, напряжение на резисторе подается на входы микросхемы INA139, которая представляет из себя операционный усилитель с некоторой дополнительной обвязкой. Сигнал с выхода микросхемы подается на вход АЦП микроконтроллера. В качестве шунтиру-											
					ФСУиР.205.R3435.001 ПЗ					Лист	
										20	
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата							

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
						21

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].

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 себя реостат, а это означает, что для измерения значения также используется делитель напряжения и АЦП.

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

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

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

ФСУиР.205.R3435.001 ПЗ

Лист
22

этого микроконтроллера (рисунок 3.6). 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.

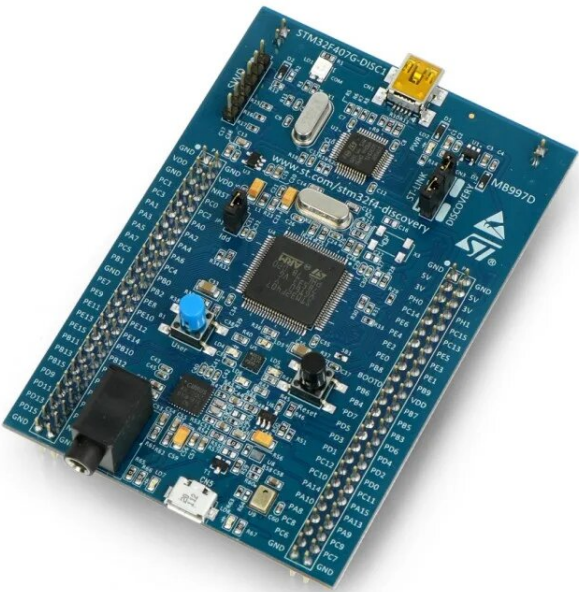


Рисунок 3.6 – Внешний вид отладочной платы

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

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

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

Печатная плата выполнена из двухстороннего фольгированного текстолита, ее чертеж представлен в приложении ??.

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

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

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.

					<p style="text-align: center;"><i>ФСУиР.205.R3435.001 ПЗ</i></p>	Лист
						24
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		

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

*ΦCYuP.205.R3435.001 Π3*

#### 4 РАЗРАБОТКА СТРУКТУРНОЙ СХЕМЫ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ

## 4.1 Синхронная машина

Был рассмотрен двухфазный двигатель серии ДБМ. Получена система уравнений для этого двигателя. Для упрощения модели не учитываются:

- Влияние реакции якоря;
- Потоки рассеяния и насыщения магнитной цепи;
- Потери в стали;
- Пульсации момента.

Считается, что магнитные потоки и МДС статора и ротора синусоидально распределены, а еще одно допущение заключается в предположении о том, что электрохимические процессы протекают гораздо медленнее, чем вызывающие их электромагнитные процессы [2].

Также, ротор двигателя лишен смещения центра тяжести.

С помощью второго закона Кирхгофа были получены уравнения токов в обмотках статора

$$\begin{cases} L_\Phi \frac{di_A}{dt} + Ri_A = u_A + e_A; \\ L_\Phi \frac{di_B}{dt} + Ri_B = u_B + e_B, \end{cases} \quad (4.1)$$

где  $L_\phi$  - индуктивность фазы,  $R$  - сопротивление фазы,  $e_A, e_B$  - ЭДС, наводимые в фазах  $A$  и  $B$  соответственно.

Согласно [2], система уравнений 4.1 с использованием преобразования Парка преобразуется в вид

$$\begin{cases} T_\Phi \frac{di_A}{dt} + i_A = \frac{1}{R}(u_A + C_e \omega \sin(\theta)); \\ T_\Phi \frac{di_B}{dt} + i_B = \frac{1}{R}(u_B - C_e \omega \cos(\theta)), \end{cases} \quad (4.2)$$

где  $T_{\Phi}$  - электромагнитная постоянная времени,  $\theta$  - угол поворота ротора двигателя, а  $\omega = \frac{d\theta}{dt}$  - его угловая скорость.

Подп. и дата		<div><div><p>в обмотках статора</p><math display="block">\begin{cases} L_{\Phi} \frac{di_A}{dt} + Ri_A = u_A + e_A; \\ L_{\Phi} \frac{di_B}{dt} + Ri_B = u_B + e_B, \end{cases} \tag{4.1}</math><p>где <math>L_{\Phi}</math> - индуктивность фазы, <math>R</math> - сопротивление фазы, <math>e_A, e_B</math> - ЭДС, наводимые в фазах <math>A</math> и <math>B</math> соответственно.</p><p>Согласно [2], система уравнений 4.1 с использованием преобразования Парка преобразуется в вид</p><math display="block">\begin{cases} T_{\Phi} \frac{di_A}{dt} + i_A = \frac{1}{R}(u_A + C_e \omega \sin(\theta)); \\ T_{\Phi} \frac{di_B}{dt} + i_B = \frac{1}{R}(u_B - C_e \omega \cos(\theta)), \end{cases} \tag{4.2}</math><p>где <math>T_{\Phi}</math> - электромагнитная постоянная времени, <math>\theta</math> - угол поворота ротора двигателя, а <math>\omega = \frac{d\theta}{dt}</math> - его угловая скорость.</p></div><div><div><div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div></div><div><div>Изм.</div><div>Лист</div></div><div><div>№ докум.</div><div>Подп.</div><div>Дата</div></div></div><div><div>ФСУиР.205.R3435.001 ПЗ</div><div>Лист</div><div>26</div></div></div></div>				
Инв. № дубл.						
Взам. инв. №						
Подп. и дата						
Инв. № подл.						

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

*ΦCΥuP.205.R3435.001 Π3*

Лист

---

27

Копировал

Формат А4

*ΦCΥuP.205.R3435.001 Π3*

Лист

---

27

*ΦCΥuP.205.R3435.001 Π3*

Копировал

Формат А4

*ΦCΥuP.205.R3435.001 Π3*

Копировал

Формат А4

Копировал



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

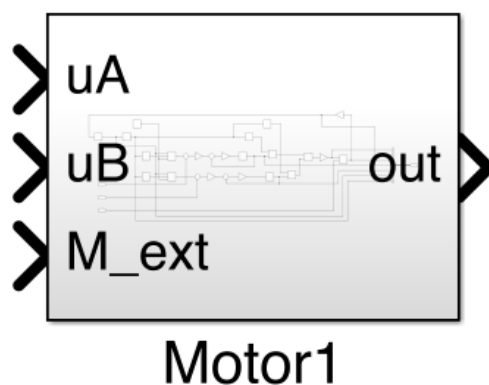


Рисунок 4.1 – Блок, представляющий модель двигателя ДБМ

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.

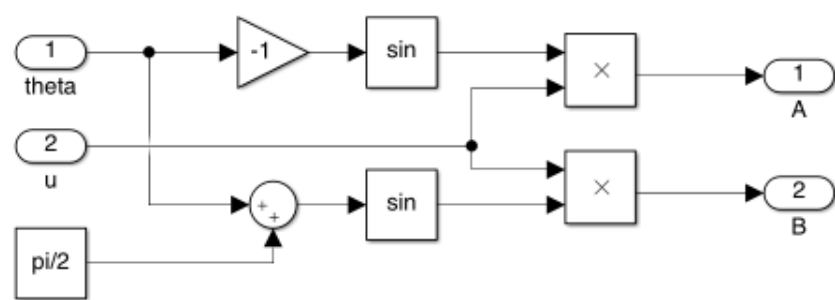


Рисунок 4.2 – Структурная схема коммутатора

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

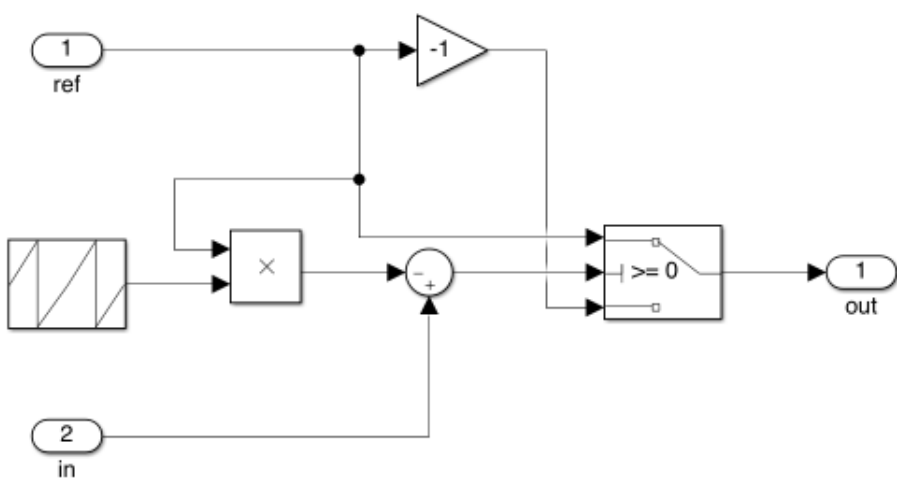


Рисунок 4.3 – Структурная схема широтно-импульсного модулятора

### 4.3 ШИМ

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 кГц. Принцип работы блока заключается в сравнении входного сигнала  $in$  с референсным сигналом  $ref$  и переключении по-

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

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).

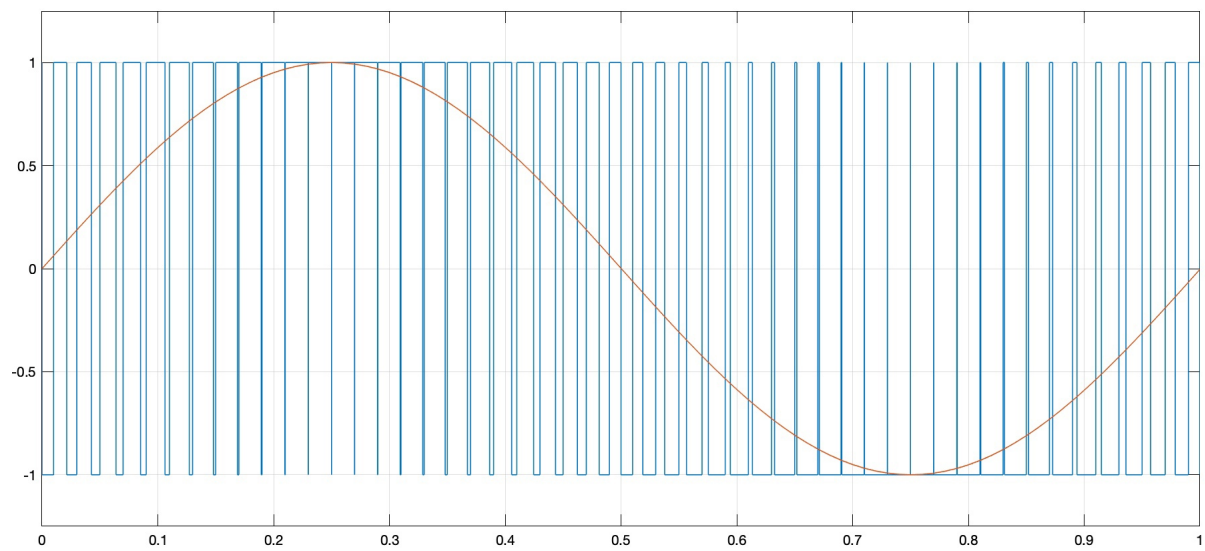


Рисунок 4.4 – Демонстрация работы ШИМ-генератора

### 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

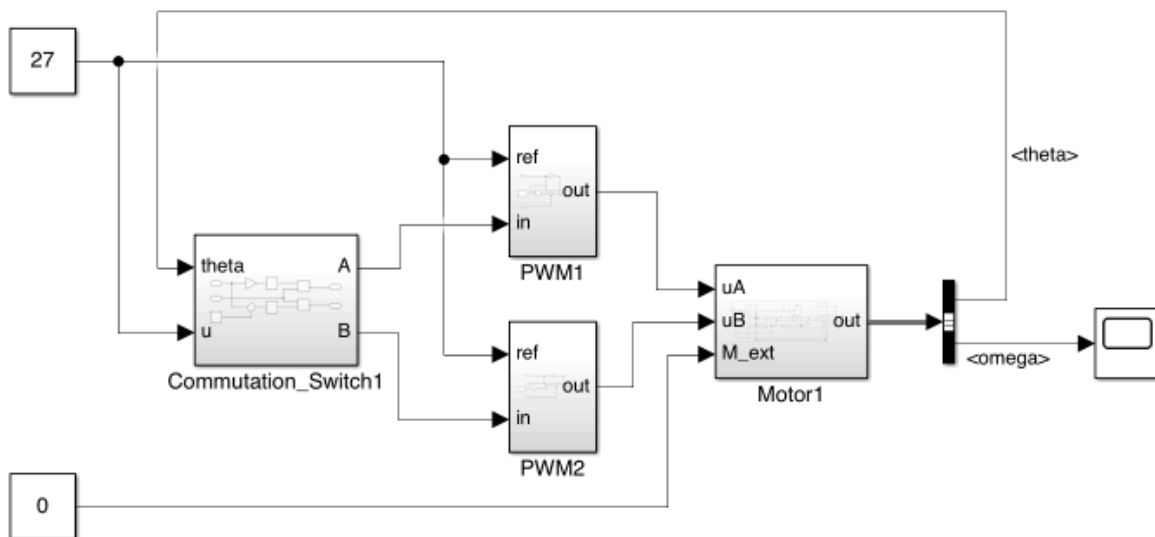


Рисунок 4.5 – Структурная схема двигателя

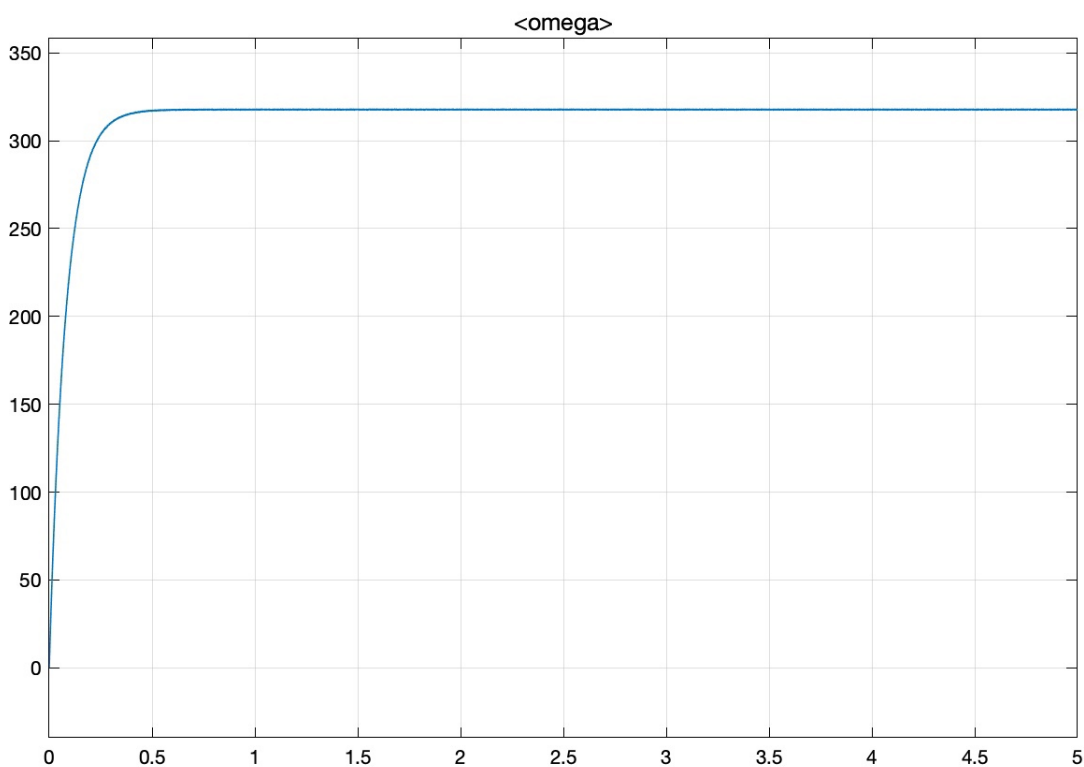


Рисунок 4.6 – Зависимость угловой скорости  $\omega$  от времени

Инв. № подл.	Подп. и дата				Подп. и дата			
	Взам. инв. №				Инв. № дубл.			
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	ФСУиР.205.R3435.001 ПЗ			
Копировал					Лист			
Формат А4					31			

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

## 5.1 Линейная непрерывная модель

Исходная модель содержит нелинейности и оказалась слишком сложной для синтеза регулятора для нее. Поэтому было сделано предположение о том, что двигатель ДБМ в нашем случае работает в режиме двигателя постоянного тока, а это значит, что его динамику движения можно описать апериодическим звеном первого порядка с передаточной функцией 5.1

$$W(s) = \frac{k}{T_s + 1}, \quad (5.1)$$

где  $k$  -коэффициент передачи,  $T$  - постоянная времени.

Следовательно, задача сводится к поиску таких  $k$  и  $T$ , при которых переходные процессы апериодического звена первого порядка и исходной модели будут иметь минимальные отличия.

Была рассмотрена реакция исходной модели на входное воздействие равное 24 вольтам (рисунок 5.1). 24 вольта используются по причине того, что блок питания стенда, как упоминалось ранее, выдает именно такое напряжение.

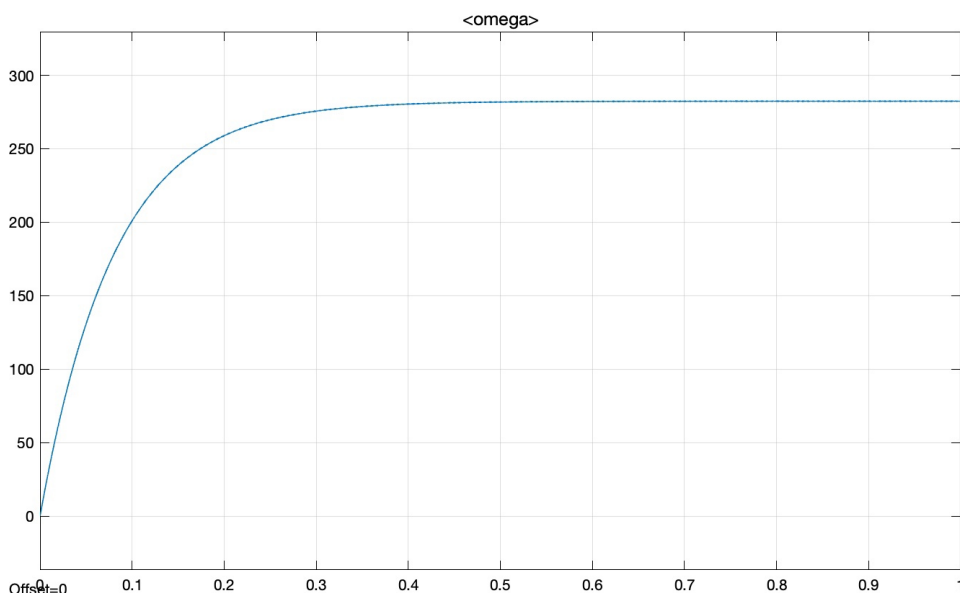


Рисунок 5.1 – Зависимость угловой скорости от времени при входном напряжении от блока питания

Установившееся значение - 282.348 рад/с. Значения  $k$  было найдено как отношение установившегося значения выхода модели ко входу (5.2)

$$k = \frac{\omega_{уст}}{U_{вх}} = \frac{282.348}{24} = 11.7645. \tag{5.2}$$

Значение постоянной времени  $T$  было найдено методом касательных к кривой переходного процесса (рисунок 5.2).

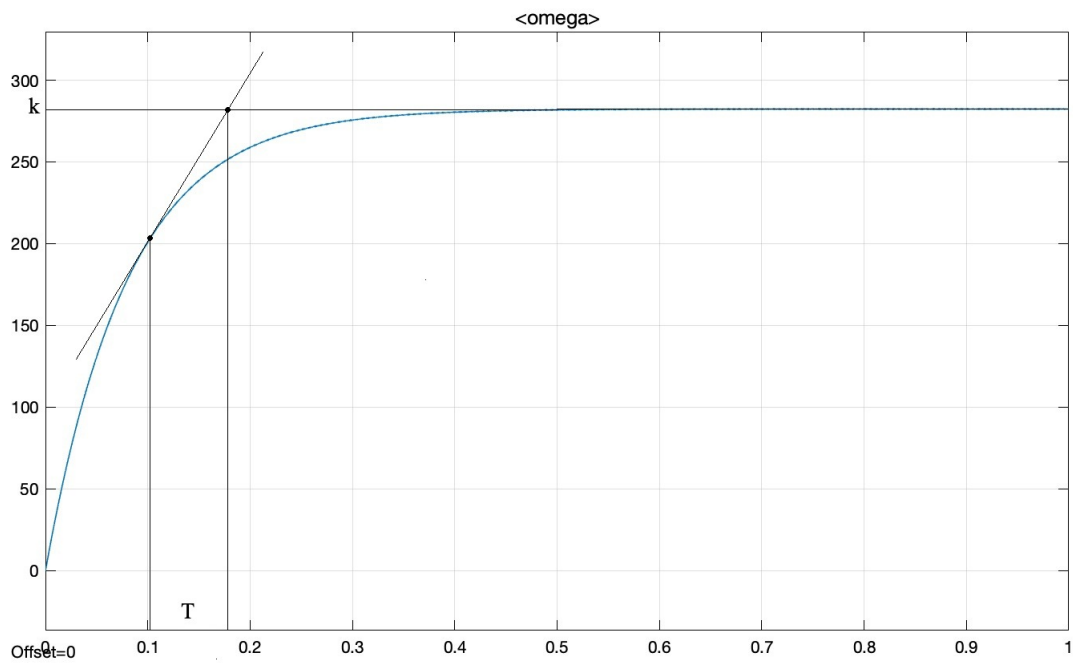


Рисунок 5.2 – Нахождение постоянной времени

Затем значение  $T$  было уточнено так, чтобы получить минимальную ошибку. Итоговое значение постоянной времени  $T = 0.0805$ , а значит одним из возможных математических описаний двигателя ДБМ является 5.3

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

Сравнение исходного переходного процесса и полученного представлено на рисунке 5.3;

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

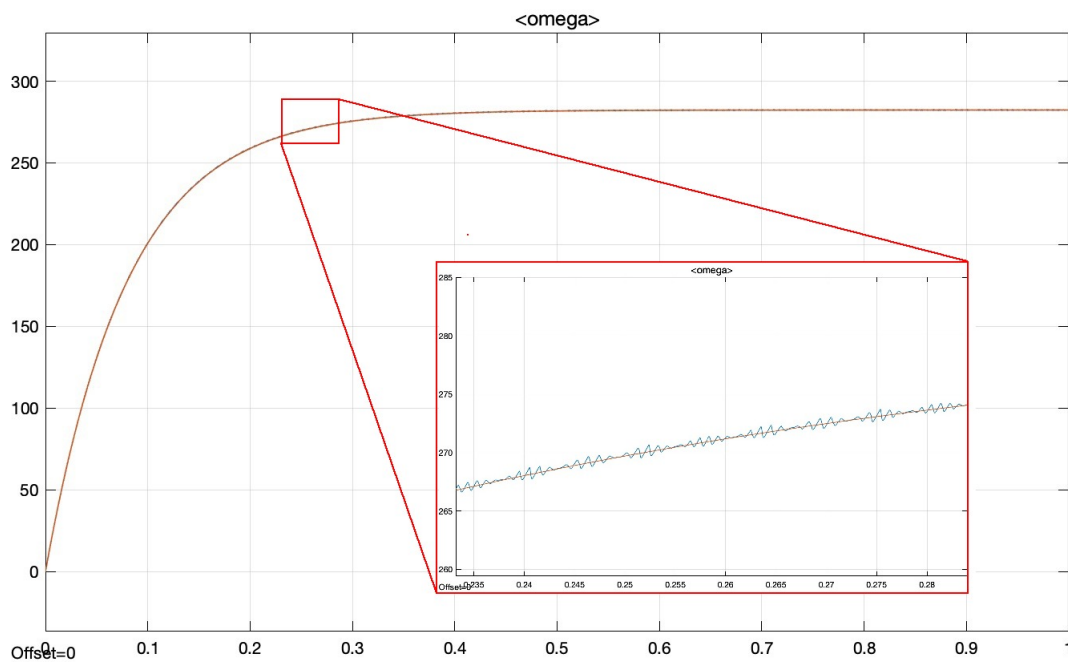


Рисунок 5.3 – Сравнение ПП исходной и непрерывной линейной моделей

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

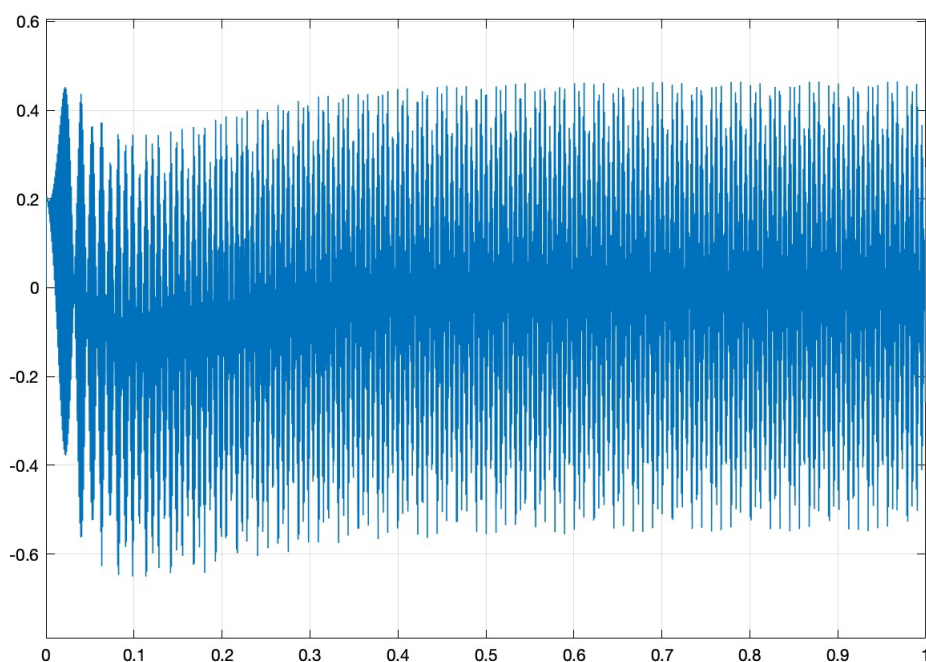


Рисунок 5.4 – График ошибки

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

Инв. № подл.	Подп. и дата				Лист
	Подп. и дата				
Инв. № дубл.	Взам. инв. №				34
	Взам. инв. №				
Подп. и дата	Подп. и дата				ФСУиР.205.R3435.001 ПЗ
	Подп. и дата				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	

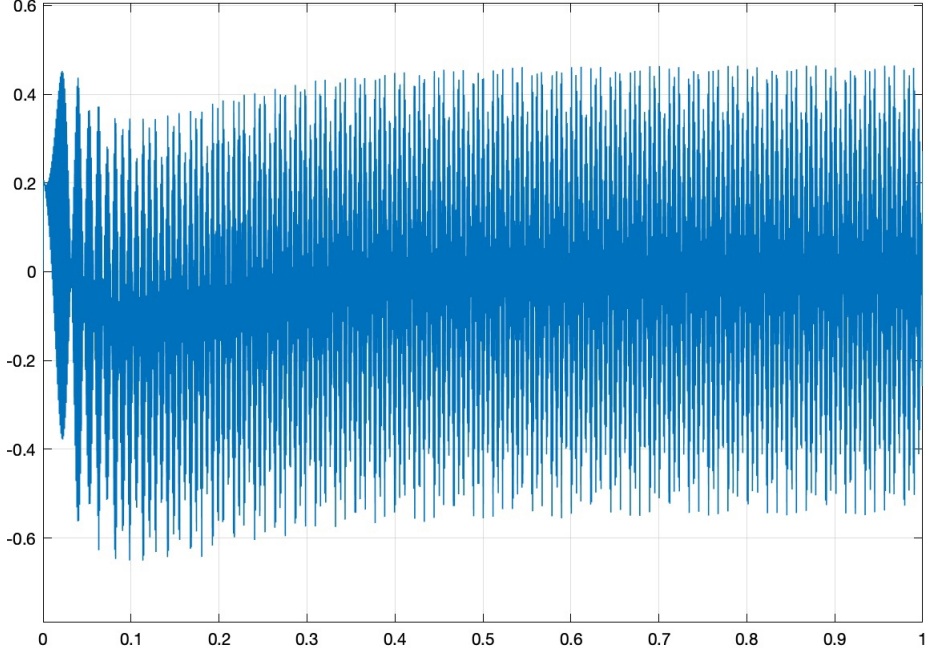


Рисунок 5.4 – График ошибки

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





$$A_d = e^{\tau A}; \quad (5.6)$$

$$B_d = \left( \sum_{i=1}^{\infty} \frac{\tau^i A^{i-1}}{i!} \right) B, \quad (5.7)$$

где  $\tau$  - интервал дискретности равный периоду генератора ШИМ.

Так, матрицы  $A_d = \begin{bmatrix} 1 & 1.001 \\ 1 & 0.9877 \end{bmatrix}$ ,  $B_d = \begin{bmatrix} 0.0001 \\ 0.1452 \end{bmatrix}$ .

Матрица  $C$  осталась неизменной.

В результате было получено дискретное описание объекта управления, представленное в форме 5.8.

$$\begin{cases} x(k+1) = A_d x(k) + B_d u(k); \\ y(k) = C x(k). \end{cases} \quad (5.8)$$

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 5.9

$$M\Gamma - AM = -BH. \quad (5.9)$$

... /tut nado pro tz/ ...

В качестве эталонной модели был выбран полином Баттерворта 3 порядка (5.10). Третий порядок модели обусловлен наличием интегрирующего звена в регуляторе и вторым порядком объекта управления.

$$D^*(\lambda) = \lambda^3 + 2\omega_0 \lambda^2 + 2\omega_0^2 \lambda + \omega_0^3. \quad (5.10)$$

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взм. инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата	<div style="text-align: center; font-weight: bold; font-size: 1.2em;">ФСУиР.205.R3435.001 ПЗ</div>					Лист
										36
										Изм.

Затем был построен график переходного процесса (рисунок 5.6) по полученной нормированной передаточной функции (5.11).

$$\begin{cases} W(s) = \frac{1}{D^*(\lambda)}; \\ \lambda = s; \\ \omega_0 = 1. \end{cases} \tag{5.11}$$

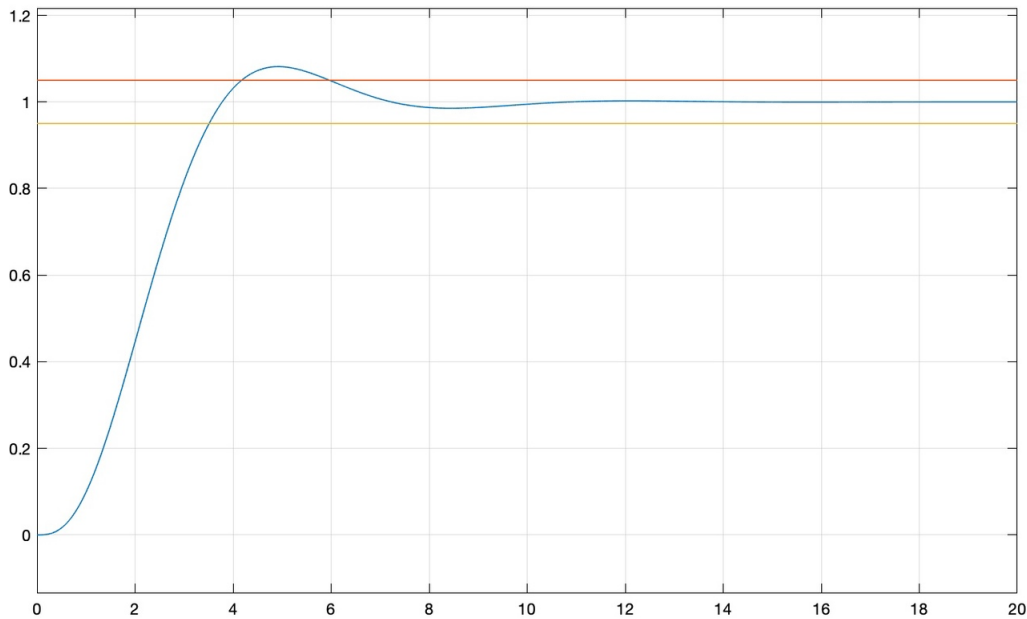


Рисунок 5.6 – Переходной процесс нормированной ПФ

Горизонтальными линиями на графике (рисунок 5.6) 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 Баттерворта 3 порядка время переходного процесса  $t_{\pi}^* = 5.965c$ .

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

$$\omega_0 = \frac{t_{\pi}^*}{t_{\pi}} = \frac{5.965}{0.1} = 59.65.$$

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

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

6 РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

...

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

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

ФСУиР.205.R3435.001 ПЗ

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

...

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

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

ФСУиР.205.R3435.001 ПЗ

## 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).

Име. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Име. № дубл.	Подп. и дата						
					<b>ФСУиР.205.R3435.001 ПЗ</b>					Лист 40
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата						