

## СОДЕРЖАНИЕ

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ . . . . .	2
ВВЕДЕНИЕ . . . . .	3
1 ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ УЧЕБНЫХ СТЕНДОВ НА БАЗЕ БЕСКОЛЛЕКТОРНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ . . . . .	5
1.1 Типовой комплект учебного оборудования «Вентильный двигатель» . . . . .	5
1.2 Стенд SkyRC Extreme BMS-01 для проверки бесколлек- торных двигателей . . . . .	6
1.3 Типовой комплект учебного оборудования «Микропро- цессорная система управления вентильным двигателем», исполнение моноблочное с ноутбуком» . . . . .	7
2 РАЗРАБОТКА ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ СХЕМЫ СТЕНДА . . .	9
3 РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ СТЕНДА . . . . .	11
3.1 Бесконтактный моментный двигатель . . . . .	11
3.2 Нагрузочный двигатель постоянного тока . . . . .	15
3.3 Измерительные устройства . . . . .	16
3.4 Микроконтроллер . . . . .	18
3.5 Модуль управления . . . . .	20
3.6 Описание конструкции . . . . .	20
4 РАЗРАБОТКА СТРУКТУРНОЙ СХЕМЫ СИСТЕМЫ УПРАВ- ЛЕНИЯ . . . . .	22
5 СИНТЕЗ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДВИГАТЕЛЕМ . . . . .	23
6 РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ . . . . .	24
ЗАКЛЮЧЕНИЕ . . . . .	25
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ . . . . .	26
ПРИЛОЖЕНИЕ А . . . . .	27
ПРИЛОЖЕНИЕ Б . . . . .	29
ПРИЛОЖЕНИЕ В . . . . .	30

Подп. и дата		Инв. № дубл.		Взам. инв. №		Подп. и дата				
Инв. № подл.						<b>ФСУиР.205.R3435.001 ПЗ</b>  <i>Разработка макета электропривода с бесконтактным моментным электродвигателем</i>				

## СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

АЦП - Аналого-цифровой преобразователь

## БМП - Бесконтактный моментный привод

# ГЛОНАСС - Глобальная навигационная спутниковая система

## ДБМ - Двигатель бесконтактный моментный

ДПТ - Двигатель постоянного тока

МДС - Магнитодвижущая сила

ПК - Персональный компьютер

ШИМ - Широтно-импульсная модуляция

## 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 системах 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;

Подп. и дата							
Инв. № дубл.							
Взм. инв. №							
Подп. и дата							
Инв. № подл.						<h3 style="margin: 0;">ФСУиР.205.R3435.001 ПЗ</h3>	
	Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		
	Разраб.		Иванов В. А.				
	Пров.		Бойков В. И				
Разработка макета электропривода с бесконтактным моментным электродвигателем					Лит.	Лист	Листов
						3	30
					Университет ИТМО ФСУиР гр. R3435		
	Н. контр.						
	Утв.						

– военной промышленности.

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.

Подп. и дата									
Инв. № дубл.									
Взам. инв. №									
Подп. и дата									
Инв. № подл.	Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	ФСУиР.205.R3435.001 ПЗ			
	Разраб.	Иванов В. А.							
	Пров.	Бойков В. И				Разработка макета электропривода с бесконтактным моментным электродвигателем	Лит.	Лист	Листов
								4	30
	Н. контр.						Университет ИТМО ФСУиР гр. R3435		
	Утв.								

# 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.

Подп. и дата	Рисунок 1.1 – Внешний вид комплекта											
	<p>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.</p> <p>Комплект представляет из себя полный набор всего, что нужно: двигатель для исследования, нагрузочный двигатель, осциллограф. В комплектацию продажи может быть добавлен даже стол.</p>											
Подп. и дата	ФСУиР.205.R3435.001 ПЗ											
	Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата							
Инв. № подл.	Разраб.	Иванов В. А.				Разработка макета электропривода с бесконтактным моментным электродвигателем				Лит.	Лист	Листов
	Пров.	Бойков В. И									5	30
						Университет ИТМО ФСУиР гр. R3435						
	Н. контр.											
	Утв.											

Одним из главных недостатков данного стенда является то, что двигатель спрятан от глаз пользователя. Задача обучения включает в себя не только познание теории, но и получение практических навыков. Фактически же реальное изучаемое устройство просто скрыто. Также, стенд не предлагает никаких возможностей дальнейшей работы с полученными данными. Далее осциллографа эти данные никуда не идут, а значит носят исключительно демонстрационный характер. Управление стендом осуществляется с помощью набора тумблеров, реостатов и других подобных электронных компонентов. Соответственно, о реализации какой-то сложной программной системы управления на таком стенде не может идти и речи. Ну и, конечно, стоимость данного продукта, на момент апреля 2021 года она составила 334 490 рублей за настольное исполнение и 368 810 рублей за стационарное исполнение со столом.

## 1.2 Стенд SkyRC Extreme BMC-01 для проверки бесколлекторных двигателей



Рисунок 1.2 – Внешний вид прибора

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

- обороты в минуту;

Подп. и дата									
Инв. № дубл.									
Взм. инв. №									
Подп. и дата									
Инв. № подл.	Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	<p style="text-align: center;"><b>ФСУиР.205.R3435.001 ПЗ</b></p> <p style="text-align: center;">Разработка макета электропривода с бесконтактным моментным электродвигателем</p>	Лит.	Лист	Листов
	Разраб.	Иванов В. А.						6	30
	Пров.	Бойков В. И							
	Н. контр.								
	Утв.								
							<p style="text-align: center;">Университет ИТМО ФСУиР гр. R3435</p>		

– обороты на вольт;

– ток,

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.

Подп. и дата								
Инв. № дубл.								
Взм. инв. №								
Подп. и дата								
Инв. № подл.	Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	<b>ФСУиР.205.R3435.001 ПЗ</b>		
	Разраб.	Иванов В. А.						
	Пров.	Бойков В. И				Разработка макета электропривода с бесконтактным моментным электродвигателем		
	Н. контр.							
	Утв.							
						Лит.	Лист	Листов
							7	30
						Университет ИТМО ФСУиР гр. R3435		

лем. 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			
							ФСУиР.205.R3435.001 ПЗ			
Изм.		Лист	№ докум.	Подп.	Дата					
Разраб.		Иванов В. А.				Разработка макета электропривода с бесконтактным моментным электродвигателем		Лит.	Лист	Листов
Пров.		Бойков В. И							8	30
								Университет ИТМО ФСУиР гр. R3435		
Н. контр.										
Утв.										



## 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.

Подп. и дата									
Инв. № дубл.									
Взм. инв. №									
Подп. и дата									
Инв. № подл.	Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	<b>ФСУиР.205.R3435.001 ПЗ</b>			
	Разраб.	Иванов В. А.							
	Пров.	Бойков В. И				Разработка макета электропривода с бесконтактным моментным электродвигателем	Лит.	Лист	Листов
								9	30
	Н. контр.						Университет ИТМО ФСУиР гр. R3435		
	Утв.								

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 (приложение А).

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

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

### 3 РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ СТЕНДА

#### 3.1 Бесконтактный моментный двигатель

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.

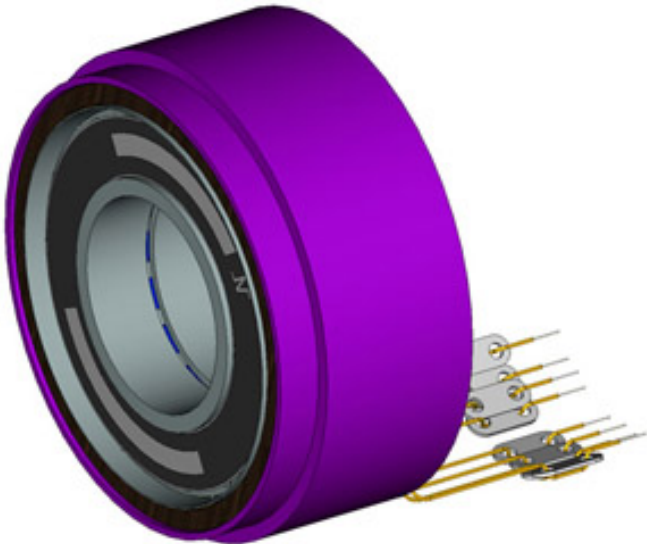


Рисунок 3.1 – Примерный внешний вид двигателя

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

						<div> <div>ФСУР.205.R3435.001 ПЗ</div> <div> <div>Лит.</div> <div>Лист</div> <div>Листов</div> </div> </div>		
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата				
Разраб.		Иванов В. А.			<div> <div>Разработка макета электропривода с бесконтактным моментным электродвигателем</div> <div> <div>Университет ИТМО</div> <div>ФСУР гр. R3435</div> </div> </div>		11	30
Пров.		Бойков В. И						
Н. контр.								
Утв.								

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

Подп. и дата									
Инв. № дубл.									
Взм. инв. №									
Подп. и дата									
Инв. № подл.	Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	<div style="text-align: center; font-weight: bold; font-size: 1.2em;"> ФСУиР.205.R3435.001 ПЗ </div>			
	Разраб.	Иванов В. А.							
	Пров.	Бойков В. И				Разработка макета электропривода с бесконтактным моментным электродвигателем	Лит.	Лист	Листов
								12	30
	Н. контр.						Университет ИТМО ФСУиР гр. R3435		
	Утв.								

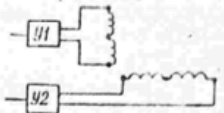
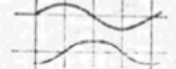
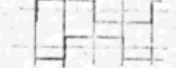
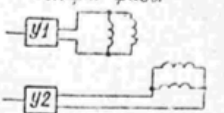

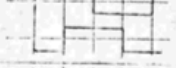
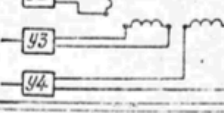
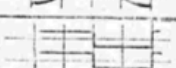

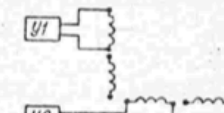
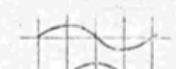
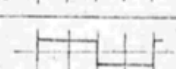
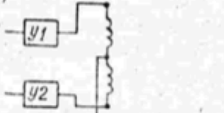
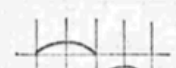
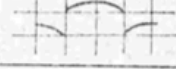
Тип обмотки	Схемы обмотки		$k_R$	$k_C$	$k_m$	$k_E$	$k_n$	$k_3$
	Схема соединения фаз(секций)	Циклограмма изменения фазных напряжений						
Двухфазная четырёхсекционная			2	1	1	1	1	1
			2	1	$\sqrt{2}$	0,785	0,9	2
			0,5	0,5	1	1	1	1
			0,5	0,5	$\sqrt{2}$	0,785	0,9	2
			1	0,5	2	1	1	2
			1	0,5	$2\sqrt{2}$	0,785	0,9	4
Двухфазная четырёхсекционная			1	0,5	1	1	1	1
			1	0,5	$\sqrt{2}$	0,785	0,9	2
			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]

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 вращения равной

Подп. и дата				
Инв. № дубл.				
Взам. инв. №				
Подп. и дата				
Инв. № подл.				
<div style="text-align: center; font-size: 1.2em; font-weight: bold;">ФСУР.205.R3435.001 ПЗ</div>				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
Разраб.		Иванов В. А.		
Пров.		Бойков В. И		
Н. контр.				
Утв.				
Разработка макета электропривода с бесконтактным моментным электродвигателем				
Лит.		Лист	Листов	
		13	30	
Университет ИТМО ФСУР гр. R3435				

Существуют и другие режимы работы двигателя, например, вентильный. Такой режим работы достигается установкой датчиков угла положения ротора. Чаще всего устанавливаются датчика Холла, это удобно, потому что вращающаяся часть двигателя - большой магнит, но также вполне возможно установить энкодер на ротор или даже реостат с полным поворотом. Суть режима работы заключается в переключении обмоток в зависимости от сигналов с датчиков. Вентильный режим работы напоминает работу обычных коллекторных ДПТ, но все таки есть большое отличие - коммутация обмоток происходит не механическим путем, а электрическим. Логично, что для реализации такого режима работы необходим микроконтроллер, либо же просто специальная электрическая схема. И то, и то нужно для обработки сигналов с датчиков и подачи напряжения на обмотки двигателя. Единственный минус такого режима работы - как раз таки необходимость применения электронных модулей, что зачастую довольно дорого.

*ΦCΥuP.205.R3435.001 Π3*

*Разработка макета  
электропривода с бесконтактным  
моментным электродвигателем*

Лит.	Лист	Листов
	14	30

Университет ИТМО  
ФСУиР гр. R3435

Этот режим работы набирает все большую популярность ввиду того, что вносит упрощение в конструкцию привода. Однако, в макете его использование невозможно по причине отсутствия возможности задания отрицательных напряжений на обмотках.

Следует отметить, 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.

В макете управление двигателем реализовано с помощью силовых ключей BTS3256. 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, что дает возможность создавать на обмотках нужные амплитуды напряжений. Каждая обмотка двигателя ДБМ одним проводом подключена к плюсу внешнего блока питания на 27 вольт. 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.

### 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.

Таблица 3.2 – Характеристики двигателя Д5-ТР

Длина, мм	112
-----------	-----

Инв. № подл.	Подп. и дата	Подп. и дата		Инв. № дубл.		Взм. инв. №		Подп. и дата																																																										
<p>ключена к плюсу внешнего блока питания на 27 вольт. 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.</p> <p><b>3.2 Нагрузочный двигатель постоянного тока</b></p> <p>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.</p> <p>Таблица 3.2 – Характеристики двигателя Д5-ТР</p> <table><tr><td colspan="8">Длина, мм</td><td colspan="2">112</td></tr></table>										Длина, мм								112																																																
Длина, мм								112																																																										
<table><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td colspan="5" rowspan="3"><i>ФСУиР.205.R3435.001 ПЗ</i></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td><i>Изм.</i></td><td><i>Лист</i></td><td><i>№ докум.</i></td><td><i>Подп.</i></td><td><i>Дата</i></td></tr><tr><td><i>Разраб.</i></td><td colspan="2"><i>Иванов В. А.</i></td><td></td><td></td><td colspan="5" rowspan="4"><i>Разработка макета электропривода с бесконтактным моментным электродвигателем</i></td><td><i>Лит.</i></td><td><i>Лист</i></td><td><i>Листов</i></td></tr><tr><td><i>Пров.</i></td><td colspan="2"><i>Бойков В. И</i></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>15</td><td>30</td></tr><tr><td><i>Н. контр.</i></td><td colspan="2"></td><td></td><td></td><td colspan="5" rowspan="2"><i>Университет ИТМО ФСУиР гр. R3435</i></td></tr><tr><td><i>Утв.</i></td><td colspan="2"></td><td></td><td></td></tr></table>															<i>ФСУиР.205.R3435.001 ПЗ</i>										<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>	<i>Разраб.</i>	<i>Иванов В. А.</i>				<i>Разработка макета электропривода с бесконтактным моментным электродвигателем</i>					<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>	<i>Пров.</i>	<i>Бойков В. И</i>						15	30	<i>Н. контр.</i>					<i>Университет ИТМО ФСУиР гр. R3435</i>					<i>Утв.</i>				
					<i>ФСУиР.205.R3435.001 ПЗ</i>																																																													
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>																																																														
<i>Разраб.</i>	<i>Иванов В. А.</i>				<i>Разработка макета электропривода с бесконтактным моментным электродвигателем</i>					<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>																																																						
<i>Пров.</i>	<i>Бойков В. И</i>											15	30																																																					
<i>Н. контр.</i>										<i>Университет ИТМО ФСУиР гр. R3435</i>																																																								
<i>Утв.</i>																																																																		







Рисунок 3.3 – Двигатель Д5-ТР

- 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, далее это напряжение усиливается с помощью операционного усилителя и так же подается на вход АЦП микроконтроллера.

Датчик угла положения ротора служит для, очевидно, определения угла положения ротора. В качестве этого датчика был выбран сдвоенный реостат

Инв. № подл.	Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	<p style="text-align: center;"><b>ФСУиР.205.R3435.001 ПЗ</b></p> <p style="text-align: center;">Разработка макета электропривода с бесконтактным моментным электродвигателем</p>	Лит.	Лист	Листов
								17	30
	Разраб.	Иванов В. А.				<p style="text-align: center;">Университет ИТМО ФСУиР гр. R3435</p>			
	Пров.	Бойков В. И							
	Н. контр.								
	Утв.								

<i>и дата</i>	<i>Взам. инв. №</i>	<i>Инв. № дубл.</i>	<i>Подп. и дата</i>

Взам. инв. №	Инв. № дубл.

Инв. № подл.	Подп. и дата

					<i>ФСУиР.205.R3435.001 ПЗ</i>										
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>	<i>Разработка макета электропривода с бесконтактным моментным электродвигателем</i>						<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>		
<i>Разраб.</i>	<i>Иванов В. А.</i>													<i>18</i>	<i>30</i>
<i>Пров.</i>	<i>Бойков В. И</i>														
<i>Н. контр.</i>															
<i>Утв.</i>											<i>Университет ИТМО ФСУиР гр. R3435</i>				

этого микроконтроллера (рисунок 3.4). 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.

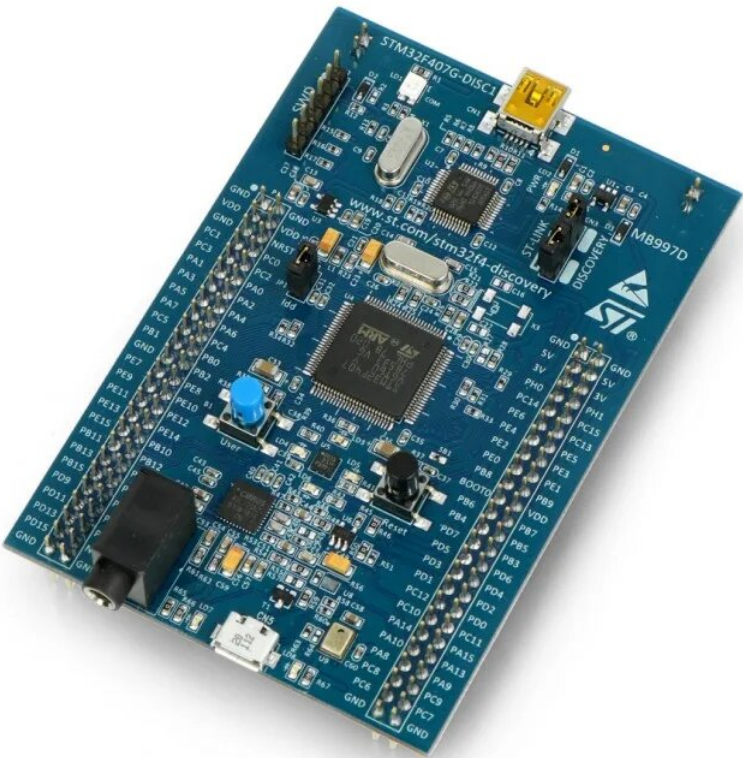


Рисунок 3.4 – Внешний вид отладочной платы

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.

Подп. и дата									
Инв. № дубл.									
Взам. инв. №									
Подп. и дата									
Инв. № подл.					ФСУиР.205.R3435.001 ПЗ				
	Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Разработка макета электропривода с бесконтактным моментным электродвигателем	Лит.	Лист	Листов
	Разраб.	Иванов В. А.						19	30
	Пров.	Бойков В. И							
	Н. контр.								
	Утв.								
							Университет ИТМО ФСУиР гр. R3435		



Рисунок 3.4 – 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.

### 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 приложении Б.

Сама плата выполнена из двухстороннего фольгированного текстолита, чертеж платы представлен в приложении В.

### 3.6 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 сдвоенный потенциометр СП4-8. 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,

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

[illegible]

## 4 РАЗРАБОТКА СТРУКТУРНОЙ СХЕМЫ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

...

[illegible]

## 5 СИНТЕЗ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДВИГАТЕЛЕМ

...

[illegible]

## 6 РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

...

[illegible]



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

...

[illegible]

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Примеры применения. — ОАО "МАШИНОАППАРАТ", 2015. — Обращение: 10.04.2021. <http://mashap.maverick.ru/>.
2. *Беленький Ю. М., Микеров А. Г.* Бесконтактный моментный привод для многофункциональных систем автоматического управления. — Москва : Энергоатомиздат, 1991.

[illegible]

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

[illegible]



## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

# схема

Инв. № подл.	Подп. и дата				Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата		
					ФСУиР.205.R3435.001 ПЗ				
	Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата				
	Разраб.	Иванов В. А.				Разработка макета электропривода с бесконтактным моментным электродвигателем	Лит.	Лист	Листов
	Пров.	Бойков В. И						29	30
							Университет ИТМО ФСУиР гр. R3435		
	Н. контр.								
	Утв.								

## ПРИЛОЖЕНИЕ В

плата

[illegible]