## СОДЕРЖАНИЕ

	СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ 2										
	ВВЕДЕНИЕ										
	1 ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ УЧЕБНЫХ СТЕНДОВ НА БАЗЕ										
	БЕСКОЛЛЕКТОРНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ										
	1.1 Типовой комплект учебного оборудования «Вентильный										
	двигатель»										
	1.2 Стенд SkyRC Extreme BMC-01 для проверки бесколлек-										
	торных двигателей										
	1.3 Типовой комплект учебного оборудования «Микропро-										
	цессорная система управления вентильным двигателем",										
	исполнение моноблочное с ноутбуком»										
	2 РАЗРАБОТКА ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ СХЕМЫ СТЕНДА 9										
	3 РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ СТЕНДА										
	3.1 Бесконтактный моментный двигатель										
	3.2 Нагрузочный двигатель постоянного тока										
	3.3 Измерительные устройства										
ma	3.4 Микроконтроллер										
. u да	3.5 Модуль управления										
Подп. и дата	3.6 Описание конструкции										
	4 РАЗРАБОТКА СТРУКТУРНОЙ СХЕМЫ СИСТЕМЫ УПРАВ-										
ю.	ЛЕНИЯ 22										
	5 СИНТЕЗ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДВИГАТЕЛЕМ 23										
Инв. № ду	6 РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ										
_	ЗАКЛЮЧЕНИЕ										
Взам. инв. №	СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ										
ам. п	ПРИЛОЖЕНИЕ А										
B3(	ПРИЛОЖЕНИЕ Б										
	ПРИЛОЖЕНИЕ В										
дата											
Подп. и дата	<del>                                     </del>										
По	$\Phi C Yu P. 205. R3435.001 \Pi 3$										
_	Изм. Лист № докум. Подп. Дата Разраб. Иванов В. А. Лист Лист Лист	moo									
подл.	Пров. Бойков В. И Разработка макета 1 3	тов 10									
Инв. № подл.	электропривода с бесконтактным Н. контр. имоментным электродвигателем Университет ИТМ ФСУиР гр. R3435										
$\overline{I}$	Voyamosar Aonu										

### 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

Подп. и дата									
Инв. № дубл.									
Взам. инв. №									
Подп. и дата				Γ					
ПС	11	Лист	MG 2	Подп.	Дата	ФСУиР.205.R3435	5.001	П3	
Н	изм. <sub>.</sub> Разр		№ докум. Иванов В. А.	1100n.	дата		Лит.	Лист	Листов
юди	 Пров		Бойков В. И			Разработка макета		2	30
Инв. № подл.	 Н. ко Утв.	энтр.				электропривода с бесконтактным моментным электродвигателем		ерситет ГУиР гр.	
				-	<b>-</b>	Копировал	-		Формат А4

#### **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;

Подп. и дата

Инв. № дубл.

- системах автоматического управления, работающих в особо тяжелых условиях эксплуатации;
  - исполнительных системах управления роботов и манипуляторов;
- сфере медицинского приборостроения потому что к медицинской

.46.		– сфере медицинского приооростроения, потому что к медицинской													
Взам. инв.			тех	нике пред	ъявляю	тся г	овышенные требования к уров	ню шу	ма, урс	овню					
Вза			ПУЛ	ьсаций вра	ащаюц	цего м	омента и другим подобным хара	актерис	стикам;						
Подп. и дата				– бытон	вых тоі	варах,	например, стиральные машины								
Подп. и	F						ФСУиР.205.R3435								
	7	Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	1 00 11 12 00 11 10 700	.001	113						
л.		Разр	аб.	Иванов В. А.				Лит.	Лист	Листов					
под		Пров	3.	Бойков В. И			Разработка макета		3	30					
$\sqrt{o}$							электропривода с бесконтактным	Viiia	верситеп	1 ИТМО					
Инв. № подл.	1	Н. ка	энтр.				моментным электродвигателем		СУиР гр.						
I		Утв.													
							Копировал			Формат А4					

- 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, схемотехчнические 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				Ι	1 1				
По						ФСУиР.205.R3435	5 001	$\Pi 3$	
	Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	1 00 111.200.110 700	.001		
Эл.	Разр		Иванов В. А.			D	Лит.	Лист	Листов
пос	Пров	3.	Бойков В. И			Разработка макета		4	30
Инв. № подл.	Н. ка Утв.	онтр.				электропривода с бесконтактным моментным электродвигателем		ерситеп ГУиР гр.	
						Копировал			Формат А4

### 1 ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ УЧЕБНЫХ СТЕНДОВ НА БАЗЕ БЕСКОЛЛЕКТОРНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

1.1 Типовой комплект учебного оборудования «Вентильный двигатель»



Рисунок 1.1 – Внешний вид комплекта

Подп. и дата

Инв. № дубл.

Взам. инв. №

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: дви-

. и дата	Подп. и дата						нагрузочный двигатель, осцилов добавлен даже стол.	граф. В	компл	екта-
Подп.		Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	ФСУиР.205.R3435	П3		
Л.		Разраб.		Иванов В. А.				Лит.	Лист	Листов
подл.		Про	в.	Бойков В. И			Разработка макета		5	30
Инв. № 1		Н. контр. Утв.					электропривода с бесконтактным Университе моментным электродвигателем ФСУиР гр			
							Копировал			Формат А4

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. Дальше осцилографа 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



Подп. и дата

Инв. № дубл.

ім. инв. №

Рисунок 1.2 – Внешний вид прибора

Этот прибор является высокоточным электронное устройством специально разработанное для проверки бесколлекторных электромоторов. Он мо-

. и дата <i>Вза</i>		же	г измерять – оборс				r	r			
Подп.	Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	ФСУиР.205.R3435.001 ПЗ					
<i>n</i> .	Разр	аб.	Иванов В. А.				Лит.	Лист	Листов		
под.	Про	в.	Бойков В. И			Разработка макета		6	30		
Инв. № подл.	Пров. Н. контр. Утв.					электропривода с бесконтактным моментным электродвигателем	1	ерситеп ЗУиР гр.			
						Копировал	•		Формат А4		

- обороты на вольт;
- ток,

Подп. и дата

Инв. № дубл.

Взам. инв. №

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.

### 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 реали-

. и дата		308	ана микро	процес	сорна	я система управления вентильн	oim əjiçi	продви	1416-
. Подп.	ФСУиР.205.R3435.001 I								
7.	Разраб. Иванов В. А.						Лит.	Лист	Листов
подл.	Про	в.	Бойков В. И			Разработка макета		7	30
Инв. № п	H. контр. Утв.					электропривода с бесконтактным моментным электродвигателем	Университет И ФСУиР гр. R3-		
						Копировал			Формат А4

лем. Функционально стенд состоит из двух частей – бесколлекторный двигатель и микроконтроллер AVR.

Из недостатков этого комплекта можно отметить, опять же, выскокую 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.

Подп. и дата							
Инв. № дубл.							
Взам. инв. №							
Подп. и дата						ФСУиР.205.R3435	5 001 Π3
		Изм. Лист	№ докум.	Подп.	Дата	ΨC3 u1 .203.R3433	.001 113
Эл.		Разраб.	Иванов В. А.			D ć	Лит. Лист Листов
Инв. № подл.	-	Пров.	Бойков В. И			Разработка макета электропривода с бесконтактным	8 30
16. M		Н. контр.				электропривоой с оесконтактным моментным электродвигателем	Университет ИТМО
Ин		Утв.				The second secon	ФСУиР гр. R3435
			•	•		Копировал	Формат А4

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 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 напряжение, 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.

Подп. и дата

Инв. № дубл.

Взам. инв. №

Это стало возможным благодаря установке определенных датчиков. Каждый из этих датчиков должен осуществлять отправку данных на какоелибо 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 ком	ианд уг	іравло	ения. При этом на микроконтрол	лер так	же лож	ится		
		ещ	е одна нема	аловаж	ная з	адача - управление драйвером дл	ія двига	ателя.				
		Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	ФСУиР.205.R3435.001 ПЗ					
л.		Разр	аб.	Иванов В. А.				Лит.	Лист	Листов		
под.		Про	3.	Бойков В. И			Разработка макета		9	30		
Инв. № подл.		H. контр. Утв.					1  MOMOLIMILLIM OROLUMDOOOLOMOROM 1		ерситет УиР гр. 1			
							Копировал			Формат А4		

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).

Подп. и дата										
Инв. № дубл.										
Взам. инв. №										
Подп. и дата							ФСУиР.205.R3435	 5 001	П3	
	ŀ	Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	ФСЭИ1.203.1(3+33	.001		
Эл.		Разр		Иванов В. А.			Por most and	Лит.	Лист	Листов
ou ō	ŀ	Пров	3.	Бойков В. И			Разработка макета электропривода с бесконтактным		10	30
Инв. № подл.			онтр.				электропривоой с оесконтактным моментным электродвигателем		ерситет УиР гр.	
7		Утв.			I	1 1		I	1	

#### 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.

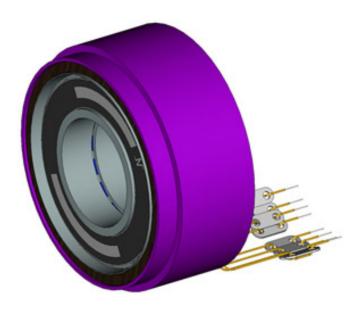


Рисунок 3.1 – Примерный внешний вид двигателя

Таблица 3.1 - Xарактеристики двигателя ДБМ 63 - 0.06 - 3 - 2

Подп. и дата

Взам. инв. №

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,	2700-3400		
об/мин			
Материал магнитов	Самарий-Кобальт		

	06	5/мин								
	M	атериал ма	пгнитон	3		Самарий-Кобальт				
		<u> </u>	<u> </u>	1 1						
					$\Phi C Yu P. 205. R343.$	5 001	П3			
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	ФС3 W1.203.11343.	J.001	115			
Разр	аб.	Иванов В. А.				Лит.	Лист	Листов		
Пров	3.	Бойков В. И			Разработка макета		11	30		
Н. ка	онтр.				электропривода с бесконтактным моментным электродвигателем		верситеп СУиР гр.			
Утв					Vonumonar			Формат 11		

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.

Подп. и дата

Инв. № дубл.

Взам. инв. №

Подп. и дата

Інв. № подл.

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 булет работать

	ЛЮ	бую обмот	ку втор	оой фа	азы сигнала косинуса. Так двигат	гель буд	цет рабо	этать	
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	ФСУиР.205.R3435	5.001	П3		
Разр	раб.	Иванов В. А.				Лит.	Лист	Листов	
Про	в.	Бойков В. И			Разработка макета		12	30	
H. контр. Утв.					электропривода с бесконтактным моментным электродвигателем	Университет ИТМО ФСУиР гр. R3435			
					Vommogan			Фопцат 11	

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

Подп. и дата

№ дубл.

Инв. .

инв. №

Взам. 1

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

n														
Подп.		Изм. Лист	№ докум.	Подп.	Дата	ФСУиР.205.R3435.001 ПЗ								
7.	_	Разраб.	Иванов В. А.		,		Лит.	Лист	Листов					
под	. № nodл	Пров.	Бойков В. И			Разработка макета		13	30					
$\sqrt{o} \! \! \! \! \! \! \! \! \! \! \! \! \! \! \! \! \! \! \!$				электропривода с бесконтактным моментным электродвигателем	Университет ИТМО ФСУиР гр. R3435									
И		Утв.					Ψ	зиг ср.	113433					

частоте сигналов, поэтому нужно позаботиться о плавном разгоне. Огромный плюс синхронных машин заключается в том, что они не теряют обороты при любых значениях момента ниже максимального. Здесь же кроется и минус - при превышении значения максимального момента двигатель 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 режима работы. Такой режим работы подходит для приводов, где нет работы с большими нагрузками. Однако, без механизма корректного запуска все равно не обойтись.

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.

Подп. и дата

Инв. № дубл.

Взам. инв. №

Подп. и дата

Инв. № подл.

Еще один интересный режим работы - бездатчиковый. На рисунке 3.2 способ коммутации с питанием одной секции фазы на самом деле не так прост. При вращении ротора двигателя в незапитанных 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.

2			112 62	-1, 11001j 1 <b>00</b>	1011, 11	0.01	winding dar inn monoxemini porop			, , , , , , , , , , , , , , , , , , , ,				
110011	+ +	ФСУ Изм. Лист № докум. Подп. Дата						ФСУиР.205.R3435	ФСУиР.205.R3435.001 ПЗ					
<u>.</u> T		Разр	раб.	Иванов В. А.				Лит.	Лист	Листов				
3		Про	ров. Бойков В. И				Разработка макета		14	30				
1110.0111	Н. конт Утв.		Г. контр. ′тв.				электропривода с бесконтактным моментным электродвигателем	Университет I ФСУиР гр. R3						

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

Подп. и дата

Инв. № дубл.

Взам. инв. №

Подп. и дата

Инв. № подл.

Длина, мм

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	ФСУиР.205.R3435	5.001	П3	
Разр	аб.	Иванов В. А.				Лит.	Лист	Листов
Про	3.	Бойков В. И			Разработка макета		15	30
H. ко	онтр.				электропривода с бесконтактным моментным электродвигателем		Университет И ФСУиР гр. R3	

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. А нужно это для того, чтобы поворотом двигателя в подшипнике воздействовать на тензометрический датчик и таким образом измерять момент.

Управление двигателем реализовано с помощью самого простого силового ключа [какого?]. Было решено не предусматривать даже возможность реверса двигателя, так как она просто не нужна ввиду того, что имеется возможность реверса двигателя ДБМ. По-умолчанию напряжение на двигатель поступает так же, от блока питания, однако предусмотрена возможность питания двигателя от другого источника.

Для установки на стенд из двигателя был удален тормоз, иначе бы пришлось всякий раз запитывать двигатель, чтобы встроенная электромуфта отключала тормоз.

#### 3.3 Измерительные устройства

Подп. и дата

Инв. № дубл.

Взам. инв. №

Для измерения различных параметров двигателя ДБМ на стенде преду-

F				, ,		1			, · .					
. и дата	z   $ $													
Подп.		Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	ФСУиР.205.R3435	5.001	П3					
л.		Разр	раб.	Иванов В. А.				Лит.	Лист	Листов				
под		Про	в.	Бойков В. И			Разработка макета		16	30				
Инв. № подл.		Н. контр. Утв.					$\mathbf{I} = \mathbf{M} \mathbf{O} \mathbf{M} \mathbf{O} \mathbf{I} \mathbf{I} \mathbf{M} \mathbf{I} \mathbf{I} \mathbf{I} \mathbf{M} \mathbf{D} \mathbf{O} \mathbf{I} \mathbf{I} \mathbf{M} \mathbf{D} \mathbf{O} \mathbf{O} \mathbf{I} \mathbf{I} \mathbf{O} \mathbf{M} \mathbf{O} \mathbf{O} \mathbf{M} \mathbf{O} \mathbf{I} \mathbf{O} \mathbf{M} \mathbf{O} \mathbf{I} \mathbf{O} \mathbf{M} \mathbf{O} \mathbf{I} \mathbf{O} \mathbf{M} \mathbf{O} \mathbf{O} \mathbf{O} \mathbf{O} \mathbf{O} \mathbf{O} \mathbf{O} O$		Университет ИТМО ФСУиР гр. R3435					
							Копировал			Формат А4				



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

					ФСУиР.205.R3435	5.001	' ПЗ	
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата				
Разра	аб.	Иванов В. А.				Лит.	Лист	Листов
Пров		Бойков В. И		Разработка макета		17	30	
Н. контр.					электропривода с бесконтактным моментным электродвигателем	Университет ИТЛ		
Утв.	ттр.					$\Phi$ СУи $P$ г $p$ .		R3435

СП4-8 номиналом 10 кОм. Такой реостат рассчитан на 10 000 000 оборотов с максимальной частотой 600 оборотов в минуту. Классический реостат при правильном подключении представляет из себя делитель напряжения. В макете используется такой вариант подключения, напряжение с делителя подается на АЦП микроконтроллера. Используются два канала. При равномерном повороте на АЦП будут регистрироваться два пилообразных сигнала с некоторым заранее заданным смещением по фазе, которое будет совпадать с величиной угла смещения между двумя реостатами. Такой механизм необходим для устранения наличия нулевой точки одного реостата, когда сопротивление резко меняется с максимального на минимальное или наоборот.

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 измерителе 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

Подп. и дата

Инв. № дубл.

Взам. инв. №		Silu	3.4 Ми	крокої	нтрол	лер тельного модуля для стенда был	выбра	н микр	окон-
ı. и дата		трс				6, а точнее специальная отладоч	•	•	
Подп.	Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	ФСУиР.205.R3435	5.001	П3	
Эл.	Разр		Иванов В. А.			D. C	Лит.	Лист	Листов
подл.	Про	в.	Бойков В. И			Разработка макета		18	30
$И$ н $\epsilon$ . $N$ $\hat{\epsilon}$	H. контр. Утв.					электропривода с бесконтактным моментным электродвигателем	1	ерситет ГУиР гр.	
			-			Копировал			Формат А4

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.



Подп. и дата

Инв. № дубл.

Взам. инв. №

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.

. и дата			ВП	акеты МАТ	ΓLAB 1	ı Sim	ulink благодаря библиотеке STM	132-M <i>F</i>	AT/TAR	GET.
Подп.		Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	ФСУиР.205.R3435	5.001	П3	
η.		Разр	аб.	Иванов В. А.				Лит.	Лист	Листов
nod.		Пров	3.	Бойков В. И			Разработка макета		19	30
Инв. № подл.		H. контр. Утв.					электропривода с бесконтактным моментным электродвигателем	Университет ИТГ ФСУиР гр. R343		
				•			Vonumoogr			Фотили 11

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

Подп. и дата

Инв. № дубл.

Взам. инв. №

Подп. и дата

ів. № подл.

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 про-

1	кру	чивается.	Затем,	при і	тодаче напряжения на нагрузочн	ный дв	игатель	, его
	рот	сор начина	ет врац	цаться	и либо в том же направлении, что	о и дви	гатель )	ДБМ,
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	ФСУиР.205.R3435	5.001	П3	
Разр	аб.	Иванов В. А.				Лит.	Лист	Листов
Пров	3.	Бойков В. И			Разработка макета		20	30
H. контр. Утв.					электропривода с бесконтактным моментным электродвигателем		п ИТМО R3435	
			-		Копировал			Формат А4

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.

П						
Подп. и дата						
Инв. № дубл.						
Взам. инв. №						
Подп. и дата					ACW D 205 D 2425	. 001 172
	Изм. Лист	№ докум.	Подп.	Дата	ФСУиР.205.R3435	0.001 113
подл.	Разраб. Пров.	Иванов В. А. Бойков В. И		, ,	Разработка макета	Лит. Лист Листов   21 30
Инв. № подл.	 Н. контр.				электропривода с бесконтактным моментным электродвигателем	Университет ИТМО ФСУиР гр. R3435
	Утв.				Копировал	— Формат A4

## 4 РАЗРАБОТКА СТРУКТУРНОЙ СХЕМЫ СИСТЕМЫ УПРАВ-ЛЕНИЯ

. . .

Подп. и дата										
Инв. № дубл.										
Взам. инв. №										
Подп. и дата	_	<u> </u>					ФСУиР.205.R3435	5.001	П3	
	7	Изм. Ла	ист	№ докум.	Подп.	Дата		.001		
л.		Разраб	í	Иванов В. А.				Лит.	Лист	Листов
под.		Пров.		Бойков В. И			Разработка макета		22	30
ν̄ο							электропривода с бесконтактным	Vина	верситет	итмо
Инв. № подл.		Н. конг	np.				моментным электродвигателем	$\phi($	СУиР гр	R3435
I		Утв.								
							Копировал			Формат А4

# 5 СИНТЕЗ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДВИГАТЕЛЕМ ФСУиР.205.R3435.001 ПЗ Изм. Лист № докум. Подп. Дата Лит. Лист Листов Разраб. Иванов В. А. Разработка макета 23 Пров. Бойков В. И электропривода с бесконтактным Университет ИТМО моментным электродвигателем Н. контр. ФСУиР гр. R3435 Утв.

Подп. и дата

Инв. № дубл.

Взам. инв. №

Подп. и дата

Инв. № подл.

# 6 РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ФСУиР.205.R3435.001 ПЗ Изм. Лист № докум. Подп. Дата Лит. Лист Листов Разраб. Иванов В. А. Разработка макета 24 Пров. Бойков В. И электропривода с бесконтактным Университет ИТМО моментным электродвигателем Н. контр. ФСУиР гр. R3435 Утв.

Подп. и дата

Инв. № дубл.

Взам. инв. №

Подп. и дата

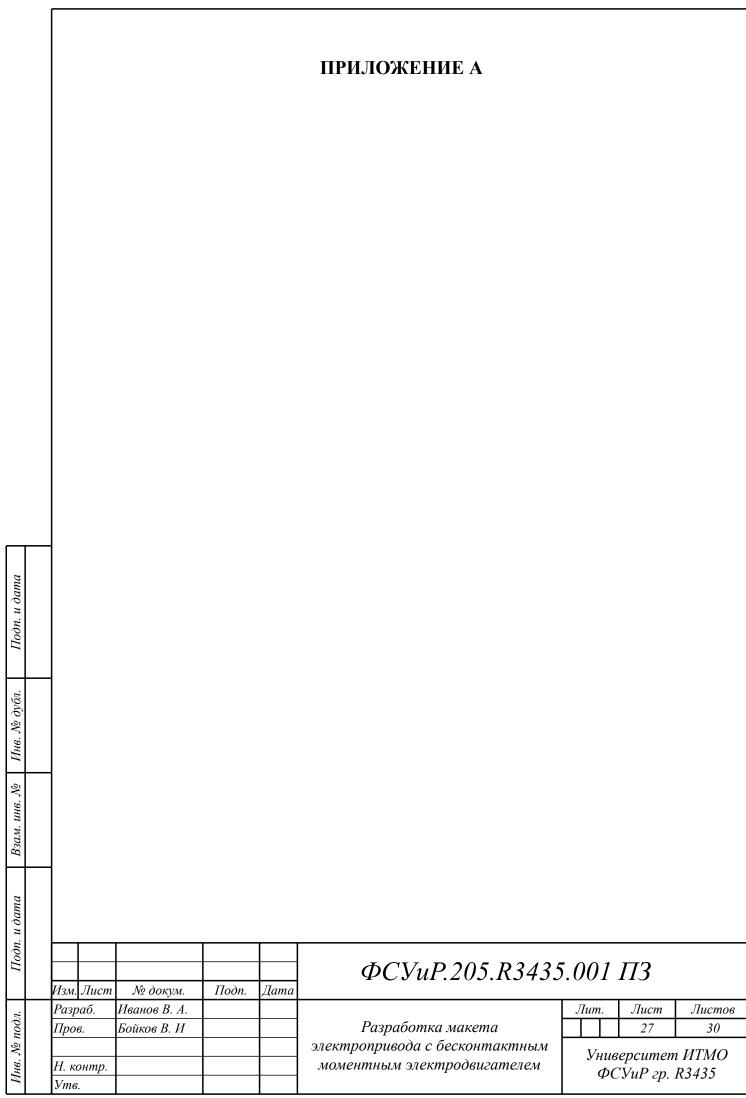
Инв. № подл.

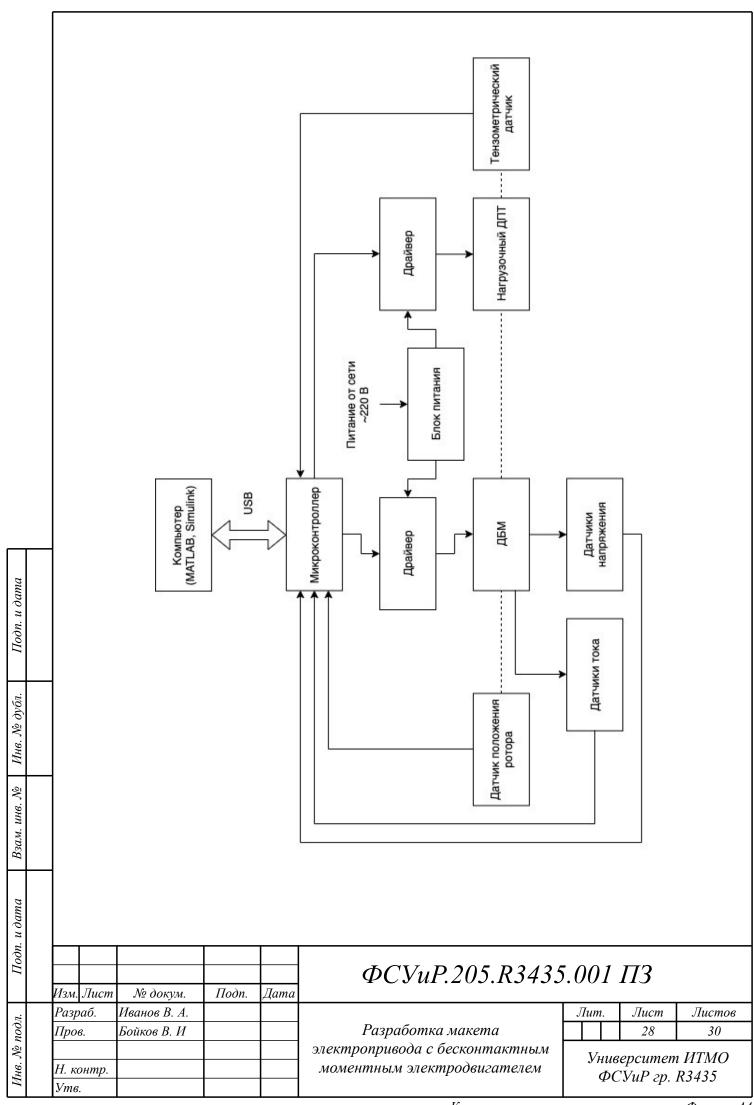
# **ЗАКЛЮЧЕНИЕ** Подп. и дата Инв. № дубл. Взам. инв. № Подп. и дата ФСУиР.205.R3435.001 ПЗ Изм. Лист № докум. Подп. Дата Лит. Лист Листов Разраб. Иванов В. А. Инв. № подл. Разработка макета 25 Пров. Бойков В. И электропривода с бесконтактным Университет ИТМО моментным электродвигателем Н. контр. ФСУиР гр. R3435 Утв.

#### 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.

В   В   В   В   В   В   В   В   В   В	Подп. и дата										
Paspa б. Иванов В. А.   Paspa ботка макета   Jum. Лист   Лист   Листов   Доборов В. И   Разра ботка макета   Jum. Лист   Листов   Доборов В. И   Разра ботка макета   Jum. Лист   Листов   Доборов В. И   Разра ботка макета   Jum. Лист   Листов   Доборов В. И   Разра ботка макета   Jum. Лист   Листов   Доборов В. И   Разра ботка макета   Jum. Лист   Листов   Доборов В. И   Добо	Инв. № дубл.										
Изм. Лист № докум. Подп. Дата   Разраб. Иванов В. А. Пров. Бойков В. И Разработка макета Лит. Лит. Лист Вистов   Электропривода с бесконтактным моментным электродвигателем Университет ИТМО ФСУиР гр. R3435	Взам. инв. №										
Изм. Лист № докум. Подп. Дата   Разраб. Иванов В. А. Пров. Бойков В. И Разработка макета Лит. Лит. Листов   Электропривода с бесконтактным моментным электродвигателем Университет ИТМО ФСУиР гр. R3435	Подп. и дата							ФСV., D 205 D 2425	5 001	пэ	
Разраб. Иванов В. А. Разработка макета Лит. Лит. Лист Листов   Пров. Бойков В. И Разработка макета 26 30   Электропривода с бесконтактным моментным электродвигателем Университет ИТМО ФСУиР гр. R3435			Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	ΨCyur.203.R3433	0.001	113	
утв.	è подл.		Разраб.		Иванов В. А.			D 6	Лит.		
yms.			Пров.		Бойков В. И			26 30			
yms.	Інв. №										
Volume of grant and the state of the state o	$\bigsqcup_{I}$		Утв.					Копировал			Формат A4





# приложение Б схема ФСУиР.205.R3435.001 ПЗ Изм. Лист № докум. Подп. Дата Лит. Лист Листов Разраб. Иванов В. А. Разработка макета 29 Пров. Бойков В. И электропривода с бесконтактным Университет ИТМО моментным электродвигателем Н. контр. ФСУиР гр. R3435 Утв.

Инв. № дубл.

Взам. инв. №

Подп. и дата

Инв. № подл.

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