

## 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 бесколлек- торных двигателей . . . . .	10
1.3 Типовой комплект учебного оборудования «Микропро- цессорная 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 . . . . .	21
3.5 Модуль управления . . . . .	22
3.6 Блок питания . . . . .	23
3.7 Описание конструкции . . . . .	23
4 РАЗРАБОТКА СТРУКТУРНОЙ СХЕМЫ СИСТЕМЫ УПРАВ- ЛЕНИЯ . . . . .	25
5 СИНТЕЗ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДВИГАТЕЛЕМ . . . . .	26
6 РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ . . . . .	27
ЗАКЛЮЧЕНИЕ . . . . .	28
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ . . . . .	29
ПРИЛОЖЕНИЕ А . . . . .	30
ПРИЛОЖЕНИЕ Б . . . . .	31

Подп. и дата		3.3	Измерительные устройства . . . . .	20
		3.4	Микроконтроллер . . . . .	21
		3.5	Модуль управления . . . . .	22
		3.6	Блок питания . . . . .	23
		3.7	Описание конструкции . . . . .	23
Инв. № дубл.		4	РАЗРАБОТКА СТРУКТУРНОЙ СХЕМЫ СИСТЕМЫ УПРАВ- ЛЕНИЯ . . . . .	25
		5	СИНТЕЗ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДВИГАТЕЛЕМ . . . . .	26
		6	РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ . . . . .	27
Взм. инв. №		ЗАКЛЮЧЕНИЕ . . . . .		28
		СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ . . . . .		29
		ПРИЛОЖЕНИЕ А . . . . .		30
		ПРИЛОЖЕНИЕ Б . . . . .		31

					ФСУиР.205.R3435.001 ПЗ					
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата						
Разраб.		Иванов В. А.			Разработка макета электропривода с бесконтактным моментным электродвигателем					
Пров.		Бойков В. И								
Н. контр.					Университет ИТМО ФСУиР гр. R3435					
Утв.										
					Лит.		Лист		Листов	
							4		32	

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

# ГЛОНАСС - Глобальная навигационная спутниковая система

## ДБМ - Двигатель бесконтактный моментный

ДПТ - Двигатель постоянного тока

МДС - Магнитодвижущая сила

ПК - Персональный компьютер

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					
								Изм. Лист № докум. Подп. Дата				
					ФСУиР.205.R3435.001 ПЗ			Лист				
								8				

# 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 только познание теории, но и получение практических навыков. Фактически же

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

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;
- 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.

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата	<div></div> <p>Рисунок 1.2 – Внешний вид прибора</p> <p>Этот прибор является высокоточным электронное устройством специально разработанное для проверки бесколлекторных электромоторов. Он может измерять такие значения как:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>– обороты в минуту;</li><li>– обороты на вольт;</li><li>– ток,</li></ul> <p>а также, проверять функционирование датчика Холла (для датчиковых моторов). Стенд оснащён жидкокристаллическим дисплеем 2х16 знаков, который отображает в режиме реального времени измерения значений.</p>						
										ФСУиР.205.R3435.001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата							10

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	Взм. 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

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

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 (приложение А).

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата	ФСУиР.205.R3435.001 ПЗ					Лист
										13
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата						

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

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.

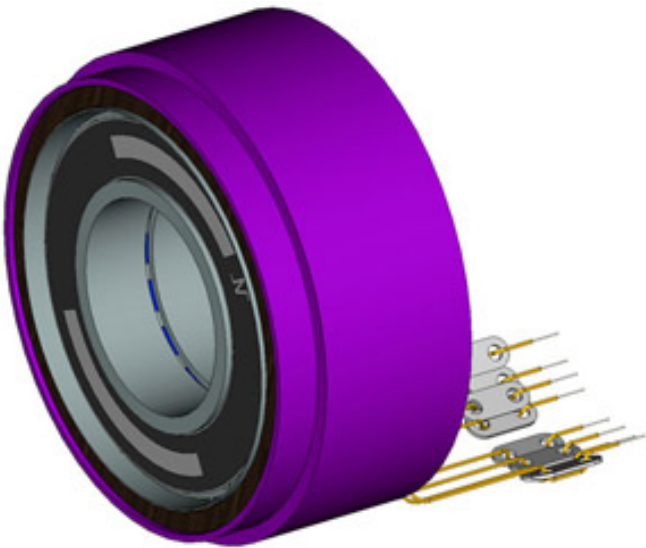


Рисунок 3.1 – Примерный внешний вид двигателя

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

Принцип работы двигателя заключается в создании вращающего момента путем взаимодействия электромагнитного поля статора и магнитного поля ротора. Вращение поля статора осуществляется переключением обмо-

ток 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 вращения равной частоте сигналов, поэтому нужно позаботиться о плавном раз-

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 (вспомог. схема)		2	1	1	1	1	1
			2	1	$\sqrt{2}$	0,785	0,9	2
	Параллельное соединение секций фазы		0,5	0,5	1	1	1	1
			0,5	0,5	$\sqrt{2}$	0,785	0,9	2
	Раздельное (автономное) пи- тание секций фазы		1	0,5	2	1	1	2
			1	0,5	$2\sqrt{2}$	0,785	0,9	4
Двухфазная четырёхсекционная	Питание одной секции фазы		1	0,5	1	1	1	1
			1	0,5	$\sqrt{2}$	0,785	0,9	2
	Соединение в звезду с общим проводом		1	0,5	1	1	1	1
			1	0,5	$\sqrt{2}$	0,785*	0,9	2

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

гоне. 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 двигателя 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, например, вентиляторы. Однако, без механизма корректного запуска все равно не обойтись. В рассмотренном режиме работы

Ине. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Ине. № дубл.	Подп. и дата
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
ФСУиР.205.R3435.001 ПЗ				
				Лист
				16
Копировал				Формат А4

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. 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. Данный метод управления набирает все большую популярность

Формат А4

ввиду того, что вносит 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 [Инжреш].

В макете использование данного способа управления невозможно по причине отсутствия возможности задания отрицательных амплитуд напряжений на обмотках.

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

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

ФСУиР.205.R3435.001 ПЗ



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

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

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;

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взм. инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата	<div>ФСУиР.205.R3435.001 ПЗ</div>					<div>Лист</div> <div>20</div>	
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата							

– Программируемое начальное положение.

Принцип работы 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.

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 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

Подп. и дата		Инв. № дубл.		Взам. инв. №		Подп. и дата		Инв. № подл.	
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	ФСУиР.205.R3435.001 ПЗ				Лист
									21

микроконтроллера разведены в 2 пятидесятипиновых разъема для быстрого и удобного прототипирования.

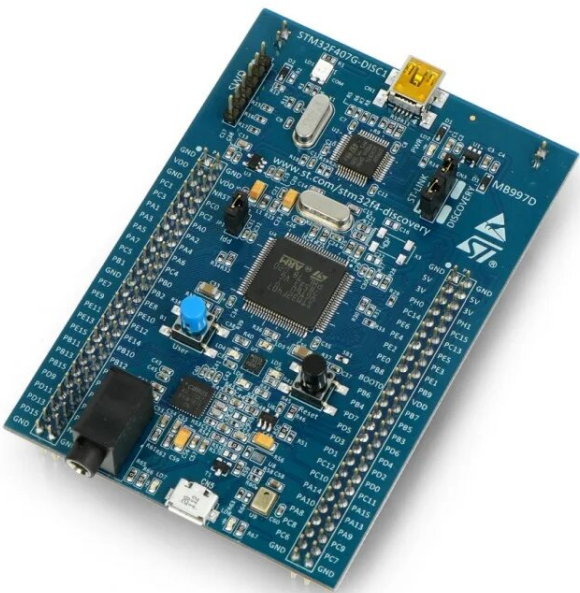


Рисунок 3.4 – Внешний вид отладочной платы

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. 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.

Инв. № подл.	Подп. и дата				Лист	
	Инв. № дубл.					22
	Взам. инв. №					
	Подп. и дата					
<p>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.</p>						
<p><b>3.5 Модуль управления</b></p>						
<p>Модуль управления представляет из себя печатную плату с коннектором для отладочной платы, необходимыми разъемами и другой электроникой.</p>						
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		

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 одностороннего фольгированного текстолита, чертеж платы представлен в приложении В.

3.6 Блок питания

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

Таблица 3.3 – Характеристики блока питания

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

3.7 Описание конструкции

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

С выключенным питанием ротор нагрузочного двигателя свободно прокручивается. Затем, при подаче напряжения на нагрузочный двигатель, его ротор начинает вращаться либо в том же направлении, что и двигатель ДБМ, либо в обратном. Таким образом происходит либо дополнительный разгон, либо сопротивление вращению соответственно. Это позволяет исследовать

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата	ФСУиР.205.R3435.001 ПЗ					Лист
										23
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата						

работу двигателя ДБМ под нагрузкой, а также работу в условиях, близких к идеальным с точки зрения трения.

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата	ФСУиР.205.R3435.001 ПЗ					Лист
										24
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата						

4 РАЗРАБОТКА СТРУКТУРНОЙ СХЕМЫ СИСТЕМЫ УПРАВ-  
ЛЕНИЯ

...

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

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

ФСУиР.205.R3435.001 ПЗ

Лист
25

## 5 СИНТЕЗ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДВИГАТЕЛЕМ

...

Инв. № подл.		Подп. и дата		Взам. инв. №		Инв. № дубл.		Подп. и дата		ФСУиР.205.R3435.001 ПЗ					Лист
															26
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата											

6 РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

...

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата	ФСУиР.205.R3435.001 ПЗ					Лист
										27
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата						



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

...

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

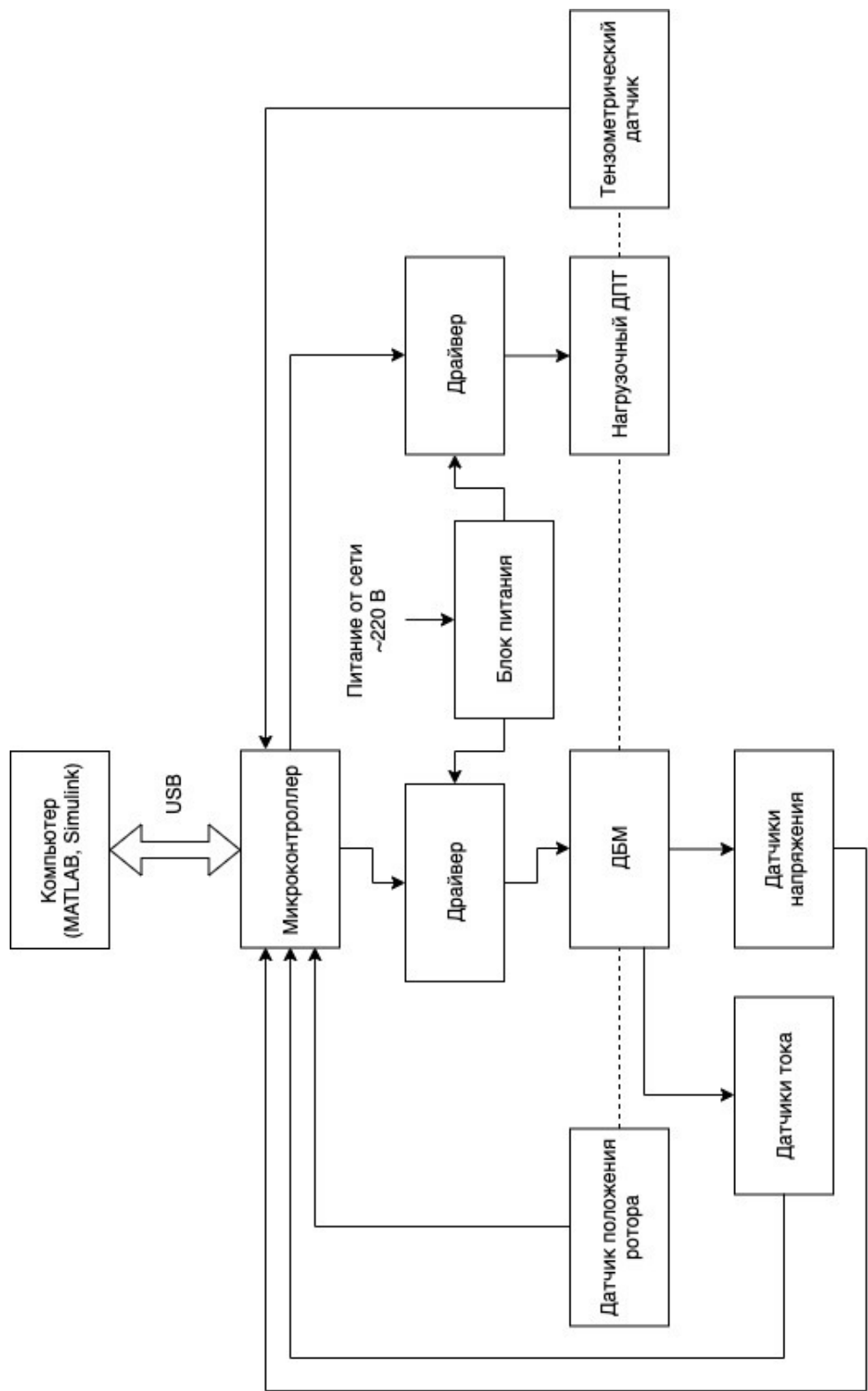
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	ФСУиР.205.R3435.001 ПЗ	Лист
						28

## 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



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

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

схема

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

ПРИЛОЖЕНИЕ В

плата

Инв. № подл.		Подп. и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата	ФСУиР.205.R3435.001 ПЗ					Лист
											32
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата							