

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Южно–Уральский государственный университет  
(национальный исследовательский университет)»  
Политехнический институт  
Энергетический факультет  
Кафедра «Автоматизированный электропривод»  
Направление подготовки 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника»

**ВЫПУСКНАЯ  
КВАЛИФИКАЦИОННАЯ  
РАБОТА ПРОВЕРЕНА**

Рецензент, доцент, к.т.н.

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_ / Е.В. Белоусов /

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2020 г.

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ**

Заведующий кафедрой  
автоматизированного электропривода,  
д.т.н., профессор

\_\_\_\_\_ / М.А. Григорьев /

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2020 г.

\_\_\_\_\_ Исследование электропривода на базе FSDC машины \_\_\_\_\_

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА  
ПО ПРОГРАММЕ МАГИСТРАТУРЫ  
«ЭЛЕКТРОПРИВОДЫ И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ»  
ЮУрГУ–13.04.02.2020.309 ВКР**

Руководитель, доцент, к.т.н.

\_\_\_\_\_ / А.Н. Горожанкин /

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2020 г.

Автор работы,  
магистрант группы П–286

\_\_\_\_\_ / А.С. Гайнутдинов /

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2020 г.

Нормоконтролер, доцент, к.т.н.

\_\_\_\_\_ / Т.А. Функ /

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2020 г.

Челябинск 2020

## АННОТАЦИЯ

Гайнутдинов А.С. Исследование электропривода на базе FSDC машины. – Челябинск: ЮУрГУ, Э; 2020, 56 с., 33 ил., 5 табл., библиографический список – 8 наим.

В выпускной квалификационной работе исследуется электропривод на базе синхронной машины с переключением магнитного потока и обмоткой возбуждения на статоре (англ. название *Flux–Switching DC Motor – FSDC*).

Целью работы является создание и исследование модели электропривода синхронной машины с переключением магнитного потока и обмоткой возбуждения на статоре, в перспективе направленной на замену электропривода с использованием асинхронного двигателя, сохраняя внешние габариты.

Основными задачами для достижения цели являются:

- 1) литературный обзор по электродвигателям данного типа;
- 2) доказательство актуальности исследуемого двигателя;
- 3) разработка геометрии FSDC машины по исходным параметрам асинхронного двигателя, схожего по габаритам;
- 4) проведение оптимизации геометрии модели до получения наилучших показателей, тем самым увеличивая эффективность двигателя;
- 5) расчет энергетических величин;
- 6) сравнение полученных характеристик исследуемого двигателя с асинхронным двигателем;
- 7) вывод о преимуществах и недостатках FSDC машины, а также область применения.

					<b>ЮУрГУ–13.04.02.2020.309.01ПЗ</b>			
<b>Изм.</b>	<b>Лист</b>	<b>№ докум.</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>				
Разраб.		Гайнутдинов А.С.			<b>Исследование электропривода на базе FSDC машины</b>	<b>Лит.</b>	<b>Лист</b>	<b>Листов</b>
Провер.		Горожанкин А.Н.					4	56
Реценз		Белоусов Е.В.				<b>ЮУрГУ Кафедра «АЭП»</b>		
Н. Контр.		Функ Т.А.						
Утверд.		Григорьев М.А.						

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
1 ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР ПО FSDC МАШИНЕ.....	7
1.1 Описание FSDC машины и ее отличительные особенности .....	15
1.2 Система управления электроприводом на базе FSDC машины .....	18
2 ПОСТРОЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ .....	21
2.1 Исходные данные для разработки математической модели .....	21
2.2 Описание построения модели в Ansys Maxwell.....	22
2.3 Настройка модели в Ansys Maxwell .....	25
2.4 Статическая оптимизация элементов магнитопровода.....	28
2.5 Настройка параметров моделирования после проведения оптимизации геометрии модели .....	36
3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НА МОДЕЛИ.....	38
3.1 Определение номинального и перегрузочного моментов.....	38
3.2 Определение коэффициента мощности .....	38
4 СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ FSDC МАШИНЫ И АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ.....	42
4.1 Достоинства и недостатки FSDC машины и области применения.....	42
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	44
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....	46

					<i>ЮУрГУ – 13.04.02.2020.309.01ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		5

## ВВЕДЕНИЕ

В современной истории все чаще наблюдается рост интереса к электродвигателям, вопреки использованию двигателей внутреннего сгорания. Последние, ввиду «заезженности», дороговизны горюче–смазочных материалов, сложности обслуживания, а также загрязнения окружающей среды все меньше и меньше пользуются спросом. Освящая тему электродвигателей, затронем тему тяговых электроприводов, в частности тему электрокаров. В сфере электрокаров возрос спрос на двигатели с постоянными магнитами, по причине высоких удельных показателей. Однако стоимость материалов для постоянных магнитов и неустойчивость к высоким температурам, являются существенными недостатками машин с постоянными магнитами. При этом далеко не каждый двигатель способен обеспечить широкий диапазон регулирования по скорости, при постоянной мощности. Исходя из вышенаписанного, интерес к новым видам и типам электродвигателей актуален и по сей день. В данной работе будет проведено исследование электропривода на базе машины FSDC (Flux–Switching DC Motor) – это машина, которая содержит две независимые физически разделенные обмотки на статоре. В работе будут отражены геометрическое построение машины с ее особенностями, статическая оптимизация элементов магнитопровода, для выявления максимальных показателей машины, а также будет выполнено сравнение исследуемой машины с асинхронным двигателем и продемонстрированы результаты их сравнения.

					<i>ЮУрГУ–13.04.02.2020.309.01ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		6



- 4) Широкие функциональные возможности постоянного питания;
- 5) Высокая крутящая способность для электрического запуска и восхождения на холм;
- 6) Высокая прерывистая перегрузочная способность для обгона;
- 7) Высокая надежность и прочность для автомобильной среды;
- 8) Низкий акустический шум;
- 9) Разумная стоимость.

Когда электромашине необходимо работать с двигателем для различных ГЭМ (гибридный электромобиль), существуют некоторые дополнительные требования:

- 1) Высокоэффективная генерация электроэнергии в широком диапазоне скоростей
- 2) Хорошая регулировка напряжения при широкой генерации скорости
- 3) Возможность интеграции с двигателем

На рисунке 1.1 показана классификация электрических машин для ЭМ, в которых жирным выделены те, которые применимы к ЭМ, в том числе к последовательным постам постоянного тока, шунтирующим постам постоянного тока с отдельным возбуждением, постоянным магнитам (ПМ) постоянного тока, индукцией ротора, бесщеточным переменным током (BLAC), бесщеточным постом (BLDC C) и реактивным электрическим (РЭ) машинам.

Рисунок 1.1 – Классификация электрических машин для электромобилей

В основном машины ЭМ подразделяются на две основные группы: коллекторный и бесколлекторный. Первое означает, что машина имеет коллектор и углеродные щетки, в то время как второй вариант не имеет ни коллектора, ни углеродных щеток. Следует отметить, что тенденция ориентирована на разработку новых типов машин без коммутаторов или бесщеточных машин,

особенно выпуска с системой двойной стабилизации и машин с верньерным двигателем.

Ключевой особенностью механизмов с двойной системой стабилизации является наличие явных полюсов как в статоре, так и в роторе. РЭ машины является своего рода механизмами с двойной стабилизацией, имеющими простейшую конструкцию. При установке ПМ статора в машины с двойной стабилизацией получается новый класс бесщеточных машин - машина статор-ПМ. Поскольку ротор не имеет ни ПМ, ни обмоток, этот класс машин механически прост и прочен, следовательно, отлично подходит для работы транспортного средства. В соответствии с расположением ПМ, он может быть разделен на два показательных постоянных магнита (ДСПМ), реверсивный постоянный магнит (ФПМ) и коммутационный постоянный магнит (ФПМ). Кроме того, с включением независимых обмоток возбуждения в статоре для контроля за потоком, класс может быть далее разделен на типы управляемого потоком (FC) - ФК-DSPM, ФК-FRPM и ФК-FSPM. Кроме того, когда полюсы ТЧ заменяются обмотками постоянного тока, предназначенными для избавления от этих дорогостоящих материалов ТЧ и обеспечения гибкого управления потоком, получающиеся в результате машины с двойным отражением постоянного тока (DSDC), с реверсированием потока постоянного тока (FRDC) и с переключением потока постоянного тока (FSDC) становятся новыми типами современных машин без магнитов.

Ключевой особенностью машин с верньерным двигателем является использование эффекта верньера для усиления выходного крутящего момента при понижении скорости, что приравнивает данный механизм к классу бесщеточных машин, предназначенных для применения на низких скоростях с прямым приводом.

Существуют два основных класса верньерных машин: верньер постоянного магнита (VPM) и верньер постоянного магнита (ВПМ). В зависимости от расположения ПМ существуют три типа ПМ машин: роторно-ПМ типа со всеми ПМ, установленными на роторе, статор-ПМ типа со всеми ПА, установленными

					<i>ЮУрГУ-13.04.02.2020.309.01ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		9

на статоре, и все ПМ типа с ПМ типа, установленными как на роторе, так и на статоре. Поскольку машина ПМ ротора-РМ является наиболее тщательно разработанной, она едва ли может называться машиной электрической ПМ машиной. Машина статора-ПМ обычно называется гибридной верньерной машиной. С другой стороны, ПМ машина конструктивно похожа на РЭ машину, но она имеет другой принцип работы. По существу ВПМ-машина питается трехфазными синусоидальными токами для создания вращающегося магнитного поля, причем ротор работает синхронно с долей скорости этого вращающегося поля. Благодаря присущему ему малому коэффициенту мощности может быть введен дополнительный источник питания для подачи дополнительной обмотки поля в статор ВПМ машины, таким образом, приводя к тому, что верньерная машина имеет двойное питание. Эта дополнительная обмотка поля может питаться переменным или постоянным током, что приводит к дальнейшему созданию машины с сопротивлением VRAC и VRDC. Машины ВПМ и DFVR также классифицируются как новые типы продвинутых машин без использования магнитов.

Все машинные топологии ЭМ, разработанные при традиционном строении радиального потока, могут быть легко изменены на другое строение, например с использованием осевого потока, линейного потока и поперечного потока. Строение осевого потока имеет преимущества более высокой плотности мощности и более высокой плотности крутящего момента, чем его аналоги радиального потока, но страдает от проблемы большой осевой силы, прикладываемой к статору ротором и ограниченной формой. Поскольку строение линейного потока обеспечивает линейное движение [тока], она менее привлекательно для силовой установки ЭМ. Хотя строение поперечного потока может предоставлять самую высокую плотность крутящего момента, соответствующая конструкция машины является очень сложной, что ограничивает ее технологичность и практичность для ЭМ.

Помимо разработки моторных приводов ЭМ для чистых электрических двигателей, а именно для ПЭВ и FEV, технологическое развитие машин ЭМ было

					<i>ЮУрГУ-13.04.02.2020.309.01ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		10



распространено на гибридные двигатели для ГЭМ. Как показано на рисунке 1.2, есть две основные системы машин для гибридной тяги: система ISG для микро- и средних гибридов и система EVT для полных гибридов. Система ISG должна обеспечивать не только традиционные особенности прокрутки двигателя и выработки электроэнергии, но и гибридные особенности упора холостого хода, рекуперативного торможения, а также поддержки мощности. Поэтому соответствующая конструкция, анализ и управление машины очень требовательны. EVT предоставляет электроуправляемую передачу мощности от двигателя к колесам с непрерывно изменяемой трансмиссией, обеспечивая, таким образом, все гибридные характеристики, включая электрический пуск, запуск в режиме холостого хода, рекуперативное торможение и поддержку мощности, а также достигая наивысшей экономии топлива. Существует три основных типа систем EVT: планетарная электроприводная переменная передача (PG EVT), двухроторная электроприводная переменная передача (DR EVT) и магнитная электроприводная переменная передача (MG EVT). Система PG EVT почти исключительно используется для коммерчески доступного полного гибрида, который был впервые разработан компанией Toyota для своей Prius (Kamiya, 2006). Однако эта система PG EVT наследует основные недостатки планетарной передачи, а именно потеря трансмиссии, шум шестерен и необходимость регулярной смазки. В последние годы была разработана концепция двухроторных машин, которые могут быть использованы для замены планетарной передачи, формируя, следовательно, бесступенчатую систему DR EVT (Hoeijmakers and Ferreira, 2006). Однако эта система DR EVT должна использовать контактные кольца и углеродные щетки для извлечения энергии из внутреннего ротора, которые недостаточно надежны и требуют регулярного технического обслуживания. Между тем, заменяя планетарную передачу магнитной передачей, получающаяся система MG EVT может унаследовать отличительные преимущества магнитной передачи, а именно высокую эффективность передачи, бесшумную работу и отсутствие технического обслуживания, избегая при этом использования контактных колец и углеродных щеток.

					<i>ЮУрГУ-13.04.02.2020.309.01ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		11

## Рисунок 1.2 – Привод электромобиля на основе гибридного двигателя

Тем не менее, эта система EVT без псевдоредукторов и без щеток имеет сложную конструкцию, и требует высокой точности при изготовлении.

### *Усовершенствованные безмагнитные приводы*

Последние десять лет бесщеточные электродвигатели с постоянными магнитами (ПМ) заменяют индукционные электродвигатели для приведения в движение электромобиля (ЭМ) благодаря их повышенной плотности крутящего момента, плотности мощности и эффективности работы. Однако поставки материалов для ПМ, особенно редкоземельных элементов, весьма ограничены и колеблются в связи с тем, что рыночные цены на них резко растут и в целом неустойчивы. Таким образом, в последние годы развитие передовых безмагнитных моторных приводов становилось всё более и более выгодным. Хотя эти безмагнитные машины, как правило, имеют более низкую плотность крутящего момента, они могут предложить определенные преимущества, которые заключаются в их низкой стоимости. Между тем, для применения EV были разработаны различные топологии машин без магнитов.

В этой главе будет представлен обзор усовершенствованных безмагнитных приводов двигателя, включая синхронно реактивные (SynR), двузначные постоянного напряжения (DSDC), импульсное переключение постоянного тока (FSDC), магнитное сопротивление (VR) и магнитное сопротивление с двойной подачей (DFVR), а также строение осевого магнитного потока. Также в главе приведены соответствующие критерии проектирования, примеры проектирования и потенциальные методы применения двигательной установки ЭМ.

### *Что такое усовершенствованная система без постоянного магнита?*

С постоянно растущей популярностью ПМ-машин для ЭМ спрос на неодим-железо-бор (Nd-Fe-B) ПМ-материал резко растет. Определяющим фактором при ценообразовании ПМ Nd-Fe-B является цена сырья неодима. Как показано на

					<i>ЮУрГУ – 13.04.02.2020.309.01ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		12

рисунке 1.3, в период с июля 2009 года по июль 2011 года она резко возросла и в настоящее время составляет в несколько раз больше начальной цены. И абсолютная стоимость, и волатильность стоимости неодима сильно осложняют разработку машин ПМ, и стимулируют исследования передовых моделей без магнитов. Изначально придумано семейство машин без постоянного магнита, целью которого является отличить его от семейства машин ПМ. В концептуальном плане индукционная машина и машина с переключаемым сопротивлением (SR) являются своего рода безмагнитной машиной, поскольку они не оснащены никакими ПМ. Поскольку эти два вида машин были хорошо развиты и разработаны, они образуют отдельные отрасли. Поэтому используется прилагательное "продвинутой", чтобы исключить их из тех машин без постоянного магнита, которые были разработаны недавно или относительно недавно.

Обращая особое внимание на передовые машины без постоянного магнита, которые пригодны для двигательной установки ЭМ, выделяются пять основных типов:

- 1) Машина SynR;
- 2) Машина DSDC;
- 3) Машина FSDC;
- 4) Машина Стабиловольта;
- 5) Машина DFVR.

Рисунок 1.3 – График стоимости неодима

Между тем, как строение машины с радиальным потоком (РП), так и строение машины с осевым потоком вышеупомянутых пяти топологий машины без магнитов являются подходящими для движения ЭМ. В частности, такое строение осевого потока является привлекательным для использования в двигателе полного привода.

### *Системные конфигурации*

Как и у других приводов двигателя, продвинутые безмагнитные приводы двигателя состоят из четырех основных компонентов: безмагнитной машины, преобразователя, датчика и контроллера. Существуют различные системные конфигурации усовершенствованных безмагнитных приводов двигателя, в зависимости от типа безмагнитных машин и соответствующего преобразователя мощности.

Среди них машина SynR и машина VR питаются по отдельности от одного преобразователя мощности, тогда как остальные питаются вдвойне от двух преобразователей мощности. Конфигурация системы этих приводов без магнита с одним питанием показана на рисунке 1.4, в нем обмотка якоря в статоре питается только силовым инвертором. В то же время конфигурация системы этих приводов с двойным питанием от усовершенствованного двигателя без магнитопровода показана на рисунке 1.5, в котором обмотка якоря питается инвертором, в то время как обмотка возбуждения питается преобразователем. Следует отметить, что все обмотки современных безмагнитных машин расположены в статоре, а все их роторы свободны от ПМ или медных обмоток.

Между приводами двигателя с одним питанием и с двойным питанием первый хорош по причине своей простоты, а второй обладает дополнительной управляемостью для улучшения рабочих характеристик. Конечно, как топология машины, так и схема преобразователя усовершенствованного двигателя без магнитопровода с двойной подачей питания являются более сложной и дорогостоящей.

Рисунок 1.4 – Конфигурация системы приводов SynR и VR без магнита с одним питанием

					<i>ЮУрГУ–13.04.02.2020.309.01ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		14

## Рисунок 1.5 – Конфигурация усовершенствованного двигателя без магнитопровода с двойной подачей питания

### 1.1 Описание FSDC машины и ее отличительные особенности

Электромеханические преобразователи с переключением магнитного потока и обмоткой возбуждения на статоре относятся к классу машин, которые содержат две независимые физически разделенные обмотки на статоре [1]. Первая из них является обмоткой возбуждения, а вторая – обмоткой якоря. Электромеханическое преобразование в таких машинах возможно только благодаря магнитной не симметрии ротора, который не содержит обмоток.

Подобно двигателям DSDC, двигатель FSDC представляет собой разновидность бесколлекторных двигателей с обмоткой якоря и обмоткой поля постоянного тока на статоре. В отличие от двигателей DSDC, FSDC обеспечивает биполярное потокосцепление и расположение фокусировки потока, что приводит к более высокой плотности крутящего момента.

### Рисунок 1.1.1 – Структура FSDC машины с обмоткой на статоре

На рисунке 1.1.1 показана структура двигателя FSDC с обмоткой на статоре, у которого обмотки постоянного тока в пазах организованы принципом «через один», так что магнитное поле возбуждается радиально, однако нет возможности сфокусировать поток, что приводит к относительно низкой плотности крутящего момента. Чтобы обеспечить механизм фокусировки потока, можно использовать возбуждение тороидальными полями. Однако нельзя исключить тот факт, что структура тороидального поля является более сложной.

В отличие от двигателей DSDC, FSDC имеют двухполюсное потокосцепление, то есть соответствующая полярность потока, связанная с обмоткой якоря, в процессе вращения ротора изменяется при каждом следующем совпадении

					<i>ЮУрГУ – 13.04.02.2020.309.01ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		15

полюсов ротора и статора. Этот принцип переключения потока показан на рисунке 1.1.2.

### Рисунок 1.1.2 – Принцип переключения потока

Кроме того, наличие биполярной связи потока позволяет двигателю FSDC работать во всех четырех квадрантах плоскости преобразования энергии, зависимость потокосцепления от магнитной силы (MMF), что действительно отличает ее от двигателя DSDC, как показано на рисунке 1.1.3.

### Рисунок 1.1.3 – Плоскость преобразования энергии

В отличие от двигателей DSDC, которые обычно работает в режиме синхронного бесколлекторного двигателя постоянного тока, двигатель FSDC может работать как в режиме синхронного бесколлекторного двигателя постоянного тока, так и переменного (BLAC), в зависимости от формы потокосцепления. То есть, когда якорь выполнен по принципу концентрированной обмотки, потокосцепление как бы имеет вид трапеции, что способствует режиму работы BLDC, тогда как, когда якорь выполнен с распределенной обмоткой, потокосцепление синусоидальное, что способствует режиму работы BLAC. На рисунке 1.1.4 показаны формы рабочего сигнала двигателя FSDC, в котором используется режим работы BLDC. Когда связь потока  $\psi$  увеличивается, прикладывается положительный ток якоря  $i$  для создания положительного момента  $T$ . Также, когда потокосцепление уменьшается, прикладывается отрицательный ток якоря, следовательно, создается положительный крутящий момент.

					<i>ЮУрГУ–13.04.02.2020.309.01ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		16

#### Рисунок 1.1.4 – Формы рабочего сигнала FSDC машины в режиме BLDC

Крутящий момент поля постоянного тока является основным источником крутящего момента, в то время как реактивный крутящий момент имеет небольшое значение и фактически является источником пульсации крутящего момента.

На рисунке 1.1.5 показаны сигналы FSDC, работающего в режиме BLAC. Когда магнитный поток FSDC увеличивается, прикладывается положительный ток якоря  $i$  для создания положительного крутящего момента. Между тем, когда потокосцепление ослабляется, отрицательный ток якоря также применяется для создания положительного крутящего момента.

#### Рисунок 1.1.5 – Формы рабочего сигнала FSDC машины в режиме BLAC

Требования к преобразователю мощности и способы управления скоростью привода FSDC, по существу, такие же, как и у приводов DSDC. По сравнению с приводом двигателя FSPM, электропривод FSDC требует дополнительного преобразователя постоянного тока для управления током поля постоянного тока, одновременно обладая гибкостью в управлении магнитным потоком.

#### *Обоснование актуальности FSDC машины*

Такие электрические машины характеризуются высоким удельным крутящим моментом, хорошей перегрузочной способностью, большим диапазоном регулирования скорости, технологичностью и низкой стоимостью изготовления [1, 2, 3].

Благодаря механизму фокусировки потока в статоре, двигатель с постоянными магнитами и переключением потока (FSPM) может выдавать высокую плотность потока в воздушном зазоре и, следовательно, высокую плотность крутящего момента. Однако стоимость материалов для постоянных магнитов и неустойчивость к высоким температурам машины FSPM являются

					<i>ЮУрГУ – 13.04.02.2020.309.01ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		17

существенными факторами. Кроме того, при сильном насыщении магнитной цепи статора становится проблематичным ослабить магнитный поток, что ограничивает соответствующий диапазон работы при постоянной мощности. В дополнение к высокой плотности крутящего момента для работы приводов электрокаров желателен широкий диапазон работы с постоянной мощностью.

Используя обмотку постоянного тока вместо возбуждения от постоянных магнитов (как у FSPM), двигатель FSDC способен с легкостью ослаблять магнитный поток для работы на высоких скоростях при постоянной мощности, т.к. уменьшая ток цепи постоянного тока можно ослабить поток в воздушном зазоре. Кроме того, аналогично DSDC, двигатели FSDC обладают способностью временно усиливать поток в момент запуска электрокаров и способностью регулировать поток в режиме онлайн, что способствует увеличению диапазона вождения. Конечно, привод двигателя FSDC имеет недостатки, заключающиеся в более низкой плотности крутящего момента и более низкой эффективности, чем аналог FSPM.

## 1.2 Система управления электроприводом на базе FSDC машины

Как и в электроприводах постоянного тока, наиболее распространенной структурой управления в электроприводах переменного тока остается система подчиненного регулирования (см. рисунок 1.2.1), в которой внутренний контур регулирования момента (КРМ) охвачен внешним контуром регулирования скорости. Внешний контур содержит регулятор скорости (РС с блоком ограничения БО), датчик обратной связи по скорости (ДОС), а звеном Д учитываются динамические свойства механических звеньев электропривода [4].

Рисунок 1.2.1 – Обобщенная структурная схема электропривода с подчиненным регулированием координат



Наиболее распространенной и чаще используемой системой управления в синхронных электроприводах является система управления синхронного частотно–регулируемого электропривода с выделением продольной и поперечной составляющих тока статора.

Примем для исследуемой машины данную систему управления (см. рисунок 1.2.2).

В соответствии с рисунком 1.2.2:

- ЗИ – задатчик интенсивности;
- РС – регулятор скорости;
- БО – блок ограничения;
- $РТ_d$  – регулятор тока продольной составляющей тока статора;
- $РТ_q$  – регулятор тока поперечной составляющей тока статора;
- ПК1, ПК2 – преобразователи координат;
- UZA, UZB, UZC – источники тока преобразователя частоты ПЧ;
- ДТ – датчики тока;
- ДПР – датчик положения ротора;
- ДС – датчик скорости.

Рисунок 1.2.2 – Функциональная схема синхронного частотно–регулируемого электропривода с выделением продольной и поперечной составляющих тока статора

Для получения требуемого темпа изменения скорости электродвигателя используется ЗИ скорости, постоянная времени которого определяется исходя из требуемого углового ускорения двигателя.

Напряжение на выходе РС формирует сигнал задания на контур регулирования поперечной составляющей тока статора  $I_q$ , в то время как продольная составляющая тока статора  $I_d$  поддерживается равной нулю, при этом величину задания продольной составляющей тока статора  $I_{d3}$  также принимают

					<i>ЮУрГУ–13.04.02.2020.309.01ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		19

равной 0. В соответствии с перегрузочной способностью двигателя по моменту необходим блок ограничения с определенными границами.

Далее на вход ПК1 подаются напряжения  $U_d$ ,  $U_q$ , которые в функции угла поворота ротора двигателя, измеряемого ДПР, преобразуются в три сигнала задания фазных токов статора  $I_{A3}$ ,  $I_{B3}$ ,  $I_{C3}$ . Соответственно, данным вычислительным блоком ПК1 происходит управление тремя источниками тока UZA, UZB, UZC ПЧ. Статор FSDC машины подключен на выход ПЧ.

Вычислительным блоком ПК2 происходит преобразование фазных токов статора двигателя  $I_A$ ,  $I_B$ ,  $I_C$ , измеряемые ДТ, в фиктивные величины  $I_d$ ,  $I_q$ , которые затем обрабатываются  $PT_d$  и  $PT_q$ .

					<i>ЮУрГУ-13.04.02.2020.309.01ПЗ</i>	<i>Лист</i>
						20
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		

## 2 ПОСТРОЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

### 2.1 Исходные данные для разработки математической модели

Исходными данными для разработки математической модели исследуемого двигателя приняты данные асинхронного двигателя (далее – АД) MO160M4, используемого на испытательном стенде предприятия ООО «НТЦ Приводная Техника», одним из основных направлений которого является улучшение технико–экономических показателей за счет внедрения современных типов электроприводов.

Данная работа связана с созданием модели FSDC привода, приняв за основу внешние габариты статора АД и изменив при этом ротор. В конечном счете представится возможным сравнить АД и FSDC привод одного габарита. Исходные параметры АД представлены в таблице 2.1.1.

Таблица 2.1.1 – Исходные параметры АД MO160M4

Наименование параметра	Обозначение параметра	Значение параметра	Единица измерения параметра
Номинальная мощность	$P_n$	18,5	кВт
Номинальное напряжение	$U_n$	220 В	В
Номинальный ток	$I_n$	50 А	А
Номинальный момент	$M_n$	120	Н·м
Перегрузочная способность	$M_{\max} / M_n$	2,2	–
Коэффициент мощности	$\cos\phi$	0,89	–
КПД	КПД	89,5	%
Количество пар полюсов	$2p$	2	–
Синхронная скорость	$n_0$	1500	об/мин
Номинальная скорость	$n_n$	1450	об/мин
Внешний диаметр машины	$D_n$	254	мм
Диаметр внутренней расточки статора	$D$	158	мм

Продолжение таблицы 2.1.1

Наименование параметра	Обозначение параметра	Значение параметра	Единица измерения параметра
Длина активной части машины	L	184	мм
Число зубцов на статоре асинхронной машины.	z	48	шт
Число эффективных проводников в пазу	$N_{эф}$	23	шт
Число элементарных проводников в пазу	$N_{эл}$	69	шт
Диаметр обмоточного провода	d	1,12	мм
Диаметр ротора	$D_p$	157	мм
Длина ротора	$L_p$	183	мм
Катушечных групп	–	12	–
Слои в катушечных группах обмотки статора	–	2	–
Площадь паза статора	$S_{паз.статор}$	170	мм <sup>2</sup>
Площадь обмотки статора	$S_{обмотка.статор}$	50	мм <sup>2</sup>

## 2.2 Описание построения модели в Ansys Maxwell

Для построения и выполнения необходимых задач было решено использовать современную платформу Ansys Electronics Desktop, которая имеет модуль Ansys Maxwell.

Ansys Maxwell предоставляет возможность построения модели тремя способами – построение с помощью инструментов Maxwell2D, создание модели через модуль RMXprt и импорт моделей из прочих CAD–систем.

Построение и исследование модели электропривода синхронной машины с переключением магнитного потока и обмоткой возбуждения на статоре было выполнено посредством использования инструментов Maxwell2D, наполненный всем необходимым для построения модели двигателя.

Программный пакет Ansys Maxwell2D позволяет реализовать несколько типов задач:

1) Магнитостатика (*magnetostatic*). В этом разделе анализируются магнитные поля, которые вызваны распространением плотности постоянного тока в проводниках, плюс к этому рассматриваются задачи с внешними постоянными магнитными полями;

2) Гармонические поля (*eddy current*). Электромагнитные поля с индуцированными вихревыми токами в проводящих частях модели, которые вызваны распространением переменных токов в проводниках посредством воздействия внешнего переменного магнитного поля;

3) Переходные процессы (*transient*). В данном разделе исследуются переходные процессы в электромеханических системах, которые вызваны постоянными магнитами, обмотками, источниками тока или напряжения с заданным изменением во времени. В этом разделе можно детально рассматривать динамику вращательных или поступательных элементов модели в магнитном поле, учитывая наведённые вихревые токи.;

4) Электрические поля (*electric*). Электрические поля в проводниках и диэлектриках описываемые пространственным распространением напряжения, электрического поля и плотности постоянного тока.

В данной работе взяты во внимание магнитостатика и переходные процессы.

Все возможные топологии электрических машин данного класса определяются из соотношения числа зубцов на статоре  $N_S$  и роторе  $N_R$  по следующим формулам:

$$N_S = 2 \cdot i \cdot m; \quad (2.2.1)$$

$$N_R = 2 \cdot i \cdot m \pm 2 \cdot j, \quad (2.2.2)$$

где  $i$  и  $j$  – целые положительные числа;

$m$  – число фаз.

Базовая трехфазная топология образуется путем подстановки в формулы (2.2.1), (2.2.2) значений  $i=j=2$ . Получается  $N_S = 12$ ,  $N_R = 8$  (перед вторым слагаемым берется знак минус).

Зададим базовые параметры магнитной системы для моделирования исследуемой машины:

- 1)  $h_{aS} = 20$  мм – толщина спинки статора;
- 2)  $h_{aR} = 23$  мм – толщина спинки ротора;
- 3)  $b_{zS} = 21$  мм – ширина зубцов статора;
- 4)  $h_{zS} = 28$  мм – высота зубцов статора;
- 5)  $b_{zR} = 31$  мм – ширина зубцов ротора;
- 6)  $h_{zR} = 23$  мм – высота зубцов ротора;
- 7)  $\delta = 0,5$  мм – ширина воздушного зазора;
- 8)  $d_B = 64$  мм – диаметр вала машины.

Первым шагом является построение статора двигателя (см. рисунок 2.2.1) посредством задания внутреннего и внешнего размера диаметра статора. Далее была выполнена геометрия одного зубца и, впоследствии, количественно размноженного, с нужным шагом (согласно количеству зубцов статора).

По тому же методу было выполнено построение ротора машины (см. рисунок 2.2.2).

Построение обмотки возбуждения и обмотки якоря детально не рассматривалось, поэтому они имеют прямоугольную форму (см. рисунок 2.2.3). Темным цветом показана обмотка возбуждения, а светлым – обмотка якоря. В обмотке возбуждения ток не меняется, а в обмотке якоря ток меняется.

На рисунке 2.2.4 представлен воздушный зазор между статором и ротором, который составляет 5 мм.

Итоговый результат построения модели приведен на рисунке 2.2.5.

Рисунок 2.2.1 – Статор FSDC машины

## Рисунок 2.2.2 – Ротор FSDC машины

## Рисунок 2.2.3 – Обмотки возбуждения и якоря FSDC машины

## Рисунок 2.2.4 – Воздушный зазор между статором и ротором FSDC машины

## Рисунок 2.2.5 – Разработанная модель FSDC машины

### 2.3 Настройка модели в Ansys Maxwell

Дальнейшим этапом является настройка параметров движения (вращения) исследуемого двигателя.

Необходимо задать:

- 1) область расчета (диаметром больше, чем внешний диаметр статора);
- 2) длину модели по оси Z – длина воздушного зазора АД (см. таблицу 2.1.1)

$L = 0,184$  м;

- 3) номинальную скорость вращения двигателя (см. таблицу 2.1.1);

4) материалы статору (Сталь Steell 1010), ротору (Сталь Steell 1010), обмоткам статора (Медь Copper), области расчета, вращения и воздушному зазору (Воздух Air);

5) задать сетку конечных элементов (обязательным условием на данном этапе является создание как можно меньшей по размерности сетки воздушного зазора), размеры которой указаны в таблице 2.3.1, а на рисунках 2.3.1 – 2.3.3 представлены общий вид сетки, сетка вблизи пазов, сетка в воздушном зазоре соответственно.

Таблицы 2.3.1 – Размеры сетки конечных элементов

Название элемента		Величины сетки, мм	
-------------------	--	--------------------	--

					<i>ЮУрГУ–13.04.02.2020.309.01ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		25

Статор	2
Ротор	2
Обмотка статора	5
Воздушный зазор	0,5

Рисунок 2.3.1 – Общий вид сетки

Рисунок 2.3.2 – Сетка вблизи пазов

Рисунок 2.3.3 – Сетка в воздушном зазоре

б) токи в фазы обмотки статора в режиме динамики по следующим формулам:

$$i_{\phi A} = I_H \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f_{\text{сеть}} \cdot t + 0,26 \cdot 2\pi); \quad (2.3.1)$$

$$i_{\phi B} = I_H \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f_{\text{сеть}} \cdot t - \frac{\pi}{3} + 0,26 \cdot 2\pi); \quad (2.3.2)$$

$$i_{\phi C} = I_H \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f_{\text{сеть}} \cdot t - \frac{2\pi}{3} + 0,26 \cdot 2\pi), \quad (2.3.3)$$

где  $i_{\phi A}$ ,  $i_{\phi B}$ ,  $i_{\phi C}$  – мгновенные значения тока в фазе А, В, С соответственно, А;

$I_H = 50$  А – номинальный ток статора (см. таблицу 2.1.1);

$f_{\text{сеть}} = 200$  Гц – частота сети;

$t$  – время, с.

В соответствии с формулами (2.3.1 – 2.3.3) токи в каждой фазе будут иметь следующие величины:

					<i>ЮУрГУ-13.04.02.2020.309.01ПЗ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		26



$$i_{\phi A} = 50\sqrt{2} \cdot \sin(1256t + 0,26 \cdot 2\pi);$$

$$i_{\phi B} = 50\sqrt{2} \cdot \sin(1256t - \frac{\pi}{3} + 0,26 \cdot 2\pi); \quad (2.3.4)$$

$$i_{\phi C} = 50\sqrt{2} \cdot \sin(1256t - \frac{2\pi}{3} + 0,26 \cdot 2\pi).$$

7) токи в обмотки статора в режиме статики, при условии, что величина этого тока – это сумма токов всех проводников, из которых состоит обмотка, заложенная в пазе, по следующей формуле:

$$I_c = \frac{I_H}{k} \cdot N_{\text{пр}}, \quad (2.3.5)$$

где  $I_c$  – суммарный ток в обмотке одного паза статора, А;

$k = 2$  – количество параллельных ветвей в обмотке;

$N_{\text{пр}} = 34$  – число проводников в пазе.

По формуле 2.3.5 вычислим суммарный ток в обмотке одного паза статора:

$$I_c = \frac{I_H}{k} \cdot N_{\text{пр}} = \frac{50}{2} \cdot 34 = 850 \text{ А}. \quad (2.3.6)$$

8) время расчета 20 мс, шаг расчета 1 мс, а также точки для сохранения результатов в заданные моменты времени.

В результате корректного задания необходимых параметров можно получить графики и таблицы расчета модели.

## 2.4 Статическая оптимизация элементов магнитопровода

Синхронные машины с переключением магнитного потока и обмоткой возбуждения на статоре (FSDC) относятся к классу машин, которые содержат две независимые физически разделенные обмотки на статоре.

Выделяют три подкласса машин: с электромагнитным возбуждением, с возбуждением от постоянных магнитов и комбинированным возбуждением. Достоинствами первого предельного варианта с электромагнитной обмоткой возбуждения являются: большой диапазон регулирования скорости в том числе и во втором квадранте, высокая перегрузочная способность, технологичность и низкая стоимость изготовления. Недостаток – это низкий удельный крутящий момент относительно варианта с возбуждением от постоянных магнитов. Достоинством второго предельного варианта с возбуждением от постоянных магнитов являются высокий удельный крутящий момент. Недостатки – сложность ослабления поля, высокая стоимость постоянных магнитов, их температурная нестабильность, возможность размагничивания. Гибридный вариант располагается между описанными двумя предельными подклассами. Отсюда можно сделать вывод, что увеличение крутящего момента машины с электромагнитным возбуждением, которое достигается оптимизацией геометрии электромеханического преобразователя, является актуальной.

Оптимизация здесь должна идти по критериям увеличения отношения удельного момента и удельной мощности к стоимости, т.е. по абсолютному показателю такие машины могут и не достигнуть высот машин с постоянными магнитами, но по относительному показателю должны выигрывать.

Термин «переключение магнитного потока» отражает принцип работы машины (см. рисунок 2.4.1).

Рисунок 2.4.1 – Принцип работы FSDC машины

					<i>ЮУрГУ–13.04.02.2020.309.01ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		28

Всего возможны три варианта включения обмоток якоря попарно 2–3– (рис. 2.4.1а), 1+2+ (рис. 2.4.1б) и 1–3+ (рис. 2.4.1в). Первая фазная обмотка якоря занимает положение с вертикальной магнитной осью, вторая смещена по часовой стрелке на  $60^\circ$ , третья смещена на  $120^\circ$  также по часовой стрелке относительно первой. Положительное направление тока в фазе считает таким, когда ток направлен к нам в витках слева от магнитной оси обмотки и от нас в витках справа. Например, на рис. 2.4.1а ток во второй фазной обмотке отрицательный, т.к. слева от магнитной оси ток направлен от нас, а справа – к нам. Зубцы ротора пронумерованы для удобства восприятия его поворота. Стрелками у номеров зубцов показано направление усилия, прикладываемого к зубцу. Так за один раз ротор поворачивается на угол 15 механических градусов. За период изменения тока в якорной обмотке ротор поворачивается на 45 механических градусов.

На рисунке 2.4.2 показано поперечное сечение электромеханического преобразователя. Ток в обмотке возбуждения является постоянным. Направление тока в проводниках показано крестиком – от нас, точкой – к нам [5, 6]. Обмотка якоря является трёхфазной. Фаза А – белые проводники, фаза В – светло–серые проводники, фаза С – темно–серые проводники. В каждой фазе показано положительное направление тока.

Рисунок 2.4.2 – Поперечное сечение FSDC машины

Известны мероприятия по модификации электрической машины [7]: замена радиальной обмотки возбуждения тороидальной с целью увеличения концентрации магнитного поля в зазоре; увеличение числа зубцов на один магнитный полюс статора; применение сегментарного ротора вместо явнополюсного. Все эти мероприятия направлены на увеличение удельного крутящего момента электромеханического преобразователя путем изменения базовой конструкции. В данной работе такие мероприятия не рассматриваются, а

					<i>ЮУрГУ–13.04.02.2020.309.01ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		29

исследуются предельные возможности базовой конструкции путем оптимизации соотношения элементов магнитной системы. Элементами магнитной системы машины являются: зубцы статора и ротора, спинки статора и ротора, воздушный зазор.

Параметрами оптимизации являются характеристики элементов магнитной системы: толщина спинки статора  $h_{aS}$ , толщина спинки ротора  $h_{aR}$ , ширина  $b_{zS}$  и высота зубцов статора  $h_{zS}$ , ширина  $b_{zR}$  и высота зубцов ротора  $h_{zR}$ , ширина воздушного зазора  $\delta$ .

Ограничениями являются:

1) Внешний диаметр статора  $D_H$  для толщины спинок статора и ротора, высоты пазов статора и ротора, а также воздушного зазора;

2) Величина зубцового деления для ширины зубцов статора и ротора.

Критерием оптимизации является крутящий момент  $M_{\text{крут}}$ .

Зубцы статора и ротора в магнитном плане идентичны. При большой разнице в ширине зубцов величина магнитного потока, проходящего через зубцы будет определяться зубцами меньшей ширины, которые будут насыщены. При этом изменение магнитной энергии в функции угла поворота ротора будет происходить со скоростью, определяемой, в основном, широкими зубцами. Это приведет к снижению среднего момента за период изменения магнитной энергии, т.к. малый зубец при движении под (над) большим зубцом энергию магнитного поля не изменяет. В случае одинаковых зубцов малой ширины максимальное значение магнитной энергии будет малым, а её изменение в функции угла поворота ротора будет происходить в короткий промежуток времени. При этом будет кратковременный выброс момента с последующим его установлением в районе нулевого значения. Получим недопустимые пульсации момента при работе машины. В случае одинаковых больших зубцов минимальный уровень магнитной энергии будет стремиться к максимальному, а момент будет стремиться к нулю.

Обобщая рассуждения по всем трем случаям можно утверждать, что ширина зубцов должна быть достаточной, чтобы минимизировать пульсации момента с одной стороны и добиться максимальной разницы магнитной энергии в согласном

					<i>ЮУрГУ – 13.04.02.2020.309.01ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		30

и рассогласованном положении зубцов. При этом ширина зубцов статора и ротора должна быть примерно одинаковой.

Для проверки предположений по выбору ширины зубцов при моделировании будем изменять ширину зубцов ротора (см. рисунок 2.4.3). При узких зубцах ротора, ширина которых составила  $1/3$  от полюсного деления (рис. 2.4.3, кривая 1), среднее значение момента составило  $M_{\text{крут}} = 90$  Нм, а его пульсации 55%. При средней ширине зубцов ротора, которая составила  $1/2$  от полюсного деления (рис. 2.4.3, кривая 2), среднее значение момента составило  $M_{\text{крут}} = 95$  Нм, а его пульсации 25%. При ширине зубцов ротора в  $2/3$  полюсного деления (рис. 2.4.3, кривая 3) среднее значение момента составило  $M_{\text{крут}} = 80$  Нм, а его пульсации 35%. Наилучшим оказался средний вариант ширины зубцов.

Ширина зубцов статора не варьировалась, так как при этом изменяется площадь пазов для размещения проводников обмотки, а это приводит к изменению линейной нагрузки и плотности тока. Эти параметры при моделировании поддерживались постоянными для корректного сопоставления машин по удельному моменту.

Рисунок 2.4.3 – Моментные характеристики для разной ширины зубцов ротора: 1 – 0,33 от полюсного деления; 2– 0,5 от полюсного деления; 3 – 0,66 от полюсного деления

Поиск оптимальной высоты зубцов ротора осуществлялся путем вариации этого размера за счет увеличения спинки ротора и фиксации максимального момента на угловой характеристике (см. рисунок 2.4.4).

По результатам моделирования при уменьшении высоты зубцов не происходит заметного изменения момента. Это можно объяснить достаточной глубиной паза для концентрации магнитного поля в зубцах. В нашем случае величина зубца ротора (см. рисунок 2.4.4) в 20 величин воздушных зазоров  $h_{zR} = 20\delta$  является достаточной. Увеличение спинки ротора не дает увеличения

					<i>ЮУрГУ–13.04.02.2020.309.01ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		31

момента по причине насыщения других элементов магнитной системы. Дальнейшее увеличение высоты зубцов прибавку в моменте не даёт. Резкое снижение момента при стремлении высоты зубцов к нулю объясняется проникновением полей выпучивания в межполюсный промежуток и создания тормозящего момента вплоть до установки результирующего усилия в нуль.

#### Рисунок 2.4.4 – Момент в функции высоты зубцов ротора

Значение максимальной величины момента на угловой характеристике в функции величины спинок статора и ротора в долях от ширины зубцов статора показано на рисунке 2.4.5. Идея одновременного уменьшения или увеличения ширины спинок статора и ротора объясняется тем, что по этим спинкам проходит один и тот же магнитный поток и они в одинаковой степени насыщаются. Если увеличивать одну из спинок, вторая будет выходить в насыщение и увеличения момента происходить не будет. Уменьшение одной из спинок приведет также к её насыщению. Полученная характеристика напоминает кривую намагничивания, где насыщение происходит примерно с ширины спинок в 30% от ширины зубцов статора, при этом момент продолжает расти, но значительно меньшим темпом. Оптимум здесь предлагается искать путем проведения прямой, совпадающей с левой частью характеристики (см. рисунок 2.4.5). Наличие участка рассогласования указывает на увеличение темпа снижения момента. Оптимальная величина спинок равна ширине зубцов статора  $h_{aS} = h_{aR} = b_{zS}$ .

Рисунок 2.4.5 – Зависимость момента от ширины спинок статора и ротора в долях от ширины зубцов статора

На базе полученных оптимальных соотношений элементов магнитной системы электромеханического преобразователя может быть получена методика электромагнитного расчёта [8].

Диаметр ротора и длину пакета определим для требуемого крутящего момента по следующей формуле:

$$M_{\text{крут}} = k \cdot D_R^2 \cdot L_S, \quad (2.4.1)$$

где  $k$  – коэффициент пропорциональности, который лежит в диапазоне от 20 до 35 кНм/м<sup>3</sup>;

$D_R$  – диаметр ротора, м;

$L_S$  – длина пакета статора, м.

Вместо расчетов по формуле (2.4.1) можно взять габариты асинхронной машины, которая бы обеспечивала требуемый крутящий момент и опираться на её параметры.

Связь всех элементов магнитной системы машины между собой будем осуществлять на основе их оптимальных соотношений и согласования требуемого значения МДС для создания магнитного потока нужной величины и возможностей машины в части места размещения обмотки и ограничений по плотности тока в ней.

Необходимая или желаемая МДС в пазе определяется из выражения:

$$F_p = k_s \cdot \frac{1}{\mu_0} \cdot B_\delta \cdot \delta, \quad (2.4.2)$$

где  $k_s$  – коэффициент насыщения, который лежит в диапазоне от 1,2 до 1,4%

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м – магнитная проницаемость воздушного промежутка;

$B_\delta$  – индукция над зубцами в согласованном положении, который лежит в диапазоне от 1,8 до 2 Тл.

С другой стороны, МДС паза определяется по его площади, плотности тока и коэффициенту заполнения паза медью:

					<i>ЮУрГУ–13.04.02.2020.309.01ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		33

$$F_p = k_M \cdot S_p \cdot J, \quad (2.4.3)$$

где  $k_M$  – коэффициент заполнения паза медью, который лежит в диапазоне от 0,4 до 0,8;

$S_p$  – площадь паза,  $m^2$ ;

$J$  – плотность тока в обмотке (примерно 5 А/мм<sup>2</sup>).

Из формул (2.4.2), (2.4.3) определяем желаемую площадь паза:

$$S_p = \frac{k_s \cdot B_\delta \cdot \delta}{\mu_0 \cdot k_M \cdot J}$$

Затем необходимо установить от каких параметров магнитной системы зависит площадь паза и как эти параметры между собой взаимосвязаны.

Наружный диаметр статора машины является зафиксированным и определяется из соотношения:

$$D_H = d_B + 2 \cdot h_{aR} + 2 \cdot h_{zR} + 2 \cdot \delta + 2 \cdot h_{zS} + 2 \cdot h_{aS}.$$

Согласно результатам оптимизации  $h_{aS} = h_{aR} = h_{zS}$ , а  $h_{zR} = 20\delta$ .

Ширина зубца статора определяется из выражения:

$$b_{zS} = 1,1 \cdot \frac{\pi D}{N_S} \cdot \tau, \quad (2.4.4)$$

где 1,1 – коэффициент для получения средней ширины зубца по высоте;

$D$  – внутренний диаметр расточки статора;

$\tau$  – ширины зубца статора по отношению к зубцовому делению.

Внутренний диаметр расточки статора определяется суммой магнитной системы ротора:

$$D = d_B + 2 \cdot h_{aR} + 2 \cdot h_{zR} + 2 \cdot \delta = d_B + 2,2 \cdot \frac{\pi D}{N_S} \cdot \tau + 42 \cdot \delta;$$



(2.4.5)

$$D = \frac{d_B + 42 \cdot \delta}{1 - \frac{2,2 \cdot \tau \cdot \pi}{N_S}}$$

Ширина паза статора:

$$b_{pS} = 1,1 \cdot \frac{\pi D}{N_S} \cdot (1 - \tau). \quad (2.4.6)$$

Высота паза статора равна высоте зубца статора и определяется из выражения:

$$h_{zS} = h_{pS} = 0,5 \cdot D_H - 0,5 \cdot d_B - 2,2 \cdot \frac{\pi D}{N_S} \cdot \tau + 21 \cdot \delta. \quad (2.4.7)$$

Площадь паза определяется из выражения:

$$S_p = b_{pS} \cdot h_{pS}. \quad (2.4.8)$$

Задаваясь внешним диаметром статора  $D_H$ , диаметром вала  $d_B$ , величиной воздушного зазора  $\delta$ , и варьируя ширину зубцов статора в долях от зубцового деления, подбираем площадь паза такой, чтобы она была равна желаемой.

Полученная методика расчета позволяет спроектировать синхронную машину с переключением магнитного потока и обмоткой возбуждения на статоре в габарите асинхронной машины MO160M4 с соотношением геометрических размеров элементов магнитной системы, близким к оптимальному. Параметры спроектированной машины:

- 1)  $h_{aS} = 23$  мм – толщина спинки статора;
- 2)  $h_{aR} = 23$  мм – толщина спинки ротора;
- 3)  $b_{zS} = 21$  мм – ширина зубцов статора;
- 4)  $h_{zS} = 25$  мм – высота зубцов статора;

- 5)  $b_{zR} = 31$  мм – ширина зубцов ротора;
- 6)  $h_{zR} = 10$  мм – высота зубцов ротора;
- 7)  $\delta = 0,5$  мм – ширина воздушного зазора;
- 8)  $d_B = 91$  мм – диаметр вала машины.

## 2.5 Настройка параметров моделирования после проведения оптимизации геометрии модели

Данная настройка заключается в том, чтобы в результате расчета исследуемой модели были получены наилучшие показатели.

Необходимо определить угол поворота (положение) ротора двигателя относительно статора по угловой характеристике при номинальном токе на обмотках статора (постоянная величина – мгновенное значение) и номинальной скорости вращения ротора, при котором момент будет наибольшим.

В режиме статики получена зависимость изменения момента от угла поворота ротора  $\alpha = 18^\circ$ , которому соответствует наибольший крутящий момент  $M_{\text{крут.мах}} = 138$  Нм (см. таблицу 2.5.1, рисунок 2.5.1).

Таблица 2.5.1 – Изменение момента от угла поворота ротора в режиме статики

Угол поворота ротора, °С	Крутящий момент, Нм	Угол поворота ротора, °С	Крутящий момент, Нм	Угол поворота ротора, °С	Крутящий момент, Нм
0	85	12	102	24	115
2	107	14	85	26	102
4	138	16	107	28	85
6	135	18	138	30	107
8	127	20	135	–	–
10	115	22	127	–	–

Рисунок 2.5.1 – Угловая характеристика в режиме статики

В режиме динамики угол поворота ротора составил  $\alpha = 21^\circ\text{C}$ , которому соответствует наибольший крутящий момент  $M_{\text{крут.мах}} = 132 \text{ Нм}$  (см. рисунок 2.5.2).

Рисунок 2.5.2 – Угловая характеристика в режиме динамики

					<i>ЮУрГУ–13.04.02.2020.309.01ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		37

### 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НА МОДЕЛИ

Достигнув наилучшей геометрии исследуемого двигателя, следующим шагом является экспериментальный анализ FSDC модели по электрическим, механическим и энергетическим величинам.

#### 3.1 Определение номинального и перегрузочного моментов

В режиме статики была исследована зависимость момента двигателя от тока, подаваемого в одну из обмоток паза статора. Результаты представлены в таблице 3.1.1 и на рисунке 3.1.1.

Таблица 3.1.1 – Зависимость изменения момента двигателя от тока в обмотке паза статора

Ток в одной обмотке статора, А	Крутящий момент, Нм	Ток в одной обмотке статора, А	Крутящий момент, Нм	Ток в одной обмотке статора, А	Крутящий момент, Нм
0	0	950	151	1600	197
525	82	1100	174	1900	204
850	138	1350	186	–	–

Рисунок 3.1.1 – Перегрузочная характеристика двигателя

График перегрузочной характеристики двигателя показывает прямую зависимость номинального момента двигателя от номинального тока статора – при увеличении тока, момент увеличивается. Номинальному току статора  $I_c = 850$  А (см. формулу 2.3.6) соответствует номинальный момент  $M_{ном} = 138$  Нм.

#### 3.2 Определение коэффициента мощности

В результате экспериментальных исследований модели в режиме динамики были сняты 200 значений тока, напряжения в обмотках статора для трех фаз,

момента в номинальной точке. После чего с помощью программного продукта MS Excel были построены графики токов, напряжений, мощностей в трех фазах статора, а также график момента (см. рисунки 3.2.1 – 3.2.4).

Рисунок 3.2.1 – График токов в фазах статора

Рисунок 3.2.2 – График напряжений в фазах статора

Рисунок 3.2.3 – График мощностей в фазах статора

Рисунок 3.2.4 – График момента в номинальной точке

В соответствии с вышеприведенными графиками были получены мощность, полная мощность, активная мощность, а также коэффициент мощности в фазе А в статоре (идентично фазам В, С).

Мощность в фазе А статора определяется по следующей формуле:

$$P_{\phi A} = u_{\phi A} \cdot i_{\phi A}, \quad (3.2.1)$$

где  $u_{\phi A}$  – напряжение в определенный момент времени, В;

$i_{\phi A}$  – ток в определенный момент времени, А.

Полная мощность в фазе А статора определяется по следующей формуле:

$$P_{\phi A.полн} = U_{\phi A} \cdot I_{\phi A}, \quad (3.2.2)$$

где  $U_{\phi A}$  – действующее напряжение, В;

$I_{\phi A}$  – действующий ток, А.

В соответствии с формулой (3.2.2) определяется полная мощность в фазе А статора:

$$P_{\text{фА.полн}} = 213,3 \cdot 50,1 = 10690,7 \text{ Вт.} \quad (3.2.3)$$

Активная мощность в фазе А статора определяется по следующей формуле:

$$P_{\text{фА.актив}} = \frac{\sum_N^0 P_{\text{фА}}}{N}, \quad (3.2.4)$$

где N – количество рассчитанных значений.

В соответствии с формулой (3.2.4) определяется активная мощность в фазе А статора:

$$P_{\text{фА.актив}} = \frac{\sum_{200}^0 P_{\text{фА}}}{200} = 4660 \text{ Вт.} \quad (3.2.5)$$

Зная активную (3.2.5) и полную (3.2.3) мощности, определяется коэффициент мощности в фазе А статора:

$$k_{\text{м.фА}} = \frac{P_{\text{фА.актив}}}{P_{\text{фА.полн}}} = \frac{4660}{10690,7} = 0,44. \quad (3.2.6)$$

В соответствии с рисунком 3.2.4 определяется средний момент двигателя, а также амплитуда пульсаций (в процентах) момента по следующим формулам:

$$M_{\text{ср}} = \frac{\sum_N^0 M}{N}; \quad (3.2.7)$$

$$A_{\text{пульс}} = \frac{0,5 \cdot (M_{\text{max}} - M_{\text{min}})}{M_{\text{ср}}},$$

где  $\sum_N^0 M$  – сумма всех моментов, Нм;

					<i>ЮУрГУ-13.04.02.2020.309.01ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		40

$M_{\max}$  – максимальное значение момента двигателя, Нм;

$M_{\min}$  – минимальное значение момента двигателя, Нм.

В соответствии с формулами (3.2.7) определяется средний момент и амплитуда пульсаций момента двигателя:

$$M_{\text{ср}} = \frac{\sum_{200}^0 M}{200} = 121 \text{ Нм}; \quad (3.2.8)$$

$$A_{\text{пульс}} = \frac{0,5 \cdot (152 - 92,5)}{121} = 24,6 \text{ \%}.$$

Рассчитанные величины сведены для удобства в одну таблицу 3.2.1.

Таблица 3.2.1 – Рассчитанные величины модели FSDC

Наименование величины	Обозначение величины	Значение величины	Единица измерения величины
Действующее значение напряжения в фазе А	$U_{\text{фА}}$	213,3	В
Действующее значение тока в фазе А	$I_{\text{фА}}$	50,1	А
Полная мощность в фазе А	$P_{\text{фА.полн}}$	10690,7	Вт
Активная мощность в фазе А	$P_{\text{фА.актив}}$	4660	Вт
Коэффициент мощности в фазе А	$k_{\text{м.фА}}$	0,44	–
Среднее значение момента	$M_{\text{ср}}$	121	Нм
Максимальное значение момента	$M_{\text{max}}$	152	Нм
Минимальное значение момента	$M_{\text{min}}$	92,5	Нм
Амплитуда пульсаций момента	$A_{\text{пульс}}$	24,6	%

#### 4 СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ FSDC МАШИНЫ И АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Сравнивая средний момент АД и FSDC машины, можно сделать следующий вывод – у обеих машин средний момент примерно одинаковый и составил для асинхронной машины  $M_{АД} = 119$  Нм, а для исследуемой машины  $M_{FSDC} = 121$  Нм. По величине пульсаций обе машины оказались также почти одинаковыми. Этот показатель составил для асинхронной машины 22%, а для синхронной машины с переключением магнитного потока и обмоткой возбуждения на статоре 25%.

Следует также отметить, что частота пульсаций момента асинхронной машины значительно больше. Это объясняется большим количеством зубцов на «гладком» статоре и зубцовыми гармониками момента. Пульсации момента исследуемой машины объясняются снижением интенсивности изменения магнитной энергии в системе перед переключением тока в одной из обмоток якоря машины.

Рисунок 4.4.1 – Кривые момента в функции времени для двух электрических машин: 1 – асинхронной машины MO160M4; 2 – синхронной машины с переключением магнитного потока и обмоткой возбуждения на статоре

##### 4.1 Достоинства и недостатки FSDC машины и области применения

Опираясь на проделанную работу, можно выделить следующие преимущества FSDC машины:

- 1) Высокий удельный крутящий момент;
- 2) Хорошая перегрузочная способность;
- 3) Большой диапазон регулирования скорости;
- 4) Технологичность и достаточно низкая стоимость изготовления (по сравнению с аналогом FSPM с постоянными магнитами);
- 5) По сравнению с асинхронным двигателем при идентичных габаритах, FSDC машина имеет меньшее количество пульсаций момента.

					<i>ЮУрГУ – 13.04.02.2020.309.01ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		42



Также выделяются следующие недостатки машины:

- 1) Небольшой коэффициент мощности;
- 2) Уступает аналогу – FSPM по значению крутящего момента и более низкой эффективности;
- 3) По сравнению с приводом двигателя FSPM, электропривод FSDC требует дополнительного преобразователя постоянного тока для управления током поля постоянного тока.

Областью применения такого электромеханического преобразователя являются механизмы с большим диапазоном регулирования по скорости, большими перегрузочными моментами и высокими требованиями к удельным показателям по моменту и мощности. Примером такого механизма может служить электрический и гибридный транспорт.

					<i>ЮУрГУ–13.04.02.2020.309.01ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		43

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе было выполнено исследование электропривода на базе машины FSDC (*Flux-Switching DC Motor*). В ходе исследования была осуществлена статическая оптимизация элементов магнитопровода. Был проведен подбор оптимального по ширине зубца ротора, которая в итоге составила 31мм, среднее значение момента при этом составило  $M = 95$  Нм, а его пульсации 25%. Затем была варьирована величина высоты зубца ротора, по итогу она составила 10 мм, а момент на тот момент стал  $M = 110$  Нм. После чего была определена оптимальная величина ширины спинок статора и ротора, которая составила 23мм, что тоже повысило момент до 117 Нм.

После получения оптимальных размеров геометрии магнитной системы, был определен угол поворота (положение) ротора двигателя относительно статора по угловой характеристике при номинальном токе на обмотках и номинальной скорости вращения ротора, при котором момент будет наибольшим. В режиме статики получена зависимость изменения момента при угле поворота ротора  $\alpha = 8^\circ$ , которому соответствует наибольший крутящий момент  $M_{\text{крут.мах}} = 152$  Нм. В режиме динамики угол поворота ротора составил  $\alpha = 21^\circ$ , которому соответствует наибольший крутящий момент  $M_{\text{крут.мах}} = 176$  Нм.

Далее были сняты экспериментальные показатели системы, в ходе которой были сняты перегрузочная характеристика, графики тока, напряжения и мощности в фазах статора, а также был получен график момента. В соответствии с экспериментальными показателями был выполнен расчет активной и полной мощности в фазе А статора (идентично фазам В, С), расчет коэффициента мощности, среднего момента и его амплитудных пульсаций. Активная мощность в фазе А составила  $P_{\text{фА.актив}} = 4660$  Вт, полная мощность  $P_{\text{фА.полн}} = 210690,7$  Вт, коэффициент мощности  $k_{\text{м.фА}} = 0,44$ , момент  $M_{\text{ср}} = 121$  Нм и пульсации  $A_{\text{пульс}} = 24,6$  %.

					<i>ЮУрГУ–13.04.02.2020.309.01ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		44

Затем было проведено сравнение FSDC машины и асинхронного двигателя в заданных габаритах. При сравнении было выявлено, что у обеих машин средний момент примерно одинаковый и составил для асинхронной машины  $M_{АД} = 119$  Нм, а для исследуемой машины  $M_{FSDC} = 121$  Нм. По величине пульсаций обе машины оказались также почти одинаковыми: для асинхронной машины 22%, а для синхронной машины с переключением магнитного потока и обмоткой возбуждения на статоре 25%. Но у асинхронной машины количество пульсаций момента значительно больше, объясняется это большим количеством зубцов на «гладком» статоре и зубцовыми гармониками момента, а пульсации FSDC машины свидетельствуют о снижении интенсивности изменения магнитной энергии в системе перед переключением тока в одной из обмоток якоря машины. Вышеупомянутое свидетельствует о том, что синхронная машина с переключением магнитного потока и обмоткой возбуждения на статоре не уступает асинхронному двигателю в заданных габаритах, а даже превосходит ее, даже несмотря на небольшой коэффициент мощности 44%. Проблема низкого коэффициента мощности решается путем применения автоматического регулирования возбуждения синхронной машины, помимо этого снижение реактивных нагрузок возможно с помощью компенсирующих устройств (конденсаторов). При использовании в качестве компенсатора синхронной машины уменьшение реактивной мощности достигается за счет дополнительных потерь энергии – потерь холостого хода машины и мощности, идущей на ее возбуждение.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1 Chau, K.T. Electric Vehicle Machines and Drives: Design, Analysis and Application / K.T. Chau. –John Wiley & Sons. 2015. – 375 p.
- 2 C. Pollock, and M. Wallace, “The flux switching motor, a dc motor without magnets or brushes”, Proc. 1999 IEEE–Industry Applications Conf., vol. 3, pp. (1980–1987).
- 3 H. Pollock, C. Pollock, , R.T. Walter, and B.V. Gorti, “Low cost, high power density, flux switching machines and drives for power tools”, Proc. IEEE–Industry Applications Conf., pp. 1451–1457, (2003).
- 4 Усынин, Ю.С. Системы управления электроприводов: Учебное пособие / Ю.С. Усынин. – Челябинск: Изд–во ЮУрГУ, 2001. – 358 с.
- 5 W. H. R. Cao, Y. Jin, Y. Zhang. A new general design method of segmented rotor wound field flux–switching motors with complementary magnet circuit. 2015 IEEE Magnetics Conference (INTERMAG). May 11–15. Beijing. 2015. pp. 4731.
- 6 Иванов–Смоленский, А. В. Электрические машины: учебник для вузов. В 2 Т. Т. 1 / А. В. Иванов–Смоленский. – 3 изд., стереот. – М.: Издательский дом МЭИ. – 2006. 652 с.
- 7 Проектирование электрических машин: учебн. для вузов. / И. П. Копылов, Б. К. Клоков, В. П. Морозкин, Б. Ф. Токарев; под ред. И. П. Копылова. – 3–е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 2002. 757 с.
- 8 A. Zulu, B.C. Mecrow, M. Armstrong. Topologies for three–phase Wound field Segmented–Rotor flux switching Machines”5th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD), pp.1–6, 2010.

					<i>ЮУрГУ–13.04.02.2020.309.01ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		46