

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт **Энергетический (ЭНИН)**
Направление подготовки **13.04.02 – Электроэнергетика и электротехника**
Кафедра **Электротехнических комплексов и материалов (ЭКМ)**

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Исследование синхронных машин с постоянными магнитами

УДК 621.313.32-047.37

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5ГМ5Г	Беляков Евгений Игоревич		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Киселёв А.В.	К.Т.Н., ассистент		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Кузьмина Г.Н.			

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Король И.С.	К.Х.Н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

и.о. зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Электротехнических комплексов и материалов	Гарганеев А.Г.	Д.Т.Н., профессор		

Томск – 2017 г.

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт **Энергетический (ЭНИН)**

Направление подготовки **13.04.02 – Электроэнергетика и электротехника**

Кафедра **Электрических комплексов и материалов (ЭКМ)**

УТВЕРЖДАЮ:
зав. кафедрой ЭКМ

(Подпись) _____ (Дата) **Гарганеев А.Г.**
(Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Магистерской диссертации

Студенту:

Группа	ФИО
5ГМ5Г	Беляков Евгений Игоревич

Тема работы:

Исследование синхронных машин с постоянными магнитами	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	28.12.2016 г. № 10959/с

Срок сдачи студентом выполненной работы:

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	<i>Конструкторская документация и техническое задание на проектирование двигателя рулевой колонки с редкоземельными постоянными магнитами (NdFeB) для электрического усилителя рулевого управления автомобиля, производства Саранульского электрогенераторного завода.</i>
---------------------------------	--

Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	<i>Аналитический обзор по литературным источникам с целью определения оптимальности выбора конструкции исполнительного двигателя, а также конструкции системы рулевого управления; выполнение серии экспериментов с имитационными моделями исполнительного двигателя рулевой колонки с целью поиска возможных вариантов оптимизации магнитной системы и уменьшения массо-габаритных показателей машины для повышения активного момента; анализ экономических показателей, используемых в проекте; исследование вредных и опасных факторов рабочего места; заключения по работе.</i>
Перечень графического материала	Сборочный чертеж ДРК-СН, презентация.

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы	
Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент	Кузьмина Н.Г.
Социальная ответственность	к.х.н., доцент Король И.С.
Иностранный язык	к.п.н., ассистент Соколова Э.Я.
Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:	
Introduction	
DC-motor review	
Conclusion	

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	
---	--

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Киселев А.В.	к.т.н., ассистент		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5ГМ5Г	Беляков Евгений Игоревич		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

Группа	ФИО
5ГМ5Г	Беляков Евгений Игоревич

Институт	ЭНИН	Кафедра	ЭКМ
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	Электроэнергетика и электротехника

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	<i>Оклад НР – 26300 руб. Оклад инженера-проектировщика – 17000 руб.</i>
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	<i>Норма амортизации – 20%; Районный коэффициент – 30%;</i>
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	<i>Отчисления во внебюджетные страховые фонды – 30%;</i>

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. <i>Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ</i>	<i>Планирование работ и их временных оценок</i>
2. <i>Разработка устава научно-технического проекта</i>	<i>Смета затрат на проектирование</i>
3. <i>Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок</i>	
4. <i>Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности</i>	<i>Сравнительный анализ полученных результатов</i>

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. *Диаграмма Ганта*

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Кузьмина Н.Г.			31.05.2017

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5ГМ5Г	Беляков Е.И.		31.05.2017

РЕФЕРАТ

Магистерская диссертация состоит из 164 страниц, 115 рисунков, 38 таблиц, 30 источников, 3 приложений.

Ключевые слова: вентильный двигатель, синхронный двигатель, постоянные магниты, магнитная система, активный момент, коэрцитивная сила, магнитный поток, конструкция, статорно-роторный пакет, электротехническая сталь.

В качестве объекта исследования выступает двигатель рулевой колонки (ДРК) с возбуждением от постоянных магнитов, с добавлением в состав магнитов редкоземельных элементов (NdFeB).

Целью работы является повышение активного момента исследуемого магнитоэлектрического двигателя для электроусилителя рулевого управления автомобиля, что позволит значительно повысить стабильность рулевого управления в динамике, а также даст возможность расширения спектра применения полученной электрической машины.

В данной работе для **достижения поставленных целей решаются следующие задачи:**

- обзор видов и конструкций синхронных машин;
- изучение конструкторской и технической документации к представленной для моделирования машины;
- анализ требований к оптимизации магнитной системы ДРК и построения алгоритма разработки, анализа и оптимизации модели ДРК;
- определение критериев оптимальности ДРК;
- исследование возможных путей оптимизации магнитной системы ДРК;
- создание имитационной модели ДРК в ПО ANSYS Maxwell 2D;
- проведение экспериментальных исследований по моделированию работы ДРК в ПО ANSYS Maxwell 2D:
 - изменение соотношения сторон поперечного сечения магнитов при постоянстве его объёма;

- изменение угла раскрытия магнитного потока магнита путем изменения положения магнита;
- подбор новых высокотехнологичных материалов для ротора и ПМ;
- принципиальное изменение конструкции ротора и способа размещения ПМ);

- анализ полученных результатов и определение оптимальной конструкции ротора, положения ПМ на роторе, а также материалов, применяемых для ротора и ПМ.

Актуальность научно-технической проблемы заключается в возможности решения задач по оптимизации магнитной системы двигателя рулевой колонки электрического усилителя рулевого управления автомобиля, а также уменьшения массогабаритных показателей с помощью конечно-элементного комплекса встроенного в специализированное ПО ANSYS Maxwell.

При **решении поставленных задач применялись следующие подходы** – для выполнения полного комплекса расчётов и моделирования применялось современное программное обеспечение (ПО).

Научная новизна работы заключается в разработке алгоритма построения имитационной модели на базе ПО ANSYS Maxwell 2D, а также в построении алгоритма анализа конструкции машины и оптимизации магнитной системы ДРК для ЭУР, который включает в себя имитационное моделирование ДРК, аналитический расчёт электромагнитного поля и временных зависимостей момента инерции и токов в обмотках машины с помощью МКЭ, а также применение МПЭ к полученным результатам.

ОГЛАВЛЕНИЕ

СПИСОК ПРИНЯТЫХ СОКРАЩЕНИЙ.....	10
ВВЕДЕНИЕ.....	11
1. ОБЗОР ВЕНТИЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ.....	16
1.1 Описание классификации вентильных электродвигателей и определение объекта исследования.....	16
1.2 Электромеханические преобразователи в ВДПТ.....	31
1.2.1 Классификация конструкций.....	31
1.2.2 Редукторные машины.....	32
1.2.3 Неявнополюсные синхронные машины с постоянными магнитами.....	37
1.2.4 Явнополюсные синхронные машины с постоянными магнитами.....	43
1.2.5 Сравнительный анализ достоинств и недостатков.....	47
2. АНАЛИЗ КОНСТРУКЦИЙ ЭУР.....	50
2.1 Краткое описание принципа рулевого управления.....	50
2.2 Описание назначения, конструкции и принципа действия электрического усилителя рулевого управления автомобиля.....	52
3. ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ.....	56
3.1 Планирование работ по НИР.....	56
3.2 Смета затрат на проект.....	60
3.2.1 Материальные затраты на канцелярские товары.....	60
3.2.2 Амортизация компьютерной техники.....	60
3.2.3 Основная заработная плата исполнителей темы.....	61
3.2.4 Затраты на социальные нужды.....	62
3.2.5 Прочие затраты.....	62
3.2.6 Накладные расходы.....	62

Планируемые результаты обучения по ООП 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника (магистратура)

Код результата	Результат обучения
P1	Совершенствовать и развивать свой интеллектуальный и общекультурный уровень, добиваться нравственного и физического совершенствования своей личности, обучению новым методам исследования, к изменению научного и научно-производственного профиля своей профессиональной деятельности.
P2	Свободно пользоваться русским и иностранным языками как средством делового общения, способностью к активной социальной мобильности.
P3	Использовать на практике навыки и умения в организации научно-исследовательских и производственных работ, в управлении коллективом, использовать знания правовых и этических норм при оценке последствий своей профессиональной деятельности.
P4	Использовать представление о методологических основах научного познания и творчества, роли научной информации в развитии науки, готовностью вести работу с привлечением современных информационных технологий, синтезировать и критически резюмировать информацию.
P5	Применять углубленные естественнонаучные, математические, социально-экономические и профессиональные знания в междисциплинарном контексте в инновационной инженерной деятельности в области электроэнергетики и электротехники.
P6	Ставить и решать инновационные задачи инженерного анализа в области электроэнергетики и электротехники с использованием глубоких фундаментальных и специальных знаний, аналитических методов и сложных моделей в условиях неопределенности.

Код результата	Результат обучения
P7	Выполнять инженерные проекты с применением оригинальных методов проектирования для достижения новых результатов, обеспечивающих конкурентные преимущества электроэнергетического и электротехнического производства в условиях жестких экономических и экологических ограничений.
P8	Проводить инновационные инженерные исследования в области электроэнергетики и электротехники, включая критический анализ данных из мировых информационных ресурсов.
P9	Проводить технико-экономическое обоснование проектных решений; выполнять организационно-плановые расчеты по созданию или реорганизации производственных участков, планировать работу персонала и фондов оплаты труда; определять и обеспечивать эффективные режимы технологического процесса.
P10	Проводить монтажные, регулировочные, испытательные, наладочные работы электроэнергетического и электротехнического оборудования.
P11	Осваивать новое электроэнергетическое и электротехническое оборудование; проверять техническое состояние и остаточный ресурс оборудования и организовывать профилактический осмотр и текущий ремонт.
P12	Разрабатывать рабочую проектную и научно-техническую документацию в соответствии со стандартами, техническими условиями и другими нормативными документами; организовывать метрологическое обеспечение электроэнергетического и электротехнического оборудования; составлять оперативную документацию, предусмотренную правилами технической эксплуатации оборудования и организации работы.

СПИСОК ПРИНЯТЫХ СОКРАЩЕНИЙ

- АД – асинхронный двигатель;
- ВД – вентильный электродвигатель;
- ВДПТ – вентильный электродвигатель постоянного тока;
- ВГДВЗ – выхлопные газы двигателей внутреннего сгорания;
- ВИД – вентильно-индукторный двигатель;
- ДБМ – электродвигатель бесконтактный моментный;
- ДПР – датчик положения ротора;
- ДРК – двигатель рулевой колонки;
- ИМ – индукторная машина;
- КПД – коэффициент полезного действия;
- МДС – магнитодвижущая сила;
- МКР – метод конечных разностей;
- МКЭ – метод конечных элементов;
- МПЭ – метод планирования эксперимента;
- МС – магнитная система;
- НИР – научно-исследовательская работа;
- ОКР – опытно-конструкторская работа;
- ПМ – постоянные магниты;
- ПО – программное обеспечение;
- РЗЭ – редкоземельные элементы;
- СМ – синхронная машина;
- ТЗ – техническое задание;
- ХХ – холостой ход;
- ЭД – электродвигатель;
- ЭДС – электродвижущая сила;
- ЭМ – электрическая машина;
- ЭП – электропривод;
- ЭС – электротехническая сталь;
- ЭУР – электрический усилитель рулевого управления;

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время для реализации бесконтактных регулируемых электроприводов, как правило, применяются асинхронные двигатели с частотным регулированием или вентильные двигатели на базе синхронных машин с возбуждением от постоянных магнитов, питаемые от автономного инвертора.

Под магнитоэлектрической машиной понимается электрическая машина постоянного или переменного тока, в которой магнитный поток возбуждения создается постоянными магнитами (ПМ), (вращающимися или неподвижными). Магнитоэлектрические машины находят широкое применение во многих отраслях народного хозяйства. Среди прочих можно отметить авиа-, ракето-, и автомобилестроение, нефтегазовый комплекс и ветроэнергетику.

Несмотря на простоту конструкции, высокую надежность и относительно низкую стоимость асинхронных машин, при низких частотах вращения и больших мощностях, меньшими удельными массами, повышенными КПД, а также лучшими виброакустическими показателями обладают синхронные машины. В структуре вентильного двигателя синхронная машина, питаемая от инвертора, имеет более простую систему управления, что немаловажно, учитывая высокую стоимость преобразователей. Стоит отметить что, достигнутые в последнее время успехи в материаловедении и технологии производства постоянных магнитов позволяют создавать бесконтактные синхронные машины по многим показателям находящиеся вне конкуренции.

Перспективным направлением в развитии машиностроения стало применение в конструкции ротора синхронных машин постоянных магнитов с редкоземельными элементами (РЗЭ). Примерами таких магнитов могут служить магниты SmCo, и NdFeB. Применение такого типа магнитов создаёт предпосылки для снижения массы и габаритов двигателей за счет новых рациональных технических решений, повышенных значений магнитной индукции в рабочей зоне, меньших размеров индуктора. Также применение ПМ с РЗЭ способствует снижению потерь (в том числе добавочных) и росту КПД, которые даже для машин средней мощности достигают уровня 96 - 97%. Конструкция ротора с ПМ имеет

низкий уровень электромагнитных шумов, благодаря большим величинам эквивалентных воздушных зазоров и что не маловажно – такая конструкция лишена щеточно-коллекторного узла в связи с наличием постоянного магнитного потока от ПМ, что значительно повышает надежность работы машины.

В данной работе будет проводиться исследование конструкций многополюсных роторов вентильного магнитоэлектрического двигателя на предмет возможности повышения активного момента с помощью различных инженерных решений.

В качестве объекта исследования выступает двигатель рулевой колонки (ДРК) с возбуждением от постоянных магнитов, с добавлением в состав магнитов редкоземельных элементов (NdFeB).

В системе рулевого управления автомобиля ЭД с ПМ является основным звеном, в значительной степени определяющим характеристики всей системы. Поэтому наиболее важными требованиями для ДРК в системе рулевого управления являются:

- высокие динамические показатели;
- высокие энергетические показатели;
- малые масса и габариты.

Динамические показатели электропривода усилителя рулевого управления определяются ДРК, но при этом зависят от момента инерции нагрузки и момента инерции вращающихся частей электрического двигателя (ЭД). В случае приведения момента инерции нагрузки к валу ЭД, приведённый момент инерции может составлять несколько процентов от момента инерции ротора ЭД, а может в несколько раз превышать момент инерции ротора ЭД. При учете описанного выше условия очень важно чтобы ЭМ вырабатывала максимально высокий номинальный момент вращения на валу.

Уменьшение габаритов и массы ЭМ с ПМ может быть достигнуто путём уменьшения числа пар полюсов машины при соответствующем изменении конструкции ротора или с помощью применения более технологически

совершенных материалов для ротора ЭМ и РЗЭ для ПМ. Однако уменьшение габаритов приводит к снижению энергетических показателей (КПД).

Одновременное выполнение всех вышеперечисленных требований является сложной и противоречивой задачей, для решения которой необходимо использовать методы оптимального проектирования, которые позволяют получить результат, приблизительно удовлетворяющий все из вышеперечисленных требований.

Целью работы является повышение активного момента исследуемого магнитоэлектрического двигателя для электроусилителя рулевого управления автомобиля, что позволит значительно повысить стабильность рулевого управления в динамике, а также даст возможность расширения спектра применения полученной электрической машины. Для этого будет разработана имитационная модель синхронного трехфазного исполнительного двигателя с многополюсным ротором и возбуждением от ПМ, с помощью которой будет проводиться анализ и оптимизация магнитной системы и разрабатываться технические решения по уменьшению массогабаритных показателей ДРК. Итогом работы должны послужить наглядные данные о повышении номинального крутящего момента, снижении пульсаций активного и реактивного момента, что значительно повысит стабильность системы рулевого управления как при постоянном, так и при динамически меняющемся моменте нагрузки на упругий элемент (торсион) ДРК.

Таким образом, выполнение работ по оптимизации магнитной системы двигателя рулевой колонки электрического усилителя рулевого управления автомобиля, а также уменьшения массогабаритных показателей является **актуальной научно-технической проблемой**.

В качестве предмета исследования выступают методы анализа СМ с ПМ для системы электрического усиления рулевого управления.

При решении поставленных задач применялись следующие **подходы** – для выполнения полного комплекса расчётов и моделирования применялось современное программное обеспечение (ПО). Современное ПО позволяет рассчитывать электромагнитные поля в двигателе с помощью численных методов,

что повышает точность расчетов, а также позволяет наглядно представить полученные результаты в виде графиков и картин поля. Решение проблемы расчета электромагнитного поля в ДРК может быть осуществлено путём создания модели физического поля в двигателе, построенной на основе метода конечных элементов (МКЭ) и последующего расчёта задачи в двухмерной постановке с применением метода планирования эксперимента (МПЭ), для получения максимально точных результатов расчёта при минимально возможном числе экспериментов по моделированию электромагнитных процессов в ДРК.

В качестве такого ПО был использован программный пакет ANSYS, который позволил выполнять сложный аналитический расчёт и оптимизацию ДРК, а также моделировать работу ДРК в составе ЭП ЭУР в динамике. Также были применены такие методы, как МКЭ и МПЭ.

В данной работе для **достижения поставленных целей решаются следующие задачи:**

- обзор видов и конструкций синхронных машин;
- изучение конструкторской и технической документации к представленной для моделирования машины;
- анализ требований к оптимизации магнитной системы ДРК и построения алгоритма разработки, анализа и оптимизации модели ДРК;
- определение критериев оптимальности ДРК;
- исследование возможных путей оптимизации магнитной системы ДРК;
- создание имитационной модели ДРК в ПО ANSYS Maxwell 2D;
- проведение экспериментальных исследований по моделированию работы ДРК в ПО ANSYS Maxwell 2D:
 - изменение соотношения сторон поперечного сечения магнитов при постоянстве его объёма;
 - изменение угла раскрытия магнитного потока магнита путем изменения положения магнита;
 - подбор новых высокотехнологичных материалов для ротора и ПМ;

- принципиальное изменение конструкции ротора и способа размещения ПМ);

- анализ полученных результатов и определение оптимальной конструкции ротора, положения ПМ на роторе, а также материалов, применяемых для ротора и ПМ.

Научная новизна работы заключается в разработке алгоритма построения имитационной модели на базе ПО ANSYS Maxwell 2D, а также в построении алгоритма анализа конструкции машины и оптимизации магнитной системы ДРК для ЭУР, который включает в себя имитационное моделирование ДРК, аналитический расчёт электромагнитного поля и временных зависимостей момента инерции и токов в обмотках машины с помощью МКЭ, а также применение МПЭ к полученным результатам.

1. ОБЗОР ВЕНТИЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

1.1 Описание классификации вентильных электродвигателей и определение объекта исследования

Электрические машины (ЭМ) – один из наиболее распространенных типов преобразователей энергии, поэтому их совершенствование является важнейшей задачей современной науки и техники.

Одним из рациональных путей расширения функциональных возможностей, повышения надежности и улучшения характеристик электрических машин является замена контактной коммутации, выполняемой щеточно-коллекторным узлом на бесконтактную коммутацию, выполняемую полупроводниковыми приборами силовой электроники.

Отличительной чертой вентильных электродвигателей (ВД) от других типов электрических машин является объединение в единой структуре электромеханического преобразователя энергии, собственно электрической машины, и управляемого полупроводникового коммутатора. Такое объединение обеспечивает бесконтактность при преобразовании энергии и тем самым, позволяет применять ВД в тяжелых эксплуатационных условиях: глубокого вакуума, пониженной и повышенной температуры, высокой влажности и агрессивных сред, когда требуется обеспечить низкий уровень электромагнитных помех.

По конструкции вентильные двигатели выполняются как синхронная машина. Они могут иметь цилиндрическое или дисковое исполнение.

Конструкция ВД цилиндрического типа содержит:

- 1 – статор с обмоткой, содержащей m -фаз (секций);
- 2 – ротор возбужденного и невозбужденного типа;
- 3 – подвижная часть датчика положения ротора (якорь ДПР);
- 4 – чувствительный элемент ДПР;
- 5 – обойма, на которой закреплён чувствительный ДПР.

Детали 4 и 5 образуют неподвижную часть ДПР, закрепленную на статоре. Таким образом конструктивное отличие вентильного двигателя от синхронной машины состоит в наличии датчика положения ротора.

Дисковые двигатели имеют ротор в виде одного или нескольких дисков, на которых закреплены постоянные магниты, образующие полюсную систему. По конструкции дисковые двигатели бывают двух типов. На рисунке 1 (б) двигатель имеет дисковый ротор 1, расположенный между двумя статорами 2 с обмоткой. Статоры 2 для снижения магнитных потерь выполняются из стальной ленты, выполненной из листов электротехнической стали, или прессованием из магнитопроводящего порошка. На рисунке 2 (в) двигатель имеет ротор в виде двух дисков 1 содержащих магниты, закрепленные на стальном магнитопроводе. Статор, расположенный между дисками 1 и в виде обмотки 2, закрепленной на дисковом диэлектрическом каскаде, как правило, не имеет участков, выполненных из магнитопроводящего материала.

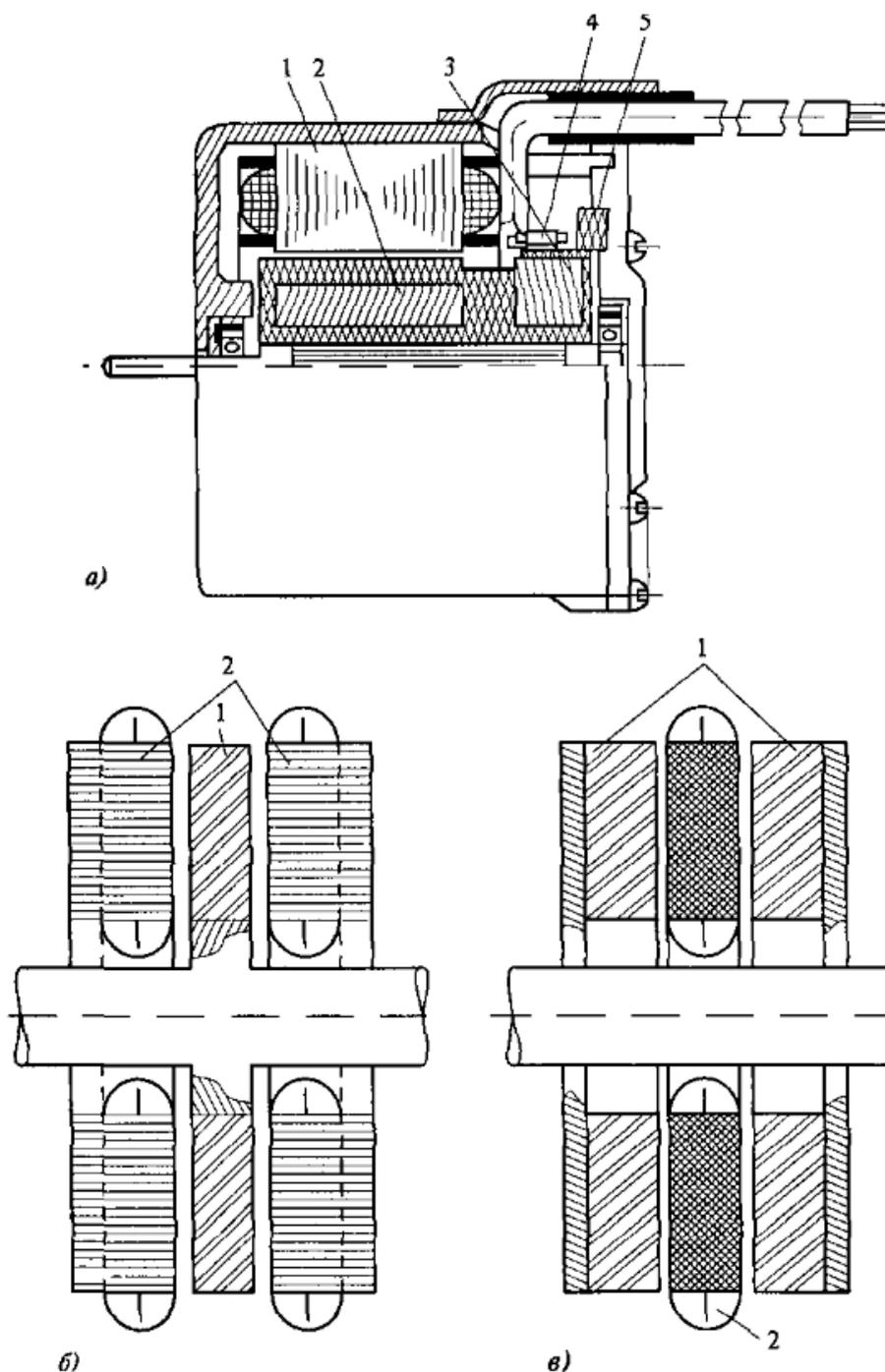


Рисунок 1 – Конструктивные схемы ВД цилиндрического (а) и дискового (б, в) исполнений

На рисунке 1 (а) ВД имеет глубокий подшипниковый щит 1 с размещённым в нём электромагнитным тормозом 2. Этот тормоз в некоторых случаях необходим, когда нужно заблокировать вал двигателя при пропадании напряжения питания. Этот узел поставлен как дополнительная опция и с точки зрения работы собственно двигателя не является обязательным. Далее двигатель имеет пакет статора с

обмоткой 3, размещенный в оребренном корпусе 4. Ротор 5 состоит из сердечника, на поверхность которого наклеены пластины ПМ. Датчики обратных связей (датчик положения ротора (ДПР) 6, бесконтактный тахогенератор 7 и импульсный датчик пути 8) пристыкованы к заднему щиту двигателя. Последний дает информацию о пути, пройденном рабочим органом привода, пересчитанным через обороты или доли оборотов ротора. Датчик пути 8 в ряде случаев не является необходимым элементом привода и также, как тормоз 2, поставлен в виде опции.

Дисковый двигатель на рисунке 1 (б) состоит из корпуса 1, и двух статоров с обмотками 2 и 4, между которыми вращается дисковый ротор 3 с постоянными магнитами. Двигатель при необходимости имеет электромагнитный тормоз 5. ДПР, бесконтактный тахогенератор и, если необходимо, датчик пути встроены в блок 6, который присоединен к валу и закрепляются на заднем щите двигателя.

Наиболее широкое распространение нашли цилиндрические двигатели. Применение дисковых двигателей чаще всего диктуется возможностями компоновки, где иногда требуется плоская конструкция исполнительного устройства.



Рисунок 2 – Классификация вентильных двигателей

ВД можно условно разделить три большие группы: на вентильные двигатели постоянного тока (ВДПТ), переменного тока и вентильно-индукторные.

Общим во всех ВД является наличие звена постоянного тока, в качестве которого может использоваться либо аккумуляторная батарея, либо источник вторичного электропитания – выпрямитель.

Основным отличием является тип применяемой ЭМ. ВДПТ строятся на базе СМ с ПМ, вентильные двигатели переменного тока – на базе АД, вентильно-индукторные двигатели (ВИД) – на базе индукторной машины.

Особенностью ВД, источником питания которых служит выпрямительные устройства, является то, что эти устройства как правило входят в состав ВД.

Конструктивно ДРК представляет собой ВДПТ цилиндрического типа, с наличием ДПР со 120-градусной коммутацией. Выбор конструкторами-разработчиками данной магнитоэлектрической машины обусловлен наилучшими динамическими, энергетическими и массогабаритными показателями из трех групп вентильных двигателей за счет применения в качестве системы возбуждения высокоэнергетических ПМ на основе РЗЭ.

По управлению ВДПТ и вентильные ЭП на их основе могут быть с векторным и скалярным управлением. Векторное управление имеет целый ряд преимуществ по сравнению со скалярным. Оно используется для получения высокой стабильности электромагнитного момента и частоты вращения, а также для обеспечения максимально широкого диапазона регулирования. Однако реализация векторного управления является сложной задачей, в частности из-за более сложного алгоритма управления, большего количества элементов, что в целом ухудшает массогабаритные показатели и надежность всей системы. Для формирования синусоидального сигнала необходим сложный датчик, который выдает 10^8 - 10^{16} сигналов.

Скалярное управление применяется в высокодинамичных и высокоскоростных электроприводах, где не требуется плавность хода и широкий диапазон частоты вращения. Данный способ управления может быть реализован как с датчиком, так и без датчика положения ротора. Наилучшую надежность и

быстродействие имеет система с датчиком положения ротора (ДПР). Для реализации скалярного управления необходим классический ДПР на элементах Холла, а также один из классических способов коммутации фаз: 120, 150, 180-градусная коммутация. Принципиальное отличие состоит в количестве одновременно коммутируемых фаз и длительности работы одного ключа. При 120-градусной коммутации одновременно коммутируются только две фазы, при 150-градусной в определенные моменты времени две фазы, в определенные моменты времени три фазы, при 180-градусной коммутации всегда все три фазы. При использовании 180-градусной коммутации несколько увеличиваются энергетические показатели ЭД, в частности полезная мощность ЭД. Увеличение энергетических показателей достигается за счет увеличения общего потребляемого тока ЭД за счет постоянного использования третьей фазы, которая не используется при 120-градусной коммутации.

Конструктивно ДРК построен с использованием ДПР со 120-градусной коммутацией фаз с применением скалярного управления как наиболее отработанные и надёжные способы.

1) Вентильные электродвигатели постоянного тока.

Вентильный электродвигатель постоянного тока (ВДПТ) - это электрическая машина постоянного тока, вентильное коммутирующее устройство которого представляет собой инвертор, управляющий либо по положению ротора, либо по положению магнитного поля.

Другими словами, синхронный двигатель, который питается от сети постоянного тока через полупроводниковый коммутатор, управляемый в функции углового положения ротора называется вентильным двигателем постоянного тока.

Инвертор – устройство преобразующие постоянный ток в переменный ток. Принцип действия ВДПТ можно представить на примере электродвигателя с двухполупериодным инвертором и синхронной машины с постоянными магнитами, имеющий трехфазную якорную обмотку, как наиболее распространенный, так как наряду с умеренной сложностью имеет широкие

функциональные возможности в части реализации регулировочных характеристик и высоких показателей по КПД, удельной энергоотдаче на единицу массы.

Электромеханическая часть ВДПТ представляет собой синхронную машину (СМ) с постоянными магнитами на роторе. В отличие от двигателя постоянного тока число секций в синхронной машине равно числу фаз. Электропитание от источника напряжения постоянного тока подается на инвертор напряжения (или преобразователь частоты).

Инвертор преобразует постоянное напряжение в переменное напряжение частота и фаза которого определяется ДПР. Переменное напряжение подается на обмотку СМ, которая работает в двигательном режиме, когда ось потока статора опережает ось потока ротора на угол φ , как показано на рисунке 5 и электродвигатель создает движущий вращающий момент. В коллекторной машине постоянного тока ось результирующего потока секций якорной обмотки отстает от оси потока возбуждения электродвигателя. Механические характеристики ВДПТ напоминают характеристики двигателя постоянного тока с независимым возбуждением, поэтому их также называют бесконтактными, бесколлекторными или бесщеточными двигателями постоянного тока. Отличие ВДПТ от коллекторного электродвигателя постоянного тока состоит в том, что у коллекторной машины поле обмотки возбуждения и поле обмотки якоря неподвижны в пространстве, а у ВДПТ поле якорной обмотки вращается синхронно с полем возбуждения ротора.

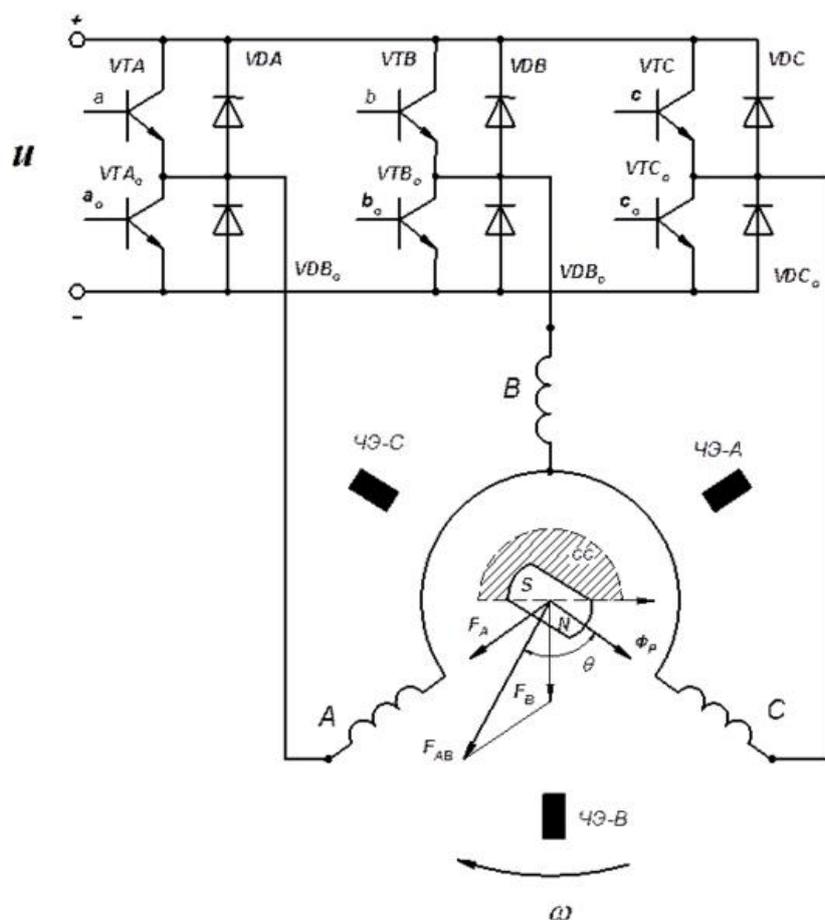


Рисунок 3 – Упрощенная схема трехфазного ВДПТ

Инвертор, питаемый от источника постоянного тока, играющий роль коммутатора выполнен по схеме трехфазного мостового инвертора на шести транзисторных ключах, что позволяет реализовать двухполярную коммутацию фаз обмотки якоря и обеспечить шесть дискретных положений вектора МДС в пространстве. Для защиты от напряжения обратной полярности, рекуперации электрической энергии в сеть постоянного тока при помогающей нагрузке, и организации тормозного момента и создания цепи, замыкающей ЭДС самоиндукции при выключении транзисторного ключа, каждый транзистор VTA, VTB, VTC, VTA₀, VTB₀, VTC₀ трехфазного мостового инвертора шунтируется обратным диодом VDA, VDB, VDC, VDA₀, VDB₀ и VDC₀, соответственно. Трехфазная обмотка якоря A, B, C, расположенная на статоре синхронной машины соединена в звезду без вывода общей точки.

Ротор СМ выполнен с постоянными магнитами, создающими полюсную систему N-S. Сигнальный сектор датчика положений ротора ДПР, занимает на окружности 180 электрических градусов и жестко связан с ротором СМ. Чувствительные элементы ЧЭ-А, ЧЭ-В, ЧЭ-С по количеству фаз якорной обмотки сдвинуты в пространстве на 120 электрических градусов и расположены на статоре СМ. При каждом повороте ротора на электрический угол, равный межкоммутационному интервалу $\alpha_k=60$ происходит очередное переключение фаз. Таким образом, управляющие сигналы ДПР обеспечивают автокоммутацию и синхронное увеличение частоты вращения ротора ω . До тех пор, пока вращающий момент ВДПТ превышает момент нагрузки на его валу, ротор будет ускоряться. При равенстве вращающего момента моменту сопротивления наступает установившийся режим — автокоммутация продолжается с постоянной частотой.

2) Вентильные электродвигатели переменного тока.

ВД переменного тока – это бесконтактная машина переменного тока обмотка якоря, которой связана с внешними цепями через вентильное коммутирующее устройство и у которого отношение частоты вращения ротора к частоте тока цепи, подключенной к машине, зависит от нагрузки и может быть изменено за счёт фазового положения импульсов управления, подаваемых на вентили. ВД переменного тока, содержит ротор, статор с трехфазной рабочей обмоткой, соединенной в звезду, и трехфазную обмотку управления, подключенную к выходу мостового автономного инвертора, состоящего из ветвей на транзисторах различной проводимости, к базам которых подключены токоограничительные сопротивления. Причем она дополнительно содержит трехфазную синхронизирующую обмотку, каждый конец которой соединен с концом рабочей обмотки предыдущей фазы, а начала подключены к выходу мостового автономного инвертора, вторую трехфазную обмотку управления, каждый конец которой соединен с концом первой обмотки управления предыдущей фазы, вольтодобавочный трансформатор с тремя вторичными обмотками, начала которых соединены через токоограничительные сопротивления с базами транзисторов инвертора, а концы - с началами второй обмотки управления, и

первичной обмоткой, конец которой подключен к средней точке источника постоянного напряжения, образованной двумя конденсаторами одинаковой емкости, а начало - к нулевой точке звезды, образованной трехфазной рабочей обмоткой, а также полумостовой каскад на транзисторах, подключенный параллельно инвертору по цепи питания, управляемый от генератора.

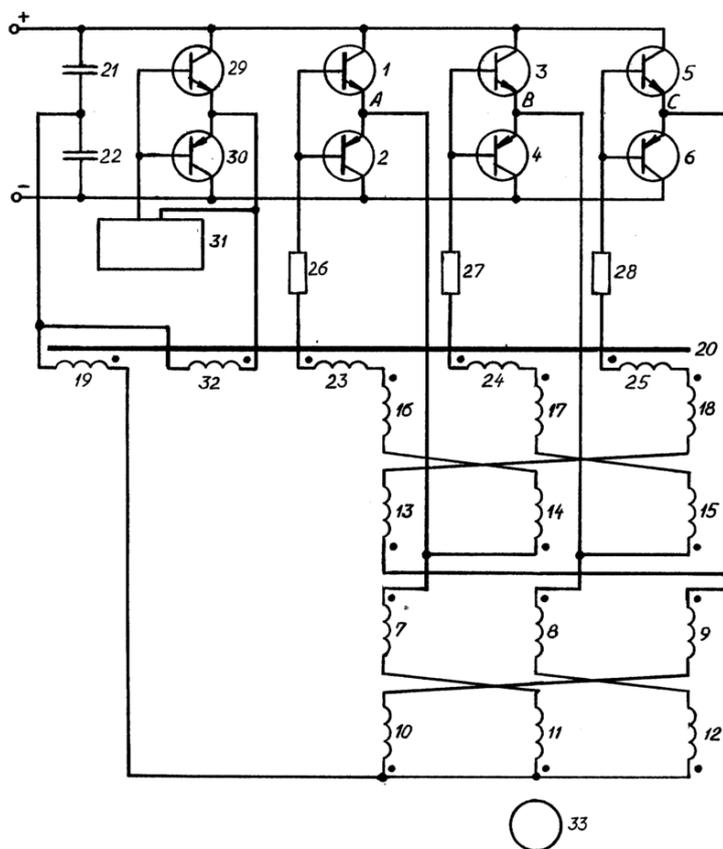


Рисунок 4 – Схема ВД переменного тока

Трехфазный мостовой инвертор, входящий в состав вентиляльной машины переменного тока, выполнен на транзисторах 1-6. Транзисторы 1 и 2, 3 и 4, 5 и 6 образуют комплементарные пары. К выходам трехфазного инвертора подключены начала синхронизирующей обмотки 7, 8, 9 соответствующих фаз. Концы синхронизирующей обмотки 7, 8, 9 соединены с концами рабочей обмотки 11, 12, 10 соответственно. Начала рабочей обмотки соединены в звезду. Концы первой обмотки управления 13, 14, 15 соединены с концами второй обмотки управления 16, 17, 18 соответственно. Начала первой обмотки управления 13, 14, 15 подключены к выходам фаз С, А, В инвертора. Начало первичной обмотки 19

вольтодобавочного трансформатора 20 соединено с нулевой точкой звезды, которую образует трехфазная рабочая обмотка, а конец - со средней точкой источника постоянного напряжения, образованной конденсаторами 21 и 22 одинаковой емкости. Начала вторичных обмоток 23, 24, 25 вольтодобавочного трансформатора подключены к токоограничительным сопротивлениям 26, 27, 28 соответственно, а концы вторичных обмоток 23, 24, 25 подключены к началам второй обмотки управления 16, 17, 18 соответственно. Дополнительный полумостовой каскад на комплементарных транзисторах 29, 30, управляемый задающим генератором 31, подключен параллельно трехфазному инвертору по цепи питания. Нагрузкой этого каскада является обмотка управления 32 вольтодобавочного трансформатора. Конец этой обмотки подключен к средней точке источника питания, начало - к выходу полумостового каскада. Период работы вентильной машины состоит из шести интервалов постоянства структуры одинаковой длительности. В течение каждого интервала постоянства структуры открыты три какие-либо транзистора инвертора и одна из фаз находится в области насыщения.

3) Вентильно-индукторные двигатели (ВИД).

ВИД – это относительно новый тип электромеханического преобразователя энергии, который сочетает в себе свойства и электрической машины, и интегрированной системы регулируемого электропривода. Как всякий электродвигатель, он обеспечивает преобразование электрической энергии, которая поступает от питающей сети, в механическую энергию, передаваемую в нагрузку. Как система регулируемого электропривода, ВИД дает возможность осуществлять управление этим процессом в соответствии с особенностями конкретной нагрузки: регулировать частоту вращения, момент, мощность и так далее.

ВИД представляет собой достаточно сложную электромехатронную систему, структурная схема которой приведена на рисунке 5.

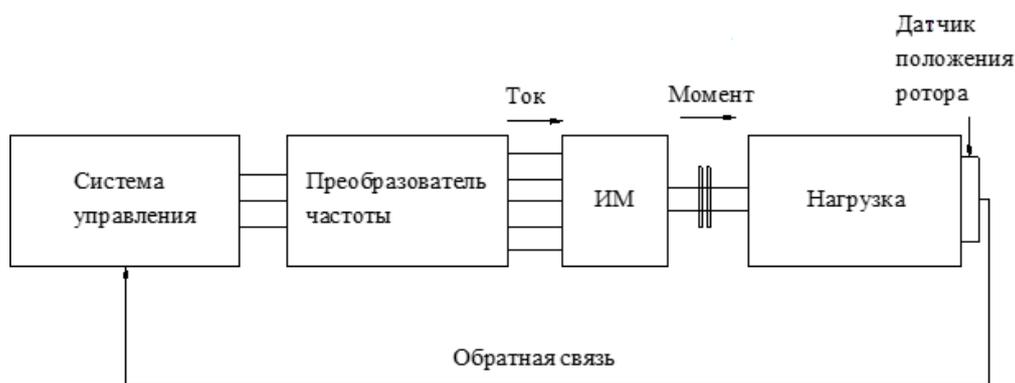


Рисунок 5 – Структурная схема ВИД

В её состав входят: индукторная машина (ИМ), преобразователь частоты, система управления и ДПР. Функциональное назначение этих элементов ВИД очевидно: преобразователь частоты обеспечивает питание фаз ИМ однополярными импульсами напряжения прямоугольной формы; ИМ осуществляет электромеханическое преобразование энергии, система управления в соответствии с заложенным в нее алгоритмом и сигналами обратной связи, поступающими от датчика положения ротора, управляет данным процессом.

По своей структуре ВИД ничем не отличается от классической системы регулируемого электропривода. Именно поэтому он и обладает всеми ее свойствами. Однако в отличие от регулируемого электропривода, например, с асинхронным двигателем, ИМ в ВИД не является самодостаточной. Она принципиально неспособна работать без преобразователя частоты и системы управления. Преобразователь частоты и система управления являются неотъемлемыми частями ИМ, необходимыми для осуществления электромеханического преобразования энергии. Это дает право утверждать, что совокупность структурных элементов, представленных на рисунке 5, является не только системой регулируемого электропривода, но и электромеханическим преобразователем энергии.

Входящая в состав ВИД индукторная машина приведена на рисунке 6.

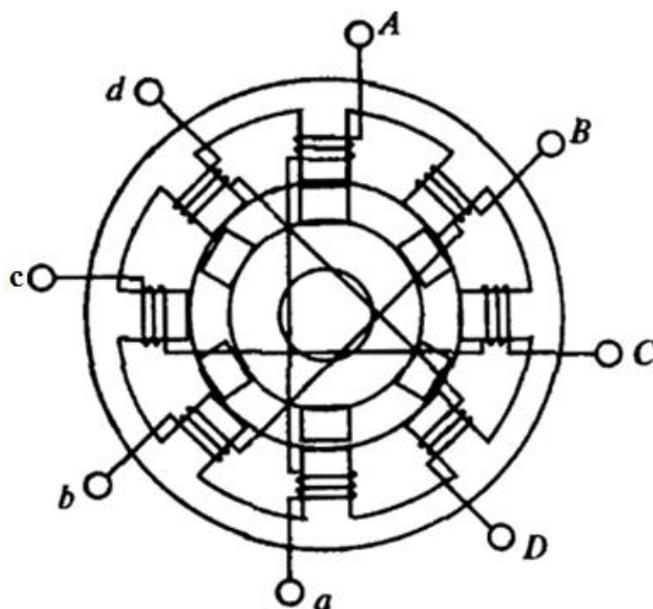


Рисунок 6 – Конструктивная схема ИМ

Конструктивные особенности данной ИМ:

- 1) Сердечник ротор и статора имеют явнополюсную структуру;
- 2) Число полюсов статора больше числа полюсов ротора;
- 3) Сердечники ротора и статора выполняются шихтованными;
- 4) Обмотка статора – сосредоточенная, она может быть одна;
- 5) Фаза ИМ, как правило, состоит из двух катушек, расположенных на диаметрально расположенных полюсах статора;
- б) Катушки фазы в электрическом отношении могут быть включены параллельно или последовательно, в магнитном - согласно или встречно.

Конструктивно ИМ, преобразователь частоты и система управления в ВИД могут быть выполнены раздельно. При этом в процессе работы они могут находиться на достаточно большом удалении друг от друга. В последнее время в мире наблюдается устойчивая тенденция выполнения преобразователя частоты и двигателя в системе регулируемого электропривода в одном корпусе. В ВИД интегральное исполнение преобразователя частоты и ИМ является более выгодным по сравнению с частотно–управляемым асинхронным приводом. Дело в том, что в отличие от асинхронной, фазы индукторной машины электрически не связаны между собой. Таким образом, если для соединения 3-х фазного асинхронного двигателя с преобразователем частоты требуется три провода, то для 3-х фазной

индукторной машины – шесть. Очевидно, что увеличение числа фаз ведет к увеличению числа соединительных проводов. Следовательно, использование интегрального исполнения ВИД позволяет существенно снизить расход соединительных проводов или кабелей.

Принцип действия ВИД основан на свойстве ферромагнитных тел ориентироваться во внешнем магнитном поле таким образом, чтобы пронизывающий их магнитный поток принимал максимальное значение. Рассмотрим принцип действия ВИД. На рисунке 7 показано так называемое рассогласованное взаимное положение сердечников статора и ротора для фазы А этой машины.

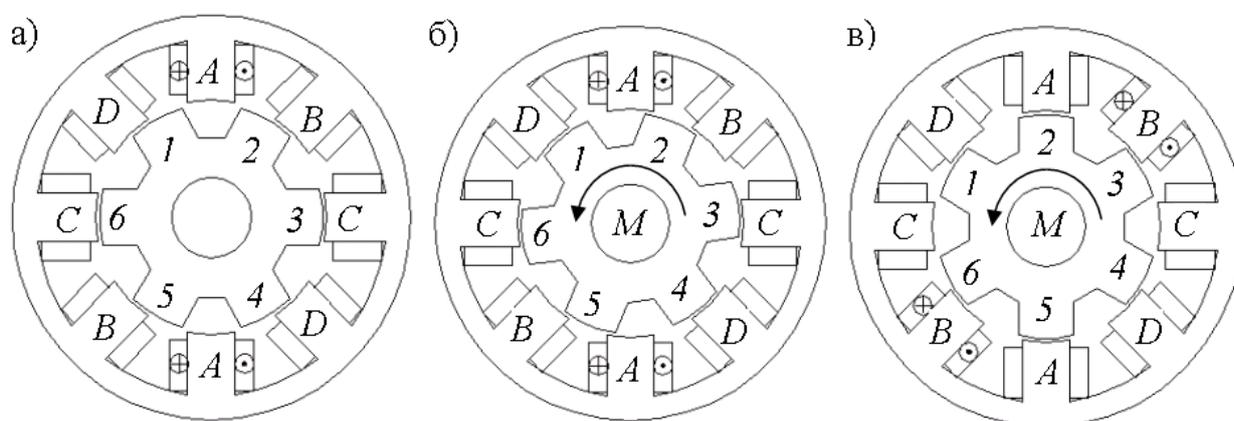


Рисунок 7 – Пояснение принципа действия ВИД: а) рассогласованное положение сердечников для фазы А; б) промежуточное положение сердечников для фазы А; в) согласованное положение сердечников для фазы А

Рассогласованным положением сердечников статора и ротора для некоторой фазы ИМ называется такое положение, при котором ось каждой катушки этой фазы совпадает с одной из осей ротора, то есть зубцы фазы располагаются строго напротив пазов ротора. Это положение характеризуется минимальным значением индуктивности фазы и магнитного потока, сцепленного с ней, что объясняется максимальным значением магнитного сопротивления зазора между сердечниками. В теории ВИД рассогласованное положение одной из фаз принимается за начало отсчёта углового положения сердечников статора и ротора. В данном случае за начало отсчёта принято рассогласованное положение фазы А. Предположим, что в

этом положении по сигналу системы управления произойдет коммутация ключей преобразователя частоты и к фазе А будет приложено постоянное напряжение U_A , тогда по катушкам фазы потечет ток i_A , который создаст МДС F_A . Эта МДС, в свою очередь, возбudit в машине магнитное поле.

В магнитном поле фазы А ротор будет стремиться ориентироваться таким образом, чтобы магнитный поток, пронизывающий его, принял максимальное значение. При этом на сердечники статора и ротора будут действовать одинаковые по значению и обратные по направлению пондеромоторные силы (ПС) тяжения. Очевидно, что силы, действующие на 1^{ый} и 4^{ый} зубцы ротора, будут стремиться повернуть его по часовой стрелке, а силы, действующие на 2^{ой} и 5^{ый} зубцы – против. В силу того, что ротор в данном положении симметричен относительно оси возбужденной фазы, равнодействующая азимутальной составляющей этих сил будет равна нулю. Таким образом, в рассогласованном положении ИМ и ВИД не развивают вращающего момента. Рассогласованное положение представляет собой точку неустойчивого равновесия. Действительно, если под действием какого-либо внешнего воздействия ротор отклонится от рассогласованного положения в том или ином направлении, то равнодействующая азимутальных составляющих ПС сердечников уже не будет равна нулю. Следовательно, возникнет вращающий момент, который будет стремиться повернуть ротор в направлении от рассогласованного положения. Возьмём другое положение ротора, показанное на рисунке 7 (б). Здесь фаза А имеет большее потокосцепление и индуктивность, чем в рассогласованном положении, что объясняется меньшей величиной зазора между сердечниками. При этом равнодействующая азимутальных составляющих ПС сердечников отлична от нуля, и созданный ею электромагнитный момент стремится повернуть ротор ИМ против часовой стрелки.

Вращение ротора будет продолжаться до тех пор, пока он не займет положение, показанное на рисунке 7 (в). Оно называется согласованным положением фазы А. Согласованным положением сердечников статора и ротора ИМ для какой-либо фазы называется такое положение, при котором ось каждой

катушки этой фазы совпадает с одной из осей ротора, то есть зубцы фазы располагаются строго напротив полюсов ротора.

Это положение характеризуется максимальным значением индуктивности фазы и сцепленного с ней магнитного потока, что объясняется минимальной величиной магнитного сопротивления зазора между сердечниками. В этом положении ПС притяжения сердечников имеют только радиальные составляющие. В силу чего вращающий момент ИМ в этом положении равен нулю. Согласованное положение представляет собой точку устойчивого равновесия. Действительно, если под действием какой-либо внешней силы ротор отклонится от согласованного положения в ту или иную сторону, то возникший электромагнитный момент будет стремиться вернуть его в согласованное положение.

1.2 Электромеханические преобразователи в ВДПТ

1.2.1 Классификация конструкций

В качестве синхронных машин для прецизионного прямого ЭП в основном используются машины с возбуждением от постоянных магнитов и реактивные машины. Токонесущая часть этих машин (якорь) выполняется главным образом с пазовыми обмотками. Синхронные машины с возбуждением от постоянных магнитов используются чаще, чем реактивные синхронные машины (РСМ). Это обусловлено лучшей энергоемкостью СМПМ, малыми электромеханическими и электромагнитными постоянными времени и простотой математического описания, что позволяет использовать относительно простые средства управления. Синхронные машины с постоянными магнитами бывают неявнополюсными и явнополюсными. В неявнополюсных СМПМ индуктивности фаз не зависят от положения подвижной части, а в явнополюсных — зависят.

Реже в прямых ЭП используются редукторные машины с возбуждением от постоянных магнитов или реактивного типа, иногда такие машины называют шаговыми (гибридными при наличии возбуждения от постоянных магнитов и реактивными - при отсутствии возбуждения). С редукторными машинами невозможно достижение высоких скоростей. Кроме того, в редукторных машинах с

возбуждением от постоянных магнитов присутствует сильный знакопеременный зубцовый момент.

Некоторые примеры конструкций синхронных машин для прецизионного прямого ЭП рассмотрены далее.

1.2.2 Редукторные машины

Конструкция индукторного ШД с возбуждением от постоянных магнитов, или двухфазного гибридного ШД, показана на рисунке 8. Статор двигателя имеет восемь полюсов с несколькими зубцами на каждом.

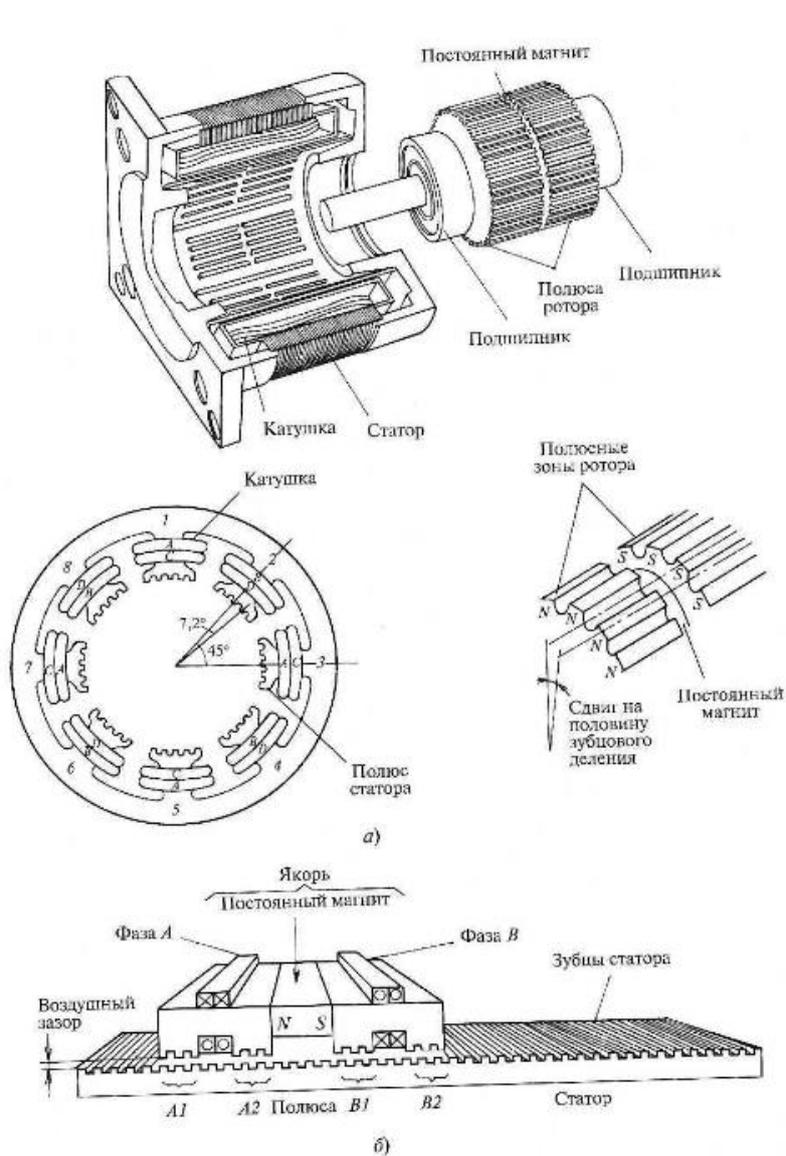


Рисунок 8 – Редукторные (шаговые) двигатели с возбуждением от постоянных магнитов: а) вращающиеся; б) линейный

На каждом полюсе бифилярно намотаны катушки A и C , $A1$ и $C1$, ..., $B1$ и $D1$. Катушки на полюсах A , $A1$ соединяются (например, последовательно) для получения фазной обмотки A . Аналогично устроена фазная обмотка C . Фазные обмотки A и C соединяются встречно-параллельно, образуя фазу a . Аналогично включаются катушки полюсов B , $B1$ и Z , $D1$, образующие фазу p . Ротор имеет две полюсные зоны N и S , подмагничивание которых создается аксиально размещенным между ними постоянным магнитом. Каждая из зон ротора имеет по z_r зубцов. Зубцы северной зоны повернуты на половину зубцового деления относительно зубцов южной зоны. Конструкция гибридного ШД с внешним ротором (обращенного типа), оптимизированная (за счет большого диаметра и соответственно момента) для применения в качестве моментного двигателя, показана на рисунке 9.



Рисунок 9 – Конструкция гибридного моментного двигателя Dynaserv (по данным компании CompuMotor)

Конструкции редукторных реактивных моментных двигателей показаны на рисунке 10. В двигателе DDM 2225 фазные модули выполнены на E-образных электромагнитах, что устраняет взаимные индуктивные связи между фазами. В обоих двигателях полюсное деление ротора мало, что позволяет использовать

зубцы ротора для модуляции потоков встроенных датчиков положения типа редуктосинов.

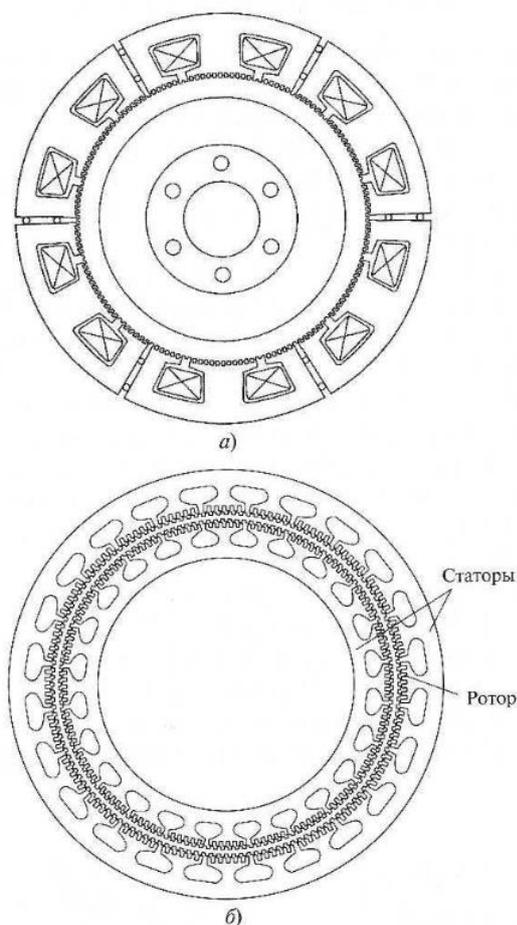


Рисунок 10 – Конструкции редукторных реактивных моментных двигателей:

а) DDM 2225 компании Superior Electric; б) Megatorque компании NSK

Редукторные машины линейного типа, или ЛШД с возбуждением от постоянных магнитов, собирают из элементарных модулей (рисунок 11). Модуль ЛШД состоит из якоря, образованного электромагнитами, и индуктора. Электромагнит содержит два П-образных сердечника с одной (для однофазного модуля) или двумя (для двухфазного модуля) катушками и постоянным магнитом возбуждения. На поверхностях полюсов электромагнитов оформлены (фрезерованием или травлением) якорь в данном примере содержит по четыре однофазных модуля в горизонтальной и вертикальной своих частях. Такое число однофазных модулей минимально для обеспечения баланса нормальных сил притяжения относительно центра масс якоря при его коммутации, хотя, в

принципе, для работы двигателя достаточно иметь по два однофазных модуля в каждой из частей якоря.

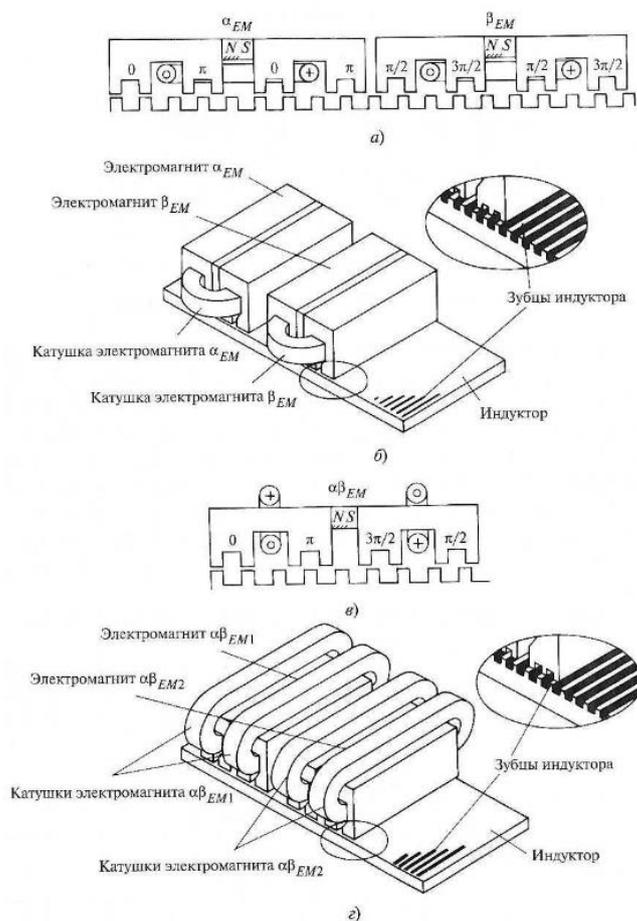


Рисунок 11 – Схемы и конструкции ЛШД:

а) схема ЛШД из двух однофазных модулей; б) конструкция ЛШД из двух однофазных модулей; в) схема ЛШД на базе двухфазного модуля; г) конструкция ЛШД из двух двухфазных модулей

Распространенный тип конструкции планарного ЛШД (ПЛШД) использует совмещенную взаимно перпендикулярную нарезку пазов на рабочей поверхности статора (индуктора) и ортогональное размещение модулей, образующих осевые двигатели X и Y (рисунок 11). Подвижный якорь ПЛШД удерживается над рабочей поверхностью индуктора с помощью интегрированных аэроэластических опор и содержит две пары осевых двигателей (в данном примере — на базе однофазных модулей). Каждая пара осевых двигателей обеспечивает перемещение якоря по одной из взаимно перпендикулярных координат X и Y . Число двигателей каждой координаты вдвое больше принципиально достаточного минимума,

обеспечивающего линейное перемещение. Это, как и в ЛШД, также объясняется необходимостью баланса нормальных и тяговых сил всех модулей относительно центра масс подвижного якоря. Вид якоря ПЛШД производства компании Normag показан на рисунок 12.

В гибридных ЛШД взаимодействие поля возбуждения постоянного магнита и поля обмотки двигателя (т.е. создание усилия) происходит в зубцовых зонах якоря и индуктора из-за их стремления совместиться. Это, как и в чисто реактивной машине, создает принципиальное ограничение на развиваемое усилие из-за насыщения зубцов: плотность усилия ЛШД достигает только $1,5 \text{ Н/см}^2$. У ПЛШД, в силу прерывности зубцов индуктора, плотность усилия еще меньше, чем у ЛШД (около 1 Н/см^2). Насыщение не позволяет значительно форсировать усилие ЛШД: пиковое усилие ЛШД на форсированных токах обычно не превышает $1,5$ продолжительного усилия, тогда как в СМППМ (линейных и вращающихся) насыщение проявляется слабо из-за большого воздушного зазора, и кратность пикового усилия (момента) СМППМ, равная $2-3$, ограничивается только допустимым превышением температуры обмоток. Типичные параметры гибридных ЛШД (данные компании «Рухсервомотор») приведены в таблице 1.

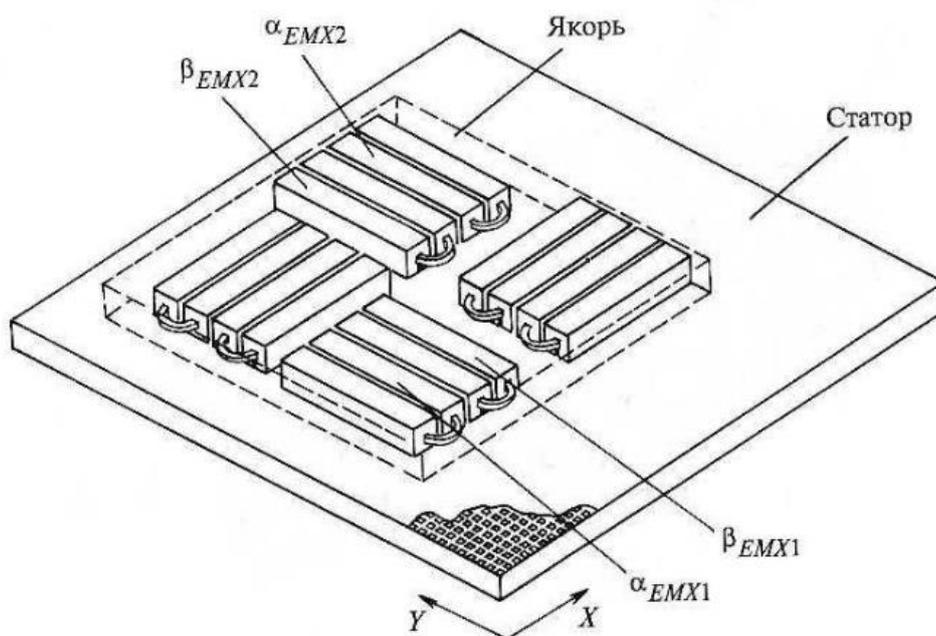


Рисунок 12 – Схема построения ПЛШД с совмещенной нарезкой индуктора

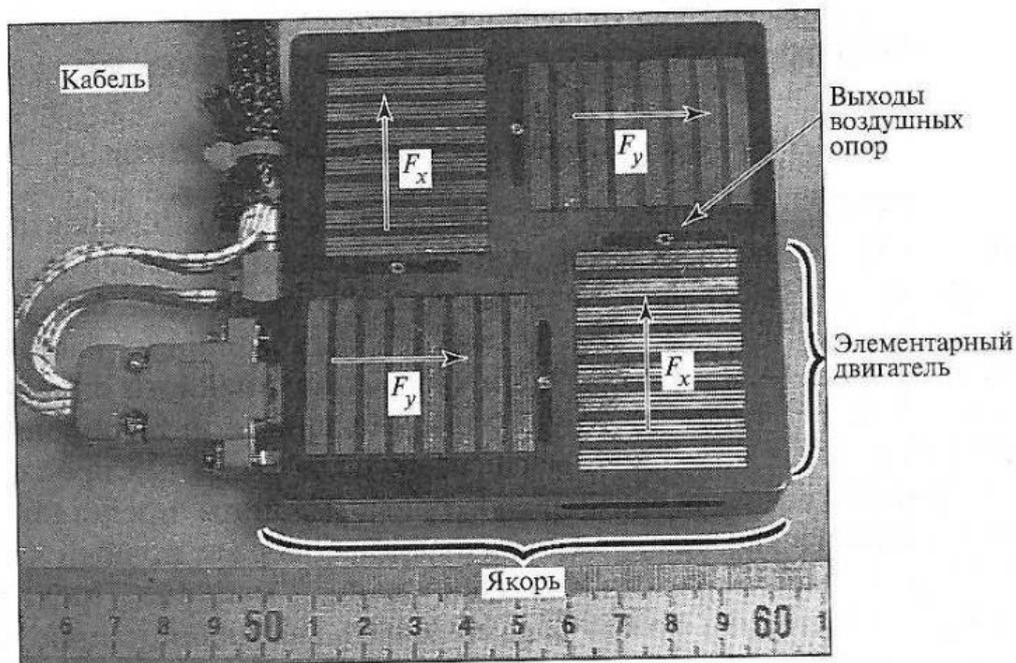


Рисунок 13 – Конструкция якоря ПЛШД типа 4ХУ1302-2 с зубцовым делением 1,016 мм, продолжительным усилием по оси 26 Н, амплитудой тока фазы 2 А, массой 1,6 кг (вместе с оптикой интерферометра)

Таблица 1 – Параметры гибридных ЛШД

Параметр	ЛШД	ПЛШД
Масса якоря, кг	0.6 – 3.3	0.7 – 4.3
Продолжительное усилие по оси (осям), Н	50 – 400	25×25 – 180×180
Скорость при холостом ходе, м/с	2.5	1.5
Максимальное ускорение, м/с ²	40	30
Давление источника сжатого воздуха для питания воздушной опоры, МПа	0.2 – 0.3	0.2 – 0.3

1.2.3 Неявнополюсные синхронные машины с постоянными магнитами

Конструкция типичной неявнополюсной синхронной машины с пазовым статором и с постоянными магнитами показана на рисунке 14. Машина состоит из двух частей: неподвижной — статора и подвижной — ротора. Корпус статора выполняется из стали или алюминия и содержит наборный пакет якоря из электротехнической стали с обмоткой. Обмотка размещена в пазах внутренней поверхности пакета якоря и содержит две или три фазы. Обмотка для механической прочности пропитана эпоксидной смолой. Статор снабжен металлическим экраном

для ослабления излучаемых электромагнитных помех. При работе с форсированным моментом может использоваться жидкостное охлаждение. Для жидкости в корпусе статора имеются специальные каналы.



Рисунок 14 – Конструкция неявнополюсной СМПМ с пазовым статором производства компании Etel

Переменное магнитное поле статора слабо проникает в ротор из-за большого воздушного зазора, поэтому потери в стали ротора малы, и ротор часто выполняется сплошным. Для простоты изготовления ротор иногда выполняется и из листов стали. Постоянные магниты наклеиваются на поверхность ротора. Магниты или никелируются, или покрываются эпоксидным лаком для защиты от коррозии. Пары магнитов имеют разнополярную намагниченность. Благодаря большому зазору распределение индукции намагничивания вдоль зазора близко к синусоидальному. Взаимодействие синусоидальных в функции положения ротора токов с переменным полем постоянных магнитов создает примерно постоянный момент машины в режиме ВД.

Типичные параметры неявнополюсных СМПМ для прямого ЭП производства компании Etel приведены в таблице 2.

Меньшие скорости и ускорения соответствуют большим моментам.

Еще один вариант конструкции неявнополюсной СМПМ, приближенный к элементарной машине, – с распределенной обмоткой и скосом пазов статора –

приведен на рисунке 15, где показаны бескорпусное и корпусное исполнения машины.

Таблица 2 – Типичные параметры неявнополюсных синхронных машин с постоянными магнитами для прямого электропривода

Параметр	Конвекционное охлаждение	Жидкостное охлаждение
Диаметр статора, мм	120 – 1260	120 – 1260
Продолжительный момент, Н·м	1 – 5000	1 – 15000
Пиковый момент, Н·м	1 – 5000	5 – 15000
Максимальная допустимая частота вращения, об/мин	600 – 55	600 – 55
Угловое ускорение при продолжительном моменте, рад/с ²	10000 – 170	10000 – 500

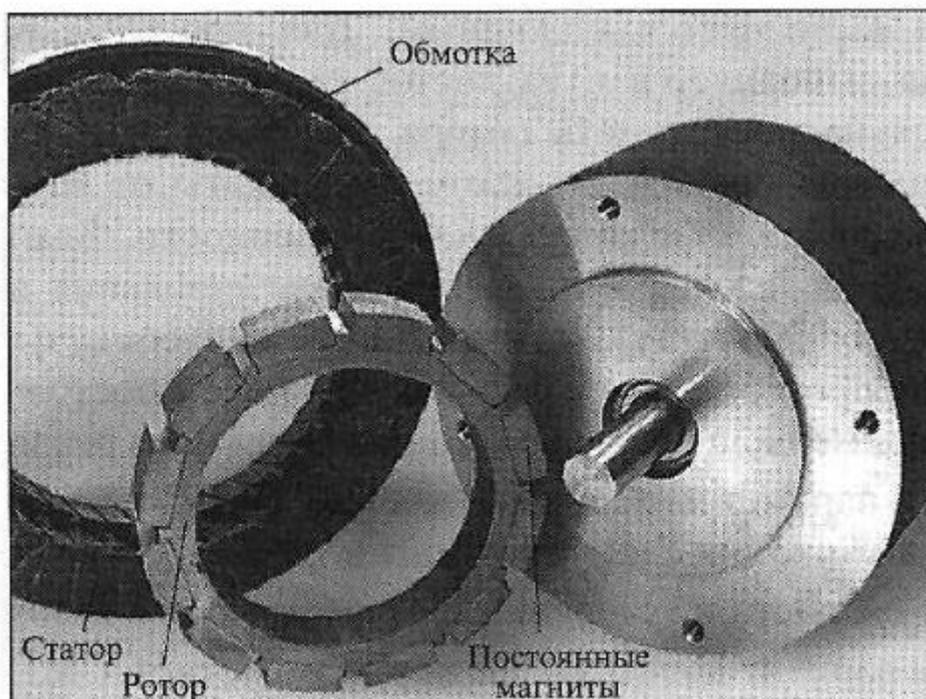


Рисунок 15 – Конструкция неявнополюсной СМППМ с пазовым статором производства компании Kollmorgen

Конструкция и принцип действия неявнополюсной линейной СМППМ с пазовым якорем показана на рисунке 16. Машина состоит из двух частей: неподвижной — статора и подвижной — якоря пазовой конструкции. Статор состоит из стального основания с наклеенными на него постоянными магнитами.

Взаимодействие токов фаз, размещенных в пазах якоря, с квазисинусоидальным полем постоянных магнитов статора создает усилие машины.

Длина хода машины определяется длиной статора. Якорь имеет относительно малую длину. Токосвод к якорю осуществляется по гибкому кабелю. Для ослабления излучения электромагнитных помех якорь помещается в металлический экран. Линейная СМППМ с пазовым якорем имеет большие усилия, чем линейные машины остальных типов, при одинаковых габаритных размерах: плотность длительного усилия на единицу площади якоря у машин этого типа достигает 8 Н/см^2 при дополнительном водяном охлаждении. У них также большие масса якоря и тепловая постоянная, позволяющие развивать значительные кратковременные усилия. Недостаток пазовой конструкции — сильное нормальное притяжение якоря к магнитам, примерно в 15 раз превосходящее тангенциальное усилие. Иногда это полезно для предварительной нагрузки механических опор, а чаще — вредно, так как создает сухое трение. Применение воздушных опор устраняет сухое трение, но усложняет конструкцию машины.

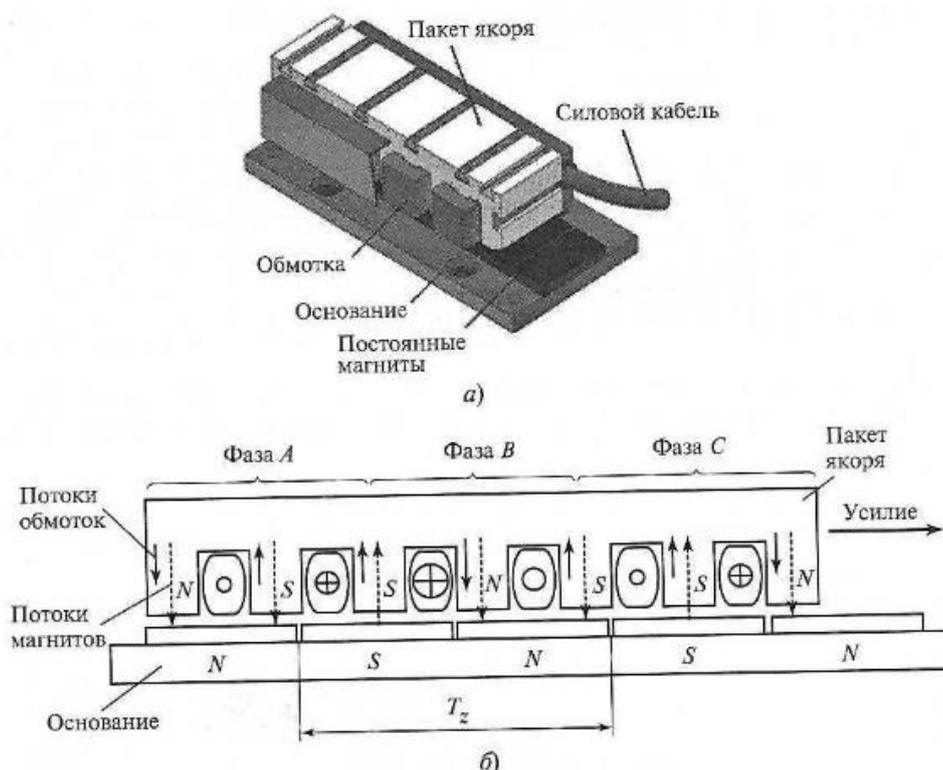


Рисунок 16 – Конструкция линейной неявнополюсной СМППМ с пазовым якорем и принцип ее действия

Другой недостаток пазовых линейных СМППМ – значительное знакопеременное зубцовое (фиксирующее) усилие, создающее возмущения в ЭП с такой машиной. Чаще всего машины этого типа используются в позиционных приводах и в машиностроении (например, во фрезерных станках). Типичные параметры неявнополюсных пазовых линейных СМППМ (на примере машин компании «Рухсервомотор») приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Типичные параметры неявнополюсных пазовых линейных СМППМ

Параметр	Конвекционное охлаждение	Жидкостное охлаждение
Масса якоря, кг	2 – 36	2 – 36
Продолжительное усилие, Н	90 – 2700	220 – 6700
Пиковое усилие, Н	320 – 9500	5 – 9500
Максимальная скорость, м/с	50 – 3.1	50 – 3.1
Ускорение при продолжительном усилии, м/с ²	45 – 75	45 – 75

Внешний вид и конструкция неявнополюсной линейной СМППМ с беспазовым якорем показаны на рисунке 17. Машина состоит из двух частей: неподвижного U-образного нешихтованного статора с двумя рядами постоянных магнитов, наклеенных на стальные замыкатели магнитного потока, и подвижного плоского якоря беспазовой конструкции, состоящего из катушек, залитых эпоксидной смолой. Линейные СМППМ с беспазовым якорем имеют меньшие усилия, чем пазовые СМППМ, так как у них больше зазор и меньше индукция. Плотность продолжительного усилия на единицу площади якоря у этой машины 5 Н/см² и менее, однако, благодаря отсутствию железа в якоре нет зубцовых усилий и минимальны нормальные усилия. Также малы потери в стали (точнее — потери на вихревые токи в постоянных магнитах). Все это уменьшает возмущения и вязкое трение в ЭП и позволяет реализовать точные движения, например, при лазерной обработке. Беспазовые СМППМ также находят применение в машинах с высокими ускорениями (производство полупроводников, сортировка кристаллов, сварка, пайка).

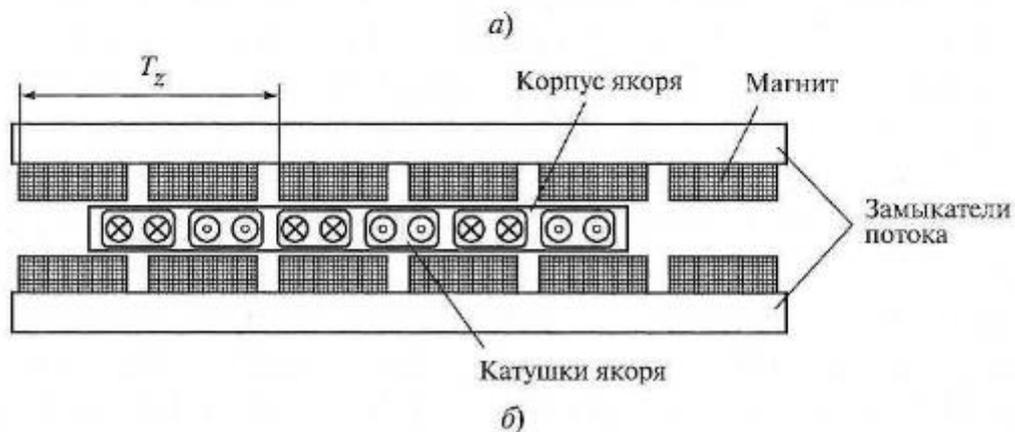
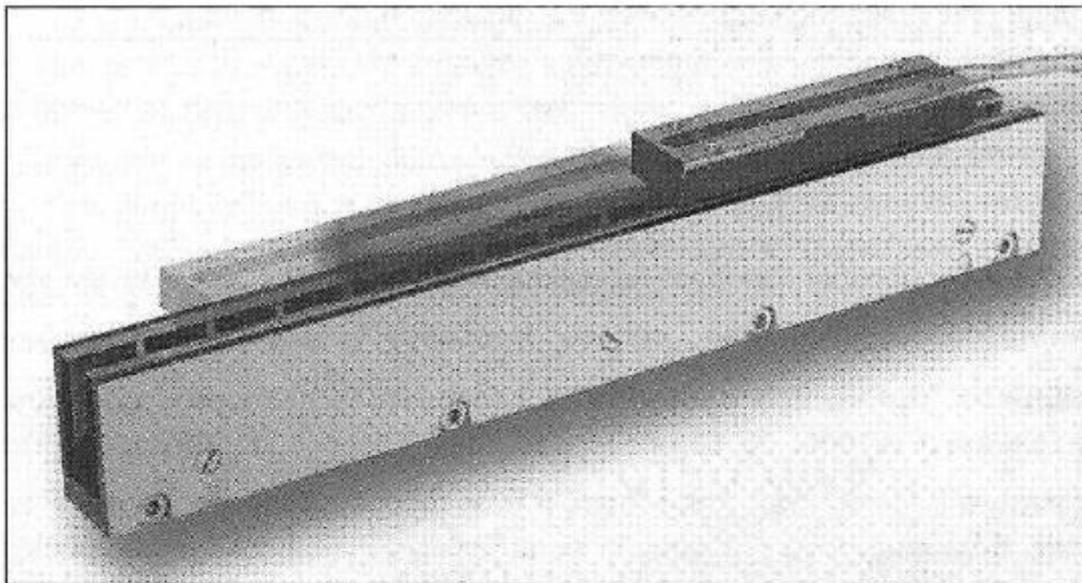


Рисунок 17 – Внешний вид (а) и конструкция (б) неявнополюсной линейной СМПМ с беспазовым якорем

Таблица 4 – Типичные папрметры неявнополюсных беспазовых линейных СМПМ

Параметр	Конвекционное охлаждение
Масса якоря, кг	0.19 – 2.44
Продолжительное усилие, Н	20 – 480
Пиковое усилие, Н	80 – 1920
Максимальная скорость, м/с	25 – 6.5
Ускорение при продолжительном усиллии, м/с ²	130 – 196

Беспазовые СМПМ для особо прецизионных применений могут оснащаться воздушными опорами, воздушным охлаждением и иметь двухфазную обмотку, позволяющую формировать несинусоидальные токи фаз, не зависящие друг от друга. Типичные параметры неявнополюсных беспазовых линейных СМПМ (на примере машин компании VUES) приведены в таблице 4.

1.2.4 Явнополюсные синхронные машины с постоянными магнитами

Конструкция статора явнополюсной СМППМ повторяет конструкцию статора неявнополюсной машины. Особенность явнополюсной СМППМ – в конструкции ротора с магнитно-мягкими участками между постоянными магнитами возбуждения, что создает реактивный момент, дополнительный к магнитоэлектрическому. Примером может быть конструкция ротора двигателя типа ДБМ с коллекторной схемой размещения постоянных магнитов (рисунок 18). В этой конструкции магнитный поток соседних магнитов концентрируется в магнитно-мягких клиновидных полюсах-сегментах ротора. Магниты с внешней стороны зафиксированы сварным кольцом из немагнитной металлической ленты. От вала магниты отделены немагнитной втулкой. Ширина магнита больше половины ширины полюса-сегмента. За счет этого индукция в зазоре выше, чем в магните. Таким образом, получается концентрация потока возбуждения и увеличивается момент машины, но усложняется ее конструкция.

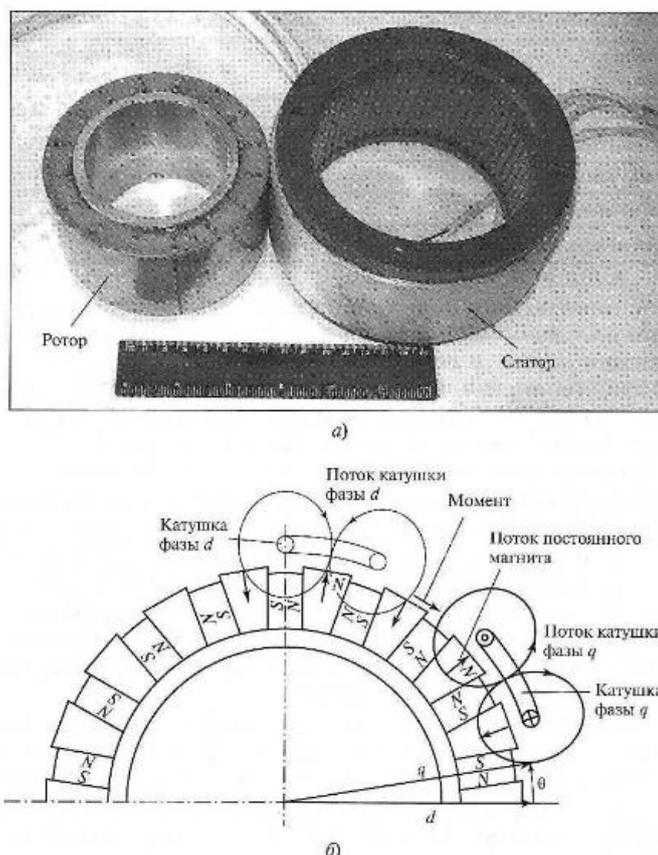


Рисунок 18 – Внешний вид (д) и конструкция вращающейся СМППМ с инверсной явнополюсностью (б)

Рассмотренная машина имеет так называемую инверсную явнополюсность, т.е. преобладание «поперечной» взаимной индуктивности статора и ротора над «продольной». Эта особенность поясняется рисунке 18, из которого видно, что собственный поток эквивалентной фазы q («поперечная» ось) статора замыкается через два полюса и один магнит ротора, а собственный поток эквивалентной фазы d («продольная» ось) статора замыкается через один полюс и два магнита ротора. Магнитная проводимость постоянного магнита мала, поэтому магнитная проводимость у фазы q статора больше, чем у фазы d . Соответственно индуктивность фазы q больше, чем фазы d . Вопросы связи конструкции ротора СМППМ и соотношений ее индуктивностей по осям d и q подробно рассмотрены в. Примеры конструкций роторов СМППМ с различной явнополюсностью показаны на рисунке 19. Надо отметить, что в конструкциях на рисунке 19, *в*, *ж* и *з* вал должен быть немагнитным. Некоторые параметры явнополюсных СМППМ типа ДБМ с пазовым статором приведены в таблице 5. Машины такой конструкции применяются в вентильных двигателях усилителей рулевого управления (ЭУР). Линейные явнополюсные машины также существуют. На рисунке 19 приведены схемы двух типов линейных СМППМ пазовой конструкции: неявнополюсный и явнополюсный с инверсной явнополюсностью. Индукция в зазоре явнополюсной СМППМ меньше из-за паразитного замыкания потоков рассеяния постоянных магнитов через полюсные наконечники. Однако инверсная явнополюсность позволяет при управлении с так называемой опережающей коммутацией достигнуть большей скорости холостого хода, чем у неявнополюсной машины. Конкретный пример: 13 м/с против 8 м/с.

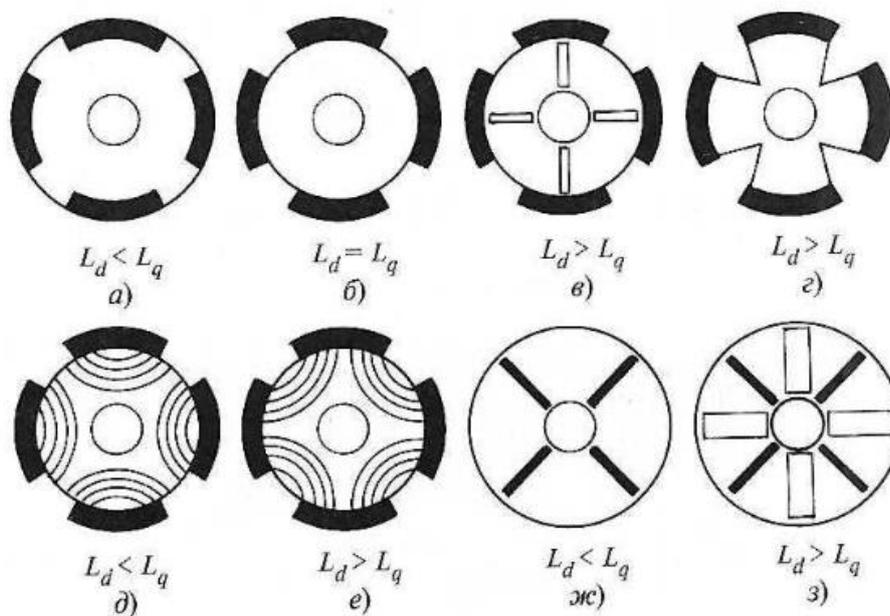


Рисунок 19 – Примеры конструкций роторов явнополюсных СМППМ: постоянные магниты зачернены; в вариантах в) и ж) используется продольная шихтовка, или секционирование, а в варианте з) применены внутренние барьеры для потока

Таблица 5 – Параметры явнополюсных СМППМ

Параметр	Пазовый статор	Беспазовый статор
Диаметр пакета статора, мм	50 – 185	40 – 130
Продолжительный момент, Н·м	0.1 – 16	0.01 – 1.6
Пиковый момент, Н·м	0,2 – 48	0.04 – 4.8
Частота вращения при идеальном холостом ходе, об/мин	6000 – 60	9000 – 450
Угловое ускорение при продолжительном моменте, рад/с ²	15000 – 1000	1600 – 500

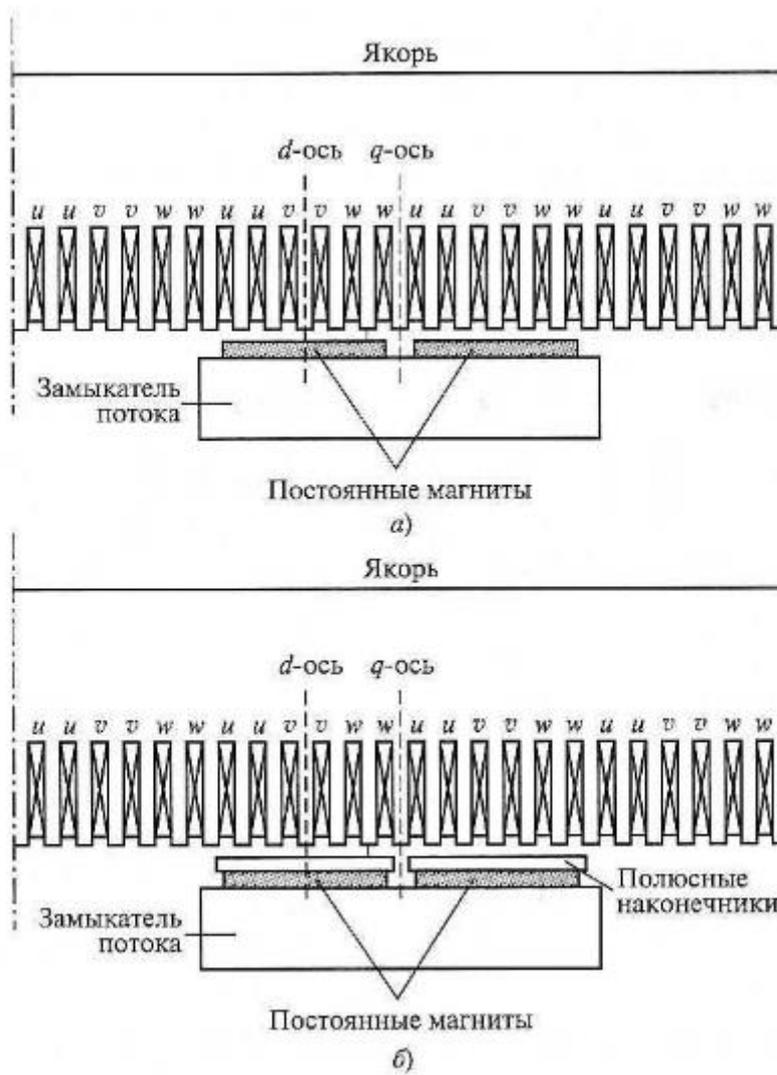


Рисунок 20 – Примеры конструкций: неявнополюсной (а) и явнополюсной (б) линейных СМПМ

1.2.5 Сравнительный анализ достоинств и недостатков ВД

Таблица 6 – Достоинства и недостатки ВД

Тип двигателя	Преимущества	Недостатки
Вентильные электродвигатели постоянного тока	1) Возможность выполнения ротора большого диаметра; 2) Высокий КПД; 3) Отсутствие осевых сил, действующих на подшипник; 4) Отсутствие стальных участков магнитной цепи на статоре, и как следствие, малая индуктивность обмотки и высокая жесткость внешних характеристик.	1) Высокие аэродинамические потери из-за малого отношения длин ротора; 2) Сложность сборки ротора; 3) Сложность упаковки обмотки в пространстве между двумя роторами; 4) Трудности с обеспечением механической прочности обмотки.
Вентильные электродвигатели переменного тока	1) Широкая распространённость; 2) Прочность конструкции; 3) Низкая цена электродвигателя за счет массового выпуска.	1) Сложность конструкции ротора; 2) Сложность регулирования и нелинейные характеристики; 3) Инерционность управления; 4) Высокая цена преобразователя.
Вентильно-индукторный электродвигатель	1) Простота и технологичность конструкции ИМ; 2) Низкая себестоимость; 3) Высокая надежность; 4) Высокая ремонтпригодность; 5) Низкие потери в роторе; 6) Низкий момент инерции; 7) Возможность работы на больших частотах вращения; 8) Возможность работы в агрессивных средах. 9) Минимальные температурные эффекты.	1) Высокий уровень шумов и вибраций; 2) Плохое использование стали; 3) Работа возможна только совместно с преобразователем частоты; 4) Значительные отходы при штамповке.

Анализ таблицы 6 показывает, что вентильные двигатели призваны объединить в себе лучшие качества двигателей переменного тока и двигателей постоянного тока. Это обуславливает их достоинства:

- Широкий диапазон изменения частоты вращения;
- Бесконтактность и отсутствие узлов, требующих частого обслуживания;
- Возможность использования во взрывоопасной и агрессивной среде;

- Большая перегрузочная способность по моменту;
- Высокие энергетические показатели;
- Большой срок службы и высокая надёжность за счёт отсутствия скользящих электрических контактов.

Подводя итоги по рассмотренным выше классам ВД исходя из подробного описания конструкций и принципа действия, а также учитывая сравнительный анализ достоинств и недостатков всех 3-х классов ВД, можно точно определить, что наиболее перспективным технологическим вариантом реализации усилителя рулевой колонки представляется применение в качестве исполнительного механизма ЭП для ЭУР – ВДПТ бесконтактного исполнения цилиндрического типа со 120-градусной коммутацией.

Отличительной чертой вентильных электродвигателей является объединение в единой структуре электромеханического преобразователя энергии, собственно электрической машины, и управляемого полупроводникового коммутатора такое объединение обеспечивает бесконтактность при преобразовании энергии и тем самым, позволяет применять ВД в тяжелых эксплуатационных условиях.

Вентильные двигатели характеризуются и некоторыми недостатками, главный из которых — высокая стоимость. Однако, говоря о высокой стоимости, следует учитывать и тот факт, что вентильные двигатели обычно используются в дорогостоящих системах с повышенными требованиями по точности и надёжности. Высокая стоимость двигателя, обусловленная частым использованием дорогостоящих постоянных магнитов в конструкции ротора. Стоимость электропривода с ВД, однако, сопоставима со стоимостью аналогичного электропривода на основе ДПТ с независимым возбуждением.

Также можно сказать что, проанализировав различные типы конструкций электромеханических преобразователей энергии, применяемых в вентильных электродвигателях, явнополюсная конструкция СМ с возбуждением от ПМ была выбрана не случайно. Конструктивное исполнение подобного рода, является наиболее подходящим для исполнительных ВД применяемых в конструкции ЭУР, вследствие возможности внесения новых инженерных решений в конструкцию

ротора ДРК. Правильный выбор длины полюсной дуги и марки магнитов с высоким значением коэрцитивной силы позволит получить высокие значения вращающего момента, а правильный выбор материала, применяемого для статорно-роторного пакета двигателя, позволит уменьшить пульсации магнитного потока и потери в стали, а также повысить КПД. На основании этого, выбор в качестве объекта моделирования машины данного конструктивного исполнения является актуальным (целесообразен для поставленных задач исследования).

Первоначальным этапом работы стал детальный анализ магнитного состояния вентильного двигателя ЭУР. Подобные вентильные двигатели изготавливают на базе явнополюсных синхронных машин с постоянными магнитами. Исследование данного двигателя осуществлялось на основании численного моделирования, основанного на методе конечных элементов (МКЭ).

2. АНАЛИЗ КОНСТРУКЦИЙ ЭУР

2.1 Краткое описание принципа рулевого управления

Рулевое управление предназначено для обеспечения движения автомобиля в заданном водителем направлении и наряду с тормозной системой является важнейшей системой управления транспортного средства.

Рулевое управление современного транспортного средства объединяет рулевое колесо с рулевой колонкой, рулевым механизмом и рулевым приводом.

Принцип действия системы рулевого управления автомобиля:

- 1) Рулевое колесо воспринимает от водителя усилия, необходимые для изменения направления движения, и передает их через рулевую колонку рулевому механизму. Рулевое колесо выполняет также и информационную функцию. По величине усилий, характеру вибраций происходит передача водителю информации о характере движения.
- 2) Рулевая колонка обеспечивает соединение рулевого колеса с рулевым механизмом. Рулевая колонка представлена рулевым валом, имеющим несколько шарнирных соединений.
- 3) Рулевым механизмом предназначен для увеличения, приложенного к рулевому колесу усилия, и передачи его рулевому приводу. В качестве рулевого механизма используются различные типы редукторов, которые характеризуются определенным передаточным числом. Наибольшее распространение получил реечный рулевой механизм. Реечный рулевой механизм включает шестерню, установленную на валу рулевого колеса и связанную с зубчатой рейкой. При вращении рулевого колеса рейка перемещается в одну или другую сторону и через рулевые тяги поворачивает колеса.
- 4) Рулевым приводом предназначен для передачи усилия, необходимого для поворота, от рулевого механизма к колесам. Он обеспечивает оптимальное соотношение углов поворота управляемых колес, а также препятствует их повороту при работе подвески. Конструкция рулевого привода зависит от

типа применяемой подвески. Наибольшее распространение получил механический рулевой привод, состоящий из рулевых тяг и рулевых шарниров. Рулевой шарнир выполняется шаровым. Шаровой шарнир состоит из корпуса, вкладышей, шарового пальца и защитного чехла. Для удобства эксплуатации шаровой шарнир выполнен в виде съемного наконечника рулевой тяги. По своей сути рулевая тяга с шаровой опорой выступает дополнительным рычагом подвески.

Для уменьшения усилий, необходимых для поворота рулевого колеса, в рулевом приводе применяется усилитель рулевого управления. Применение усилителя обеспечивает точность и быстродействие рулевого управления, снижает общую физическую нагрузку на водителя, а также позволяет устанавливать рулевые механизмы с меньшим передаточным числом.

В зависимости от конструктивного исполнения различают следующие виды конструкций усилителей рулевого управления: пневматический, гидравлический и электрический. В современном автомобилестроении гидравлический усилитель рулевого управления активно вытесняется более перспективным электрическим усилителем, в то время как пневматическая конструкция усилителя в наши дни практически не встречается ввиду её технического устаревания.

2.2 Описание назначения, конструкции и принципа действия электрического усилителя рулевого управления автомобиля

Электроусилитель рулевого управления (ЭУР) – это конструктивный элемент в рулевом управлении транспортного средства, который создаёт дополнительное усилие во время поворота колес при помощи электрического привода.

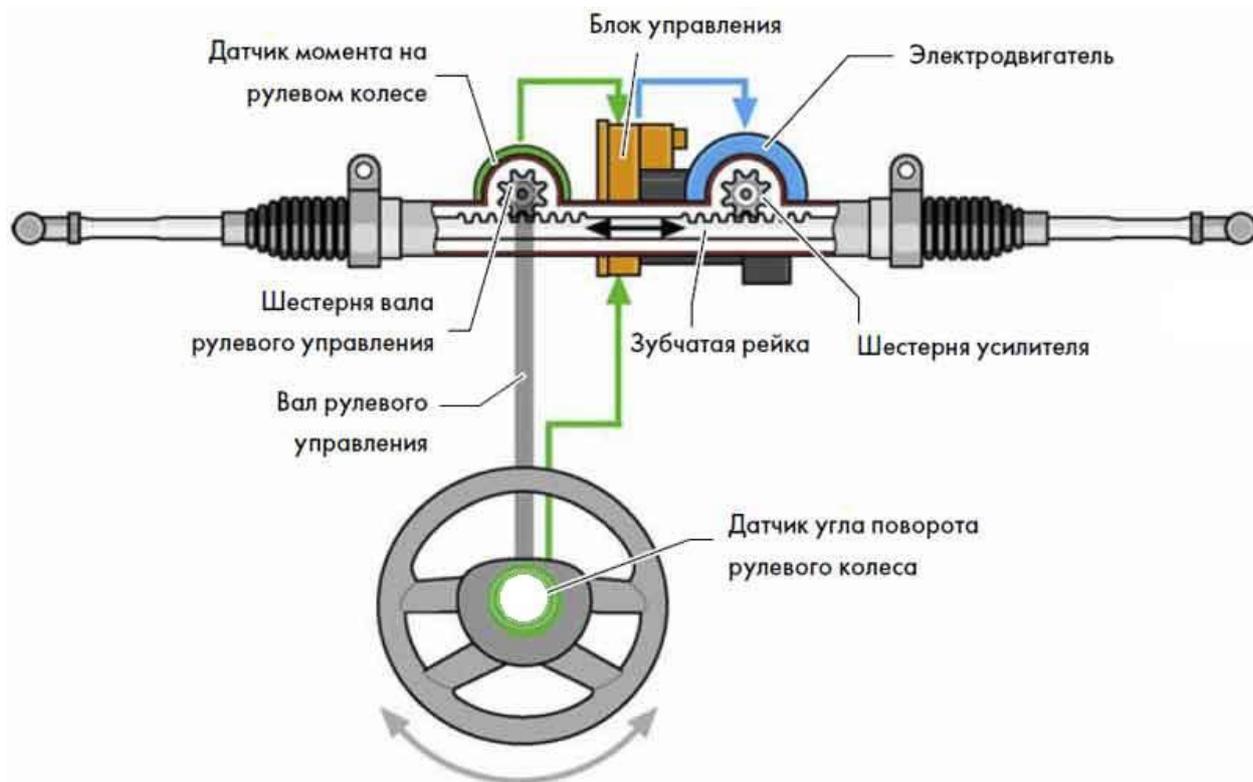


Рисунок 21 – Принципиальная схема ЭУР с двумя шестернями

Электроусилитель устанавливается на рулевой вал автомобиля, части которого соединены между собой торсионным валом, с установленным датчиком величины крутящего момента. При вращении руля происходит скручивание торсионного вала, регистрируемое датчиком момента. На основании полученных с датчика момента данных, а также данных с датчиков скорости и оборотов коленчатого вала, электронный блок управления вычисляет необходимое компенсационное усилие и подает команду на электродвигатель усилителя.

Двигатель рулевой колонки (ДРК) – это магнитоэлектрическая синхронная машина, предназначенная для усиления момента, передаваемого с рулевого колеса

на рулевую рейку. ДРК предназначен для работы в паре с электронным блоком управления (БУ ЭМУРУ).

Внешний вид ДРК представлен на рисунке 22.



Рисунок 22 – Внешний вид ДРК-СН

Конструктивно ЭУР состоит из следующих частей:

- Система управления:
 - Электронный блок управления (ЭБУ):
 - Блок управления;
 - Датчик крутящего момента;
 - Датчик положения ротора.
- Электродвигатель;
- Механическая передача:
 - Рулевой вал с торсионным валом:
 - Рулевой вал;
 - Торсионный вал;
 - Торсион.

По конструктивному исполнению ЭУР бывают двух типов:

1) Электромеханический усилитель с двумя шестернями:

Электроусилитель руля объединяется с рулевым механизмом в едином блоке. В усилителе устанавливается обычно асинхронный электродвигатель. Передача крутящего момента от электродвигателя на рейку рулевого механизма обеспечивается механической передачей.

Одна шестерня служит для передачи крутящего момента к рейке рулевого механизма собственно от рулевого колеса, а еще одна – от электродвигателя усилителя. На рейке имеется два участка специальных зубьев. Один из них и является приводом усилителя.

2) Электрический усилитель руля с параллельным приводом:

В таком электроусилителе усилие от электродвигателя переходит на рулевой механизм при помощи ременной передачи, а также установлен специальный шариковинтовой механизм. При этой схеме усиление может передаваться как на рейку рулевого колеса, так и на вал управления рулевым механизмом.



Рисунок 23 – Принципиальная схема ЭУР с параллельным приводом

Достоинства ЭУР:

- Простота и надёжность конструкции;
- Массогабаритные показатели;
- Повышение экономичности расхода топлива;
- Отсутствие потери мощности двигателя транспортного средства;
- Вариативность настройки ЭБУ усилителя на различные режимы работы;
- Обеспечение оптимального режима управления транспортным средством при различных скоростях.

Недостатки ЭУР:

- Более высокая стоимость по сравнению с гидравлической конструкцией;
- Ограничение по мощности электродвигателя;

В итоге из двух разновидностей технической реализации конструкции ЭУР больший интерес представляет механизм с параллельным приводом. Данный тип конструкции был выбран ввиду её малых габаритов и простоты конструкции. Также в данном типе конструкции возможна точная настройка электронного блока управления двигателем усилителя под нужный режим работы двигателя (зависит от типа и марки автомобиля).

3. ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ

Задачи данного научно-исследовательского проекта является:

- Построение имитационной модели вентильного магнитоэлектрического двигателя (ВД) для ЭУР;
- Исследование имитационной модели ВД на предмет изменения свойств материалов статорно-роторного пакета, конструкции шихтовочного листа, изменения коэрцитивной силы магнитов и длины полюсной дуги;
- Разработка итоговой оптимизированной имитационной модели ВД для ЭУР и создание рекомендаций по оптимизации магнитной системы и уменьшению массо-габаритных показателей ВД.

В данном разделе дипломной работы рассмотрены вопросы финансового менеджмента. Техничко-экономическое обоснование научно-исследовательских работ проводится с целью определения и анализа трудовых и денежных затрат, направленных на их реализацию.

3.1 Планирование работ по НИР

Планирование комплекса предполагаемых работ осуществляется в следующем порядке:

- определение структуры работ в рамках технического задания;
- определение участников каждой работы;
- установление продолжительности работ;
- построение графика проведения работ.

Для выполнения проектирования формируется рабочая группа, в состав которой входят научный руководитель и инженер-проектировщик. На каждый вид запланированных работ установлена соответствующая должность исполнителя.

Далее обозначаются этапы проектирования и выполняемые, на каждом из этапов, виды работы.

Продолжительность выполнения проекта составит 101 рабочий день. Из них: 10 дней – продолжительность выполнения работ руководителем; 101 день – продолжительность выполнения работ инженером.

График строится для ожидаемого по длительности исполнения работ в рамках технического проекта, с разбивкой по месяцам и декадам за период времени подготовки магистерской диссертации. На основе таблицы 7 строим план - график проведения работ (рисунок 24).

Исходя из составленной диаграммы, можно сделать вывод, что продолжительность работ занимает 9 декад, начиная с первой декады марта, заканчивая третьей декадой мая. Учитывая вероятностный характер оценки трудоёмкости, реальная продолжительность работ может быть, как меньше (при благоприятном стечении обстоятельств), так и несколько превысить указанную продолжительность (при неблагоприятном стечении обстоятельств).

При выполнении дипломных работ студенты в основном становятся участниками сравнительно небольших по объему научных тем. Поэтому наиболее удобным и наглядным является построение ленточного графика проведения научных работ в форме диаграммы Ганта.

Диаграмма Ганта - горизонтальный ленточный график, на котором работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ. Является одним из методов планирования проектов. Используется в приложениях по управлению проектами. Первый формат диаграммы был разработан Генри Л. Гантом в 1910 году. По сути, диаграмма Ганта состоит из участков, ориентированных вдоль оси времени. Каждая полоса на диаграмме представляет вид работы, её концы - моменты начала и завершения работы, её протяженность – длительность работы. Вертикальной осью диаграммы служит перечень задач. Кроме того, на диаграмме могут быть отмечены совокупные задачи, проценты завершения, указатели последовательности и зависимости работ, метки ключевых моментов (вехи) и др. Веха является ключевым понятием диаграммы Ганта и означает метку значимого момента в ходе выполнения работ, общую границу двух или более задач. Вехи позволяют наглядно отобразить необходимость синхронизации, последовательности в выполнении различных работ.

Этапы проектирования и соответствующие виды выполняемых работ представлены в таблице 7.

Таблица 7 – Временные показатели проведения научного исследования

№	Наименование работ	Исполнители (НР, инженер)	Количество исполнителей	Продолжительность работ в календарных днях
1.	Выдача и получение технического задания	НР, инженер	2	1
2.	Подбор и изучение материалов по теме	Инженер	1	12
3.	Выбор направления исследований	Инженер	1	3
4.	Календарное планирование работ по теме	НР, инженер	2	2
5.	Проведение теоретических расчетов и обоснований	Инженер	1	21
6.	Построение моделей и проведение экспериментов	Инженер	1	21
7.	Апробация реализованной схемы	Инженер	1	14
8.	Оценка эффективности полученных результатов	Инженер	1	14
9.	Составление пояснительной записки	НР, инженер	2	7
10.	Публикация полученных результатов	Инженер	1	6
	Итого	НР	-	10
		Инженер	-	101

На основе таблицы 7 строим календарный план-график. График строится для максимального по длительности исполнения работ в рамках научно-исследовательского проекта, с разбивкой по месяцам и декадам (10 дней) за период времени написания НИР. При этом работы на графике следует выделить различной штриховкой в зависимости от исполнителей, ответственных за ту или иную работу.

№	Наименование работ	Исполнители (НР, инженер)	Количество исполнителей	Продолжительность выполнения работ										
				Март			Апрель			Май				
				1	2	3	1	2	3	1	2	3		
1.	Выдача и получение технического задания	НР, инженер	2											
2.	Подбор и изучение материалов по теме	Инженер	1											
3.	Выбор направления исследований	Инженер	1											
4.	Календарное планирование работ по теме	НР, инженер	2											
5.	Проведение теоретических расчетов и обоснований	Инженер	1											
6.	Построение моделей и проведение экспериментов	Инженер	1											
7.	Апробация реализованной схемы	Инженер	1											
8.	Оценка эффективности полученных результатов	Инженер	1											
9.	Составление пояснительной записки	НР, инженер	2											
10.	Публикация полученных результатов	Инженер	1											
		- Научный руководитель;			- Инженер.									

Рисунок 25 – Календарный план-график проведения работ по НИР (диаграмма Ганта)

3.2 Смета затрат на проект

При планировании бюджета НИР должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов расходов, связанных с его выполнением.

Расчет плановых затрат на выполнение проекта выполняется по следующей формуле:

$$K_{см} = K_{мат} + K_{ам} + K_{з/пл} + K_{со} + K_{пр} + K_{накл}, \quad (1)$$

где $K_{мат}$ - материальные затраты необходимые для реализации НИР;

$K_{ам}$ - амортизация на компьютерную технику;

$K_{з/пл}$ - затраты на заработную плату;

$K_{со}$ - затраты на социальные нужды;

$K_{пр}$ - прочие затраты;

$K_{накл}$ - накладные расходы.

3.2.1 Материальные затраты на канцелярские товары

Материальные затраты включают в себя стоимость всех материалов, используемых при разработке проекта, такие как бумага, ручка, тетрадь, картридж для принтера, CD-диск и др. Принимаем величину материальных затрат $k_{мат} = 1380р$.

3.2.2 Амортизация компьютерной техники

В ходе проведения НИР были использованы компьютеры, находящиеся в 030 аудитории 8 корпуса:

$$K_{ам} = \frac{T_{исп.кт}}{T_{кал}} \cdot Ц_{кт} \cdot \frac{1}{T_{сл}}, \quad (2)$$

$T_{исп.кт}$ - время использования компьютерной техники;

$T_{кал}$ - календарное время;

$Ц_{кт}$ - цена компьютерной техники;

$T_{сл}$ - срок службы компьютерной техники.

$$K_{ам} = \frac{75}{365} \cdot 30000 \cdot \frac{1}{5} = 1232,87 \text{ р.}$$

3.2.3 Основная заработная плата исполнителей темы

В таблице 8 представлены оклады работников за месяц

Таблица 8 – оклад работников

№	Участники проектирования	Оклад
1	Научный руководитель (профессор)	26300
2	Инженер 9 разряд	17000

Зарплата инженера:

$$ЗП_{инж} = ЗП_o \cdot k_1 \cdot k_p, \quad (3)$$

$ЗП_o$ - месячный оклад исполнителей;

$k_1 = 1,1$ - коэффициент, учитывающий неотработанное время (отпуск);

$k_p = 1,3$ - районный коэффициент для Гомска.

$$ЗП_{инж} = 17000 \cdot 1,1 \cdot 1,3 = 24310 \text{ р.}$$

Зарплата научного руководителя в месяц:

$$ЗП_{нр} = ЗП_o \cdot k_1 \cdot k_p; \quad (4)$$

$$ЗП_{нр} = 26300 \cdot 1,1 \cdot 1,3 = 37609 \text{ р.}$$

Затраты на заработную плату:

$$k_{з/пл} = ЗП_{инж} + ЗП_{нр}; \quad (5)$$

$$k_{з/пл} = 24310 + 37609 = 61919 \text{ р.}$$

Фактическая заработная плата:

$$ЗП_{ф} = \frac{ЗП_m}{21} \cdot n_{ф}, \quad (6)$$

где $ЗП_m$ - месячная зарплата исполнителя;

$n_{ф}$ - фактическое количество дней, потраченных на разработку проект (составило 66 рабочих дней: 23 - март; 20 - апрель; 23 - май).

Фактическая заработная плата для научного руководителя:

$$ЗП_{ф} = \frac{37609}{21} \cdot 66 = 118199,7 \text{ р.}$$

Фактическая заработная плата для инженера:

$$ЗП_{\phi} = \frac{24310}{21} \cdot 66 = 76402,86 \text{ р.}$$

3.2.4 Затраты на социальные нужды

Затраты на социальные нужды составляют 30% от основной заработной платы:

$$K_{co} = 0,3 \cdot k_{з/пл}; \quad (7)$$

$$K_{co} = 0,3 \cdot 61919 = 18575,7 \text{ р.}$$

3.2.5 Прочие затраты

Прочие затраты принимаются в размере 10% от суммы уже рассчитанных нами ранее затрат:

$$K_{np} = 0,1 \cdot (k_{mat} + k_{ам} + k_{з/пл} + k_{co}); \quad (8)$$

$$K_{np} = 0,1 \cdot (1380 + 1232,87 + 61919 + 18575,7) = 8310,757 \text{ р.}$$

3.2.6 Накладные расходы

Накладные расходы принимаются в размере 200% от основной заработной платы:

$$K_{накл} = 2 \cdot k_{з/пл}; \quad (9)$$

$$K_{накл} = 2 \cdot 61919 = 123838 \text{ р.}$$

Произведем итоговый расчет плановых затрат на выполнение НИР:

$$K_{см} = 1380 + 1232 + 61919 + 18575,7 \\ + 8310,757 + 123838 = 215255,457 \text{ р.}$$

На основании рассчитанных величины затрат научно - исследовательской работы составим таблицу 9.

Таблица 9 – Расчет бюджета затрат НИР

Наименование статьи	Сумма, руб.
Затраты на канцелярские товары	1380
Затраты на амортизация компьютерной технике	1232
Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	61919
Затраты на социальные нужды	18575,7
Прочие расходы	8310,757
Накладные расходы	123838
Бюджет затрат НИР	215255,457

В данном проекте проводилось исследование двух вентильных двигателей. Вследствие чего отсутствует нужда в расчете монтажа оборудования и его окупаемости. С результатами исследований можно ознакомиться во втором разделе магистерской диссертации.

Область применения вентильных двигателей охватывает широкий круг приборов: от приборов бытовой техники с мощностью в единицы ватт до двигателей электромобилей с мощностью в десятки киловатт.

Цель работы состояла в экспериментальной разработке имитационной модели синхронного трехфазного исполнительного двигателя с многополюсным ротором и возбуждением от ПМ для анализа и оптимизации магнитной системы и уменьшению массогабаритных показателей ДРК. Итогом работы должны были послужить наглядные данные о повышении номинального крутящего момента, снижении пульсаций активного и реактивного момента, что должно было значительно повысить стабильность системы рулевого управления как при постоянном, так и при динамически меняющемся моменте нагрузки на упругий элемент (торсион) ДРК.

Таким образом, выполнение работ по оптимизации магнитной системы двигателя рулевой колонки электрического усилителя рулевого управления автомобиля, а также уменьшения массогабаритных показателей является актуальной научно-технической проблемой.

Таблица 10 – Сравнение анализ результатов моделирования ВД для ЭУР

Конфигурация им. модели	M_n , [Н·м]	$U_{инд.ф.}$, [В]	$I_{ф.}$, [А]	$V_{ст.мах}/V_{z1}$ [Тл]
Базовая модель. Геом. размеры магнитов: соотн. сторон 5:1 (размеры магнита: 3х15х66 мм; $V_{маг.}=2970 \text{ мм}^3$). Применялись магниты марки N40SH и марка стали 2212.	9,83	12,58	25,6	2,06/1,81
Оптимизированная модель. Геом. размеры магнитов: соотн. сторон 2,5:0,72 (размеры магнита: 3,6х12,5х66 мм; $V_{маг.}=2970 \text{ мм}^3$). Применялись магниты марки N48SH и марка стали 49К2ФА.	14,6	14,59	30,89	2,46/2,26

В результате выполнения поставленных задач по данному разделу, можно сделать следующие выводы:

Составлен план научного исследования, в котором разработан календарный план. Общее содержание работ для проведения исследования составило 10 позиций. Был разработан календарный - план график проведения работ по НИР. Рассчитан бюджет научного исследования. Как видно из проведенного анализа стоимость настоящего научного исследования 215255 руб.