

Школа – Инженерная школа энергетики
 Направление подготовки – 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника
 Отделение Электроэнергетики и электротехники

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы
Электропривод шасси пассажирского самолёта

УДК 629.73.062.7

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5А6Н	Сладкина Наталья Сергеевна		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Киселёв А.В.	К.Т.Н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Спицына Л.Ю.	К.Э.Н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент ООД	Мезенцева И.Л.			

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
13.03.02 Электроэнергетика и электротехника	Тютёва П.В.	К.Т.Н.		

Результаты обучения по направлению
13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

Код результата	Результат обучения
<i>Профессиональные</i>	
Р 1	Применять соответствующие гуманитарные, социально-экономические, математические, естественно-научные и инженерные знания, компьютерные технологии для решения задач расчета и анализа <i>электрических устройств, объектов и систем</i> .
Р 2	Уметь формулировать задачи в области <i>электроэнергетики и электротехники</i> , анализировать и решать их с использованием всех требуемых и доступных ресурсов.
Р 3	Уметь проектировать <i>электроэнергетические и электротехнические системы и их компоненты</i> .
Р 4	Уметь планировать и проводить необходимые экспериментальные исследования, связанные с определением параметров, характеристик и состояния <i>электрооборудования, объектов и систем электроэнергетики и электротехники</i> , интерпретировать данные и делать выводы.
Р 5	Применять современные методы и инструменты практической инженерной деятельности при решении задач в области <i>электроэнергетики и электротехники</i> .
Р 6	Иметь практические знания принципов и технологий <i>электроэнергетической и электротехнической</i> отраслей, связанных с особенностью проблем, объектов и видов профессиональной деятельности профиля подготовки на предприятиях и в организациях – потенциальных работодателях.
<i>Универсальные</i>	
Р 7	Использовать знания в области менеджмента для управления комплексной инженерной деятельностью в области <i>электроэнергетики и электротехники</i>
Р 8	Использовать навыки устной, письменной речи, в том числе на иностранном языке, компьютерные технологии для коммуникации, презентации, составления отчетов и обмена технической информацией в областях <i>электроэнергетики и электротехники</i> .
Р 9	Эффективно работать индивидуально и в качестве члена или лидера команды, в том числе междисциплинарной, в области <i>электроэнергетики и электротехники</i> .
Р 10	Проявлять личную ответственность и приверженность нормам профессиональной этики и нормам ведения комплексной инженерной деятельности.
Р 11	Осуществлять комплексную инженерную деятельность в области <i>электроэнергетики и электротехники</i> с учетом правовых и культурных аспектов, вопросов охраны здоровья и безопасности жизнедеятельности.
Р 12	Быть заинтересованным в непрерывном обучении и совершенствовании своих знаний и качеств в области <i>электроэнергетики и электротехники</i> .

Школа – Инженерная школа энергетики
Направление подготовки (специальность) – 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника
Отделение Электроэнергетики и электротехники

УТВЕРЖДАЮ:
Руководитель ООП
Тютеева П.В.
(Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

В форме:

Бакалаврской работы

(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
5А6Н	Сладкина Наталья Сергеевна

Тема работы:

Анализ устойчивости авиационного асинхронного генератора	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	приказ № 45-39/с от 14.02.2020

Срок сдачи студентом выполненной работы:

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе

(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).

Объектом исследования является электропривод для шасси пассажирского самолета. SSJ-100.

Исходные данные:

- Скорость самолета: 5 км/ч;
- Угол наклона рулевой дорожки: 5° ;
- Масса самолёта: 49450 кг;
- Габариты опорных шасси: 1048x377 м.

<p>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</p> <p><i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	<p>Определить главные характеристики и размеры двигателя. Рассчитать обмотку и геометрию магнитопровода статора. Провести геометрический расчет ротора. Рассчитать магнитную цепь. Рассчитать характеристики короткого замыкания. Построить диаграмму магнита и вольтамперную характеристику. Определить массы, потери и КПД двигателя. Провести тепловой и вентиляционный расчёт. Разработать вал и провести механический расчет двигателя. Провести геометрический расчет редуктора.</p>
<p>Перечень графического материала</p> <p><i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> • Эскиз активной части ротора и статора двигателя; • Эскиз паза статора; • Обмотка статора; • Диаграмма магнита и вольтамперная характеристика; • Эскиз вала.
<p>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</p> <p><i>(с указанием разделов)</i></p>	
<p>Раздел</p>	<p>Консультант</p>
<p>Социальная ответственность</p>	<p>Мезенцева Ирина Леонидовна</p>
<p>Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсоснабжение</p>	<p>Спицына Любовь Юрьевна</p>
<p>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:</p>	
<p>Все разделы выпускной квалификационной работы написаны на русском языке</p>	

<p>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</p>	
--	--

Задание выдал руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Киселёв А.В.	к.т.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5А6Н	Сладкина Н.С.		

Задание для раздела «финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Студенту:

Группа	ФИО
5А6Н	Сладкиной Наталье Сергеевне

Школа	ИШЭ	Отделение школы (НОЦ)	ОЭЭ
Уровень образования	Бакалавр	Направление/специальность	13.03.02. Электроэнергетика и электротехника/ЭОЛА

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

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	Бюджет проекта - не более 50 тыс. рублей, в том числе затраты на оплату труда - 100 тыс. рублей.
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	Значение показателя интегральной ресурсоэффективности – не менее 4 баллов из 5
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	Районный коэффициент - 1,3%. Коэффициент доплат и надбавок - 1,1%. Коэффициент накладных расходов - 10%. Коэффициент страховых отчислений -30%

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернативности проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	Потенциальные потребители результатов исследования. Анализ конкурентных технических решений. Технология QuaD. SWOT-анализ. Определение возможных альтернатив проведения НИ.
2. Планирование и формирование бюджета научных исследований	Структура работ в рамках НИ. Разработка графика проведения НИ. Бюджет НИ.
3. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования	Расчёт интегрального показателя ресурсоэффективности.

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. Оценка конкурентоспособности технических решений
2. Матрица SWOT
3. Альтернативы проведения НИ
4. График проведения и бюджет НИ
5. Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НИ

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
--	--

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент	Спицына Л.Ю.			

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5А6Н	Сладкина Н.С.		

Задание для раздела «социальная ответственность»

Студенту:

Группа	ФИО
5А6Н	Сладкина Наталья Сергеевна

Школа	ИШЭ	Отделение (НОЦ)	ОЭЭ
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/специальность	13.03.02. Электроэнергетика и электротехника/ЭОЛА

Тема ВКР:

Разработка электропривода шасси пассажирского самолета SSJ-100	
Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:	
1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	Объектом исследования является электропривод для шасси пассажирского самолета. SSJ-100.
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности: <ul style="list-style-type: none"> – специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; – организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны. 	1. ГОСТ 12.1.003-2014 2. СН 2.2.4/2.1.8.566 – 96 3. ГОСТ Р 55710-2013 4. СН 2.2.4.548-96 5. МР 2.2.9.2311-07 6. ГОСТ Р 12.3.047-98
2. Производственная безопасность: 2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов 2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия	Вредные факторы: превышение уровня шума, превышение уровня вибрации, недостаточная освещенность, отклонение микроклимата, нервно психические нагрузки. Опасные факторы: поражение электрическим током, пожаро-взрывоопасность.
3. Экологическая безопасность:	Воздействие на атмосферу, гидросферу и литосферу.
4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:	Возможная ЧС: производственные взрывы, пожары, обрушение зданий. Типичная ЧС: пожар

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
--	--

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент ООД	Мезенцева И.Л.			

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5А6Н	Сладкина Наталья Сергеевна		

Реферат

Выпускная квалификационная работа содержит 98 страниц, 19 таблиц, 17 рисунков, 25 источников и 2 приложения.

Ключевые слова: тяговый двигатель, синхронный двигатель, постоянный магнит, планетарный редуктор, ротор, статор.

Объектом исследования является электропривод для шасси пассажирского самолета SSJ -100.

Цель работы – разработать тяговый двигатель для привода шасси пассажирского самолета SSJ - 100.

В процессе исследования выбрана оптимальная конструкция тягового двигателя.

В процессе разработки определены главные характеристики и размеры двигателя, рассчитана обмотка и геометрия магнитопровода статора, проведён геометрический расчет ротора и расчёт магнитной цепи, построены диаграммы магнита и вольтамперная характеристика, определена масса, потери, и КПД двигателя, проведён тепловой и вентиляционный расчёт, а также механический расчёт двигателя. В специальной части рассчитана геометрия редуктора.

Расчеты произведены в программе Mathcad. Текстовая часть документа оформлена в текстовом редакторе Microsoft Office Word. Графический материал сделан в графическом редакторе КОМПАС.

В работе были разработаны разделы: социальная ответственность; финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.

Обозначения и сокращения

ЛА – летательные аппараты;

ТЭД – тяговый электродвигатель;

АД – асинхронный двигатель;

СДПМ – синхронный двигатель с постоянными магнитами;

ВВФ – внешние воздействующие факторы;

МДС – магнитодвижущая сила;

ЭДС – электродвижущая сила;

КПД – коэффициент полезного действия;

ПМ – постоянный магнит.

Оглавление

Введение	11
1. Объект и методы исследования	13
1.1. Конструкции шасси самолета SSJ-100.....	13
1.2. Размещение электродвигателя в опорной стойке шасси.....	15
1.3. Тяговая электрическая машина и его виды.	17
1.4. Выбор тягового двигателя	18
1.5. Выбор магнитотвердого материала	23
2. Расчет и аналитика	24
2.1. Определение главных характеристик двигателя	24
2.2. Определяем главные размеры	25
2.3. Расчет обмотки и геометрии магнитопровода статора.	27
2.4. Геометрический расчет ротора	32
2.5. Расчет магнитной цепи	34
2.6. Характеристики короткого замыкания.	43
2.7. Построение диаграммы магнита и вольтамперной характеристики синхронного двигателя	45 45
2.8. Определение массы, потерь и КПД двигателя.....	49
2.9. Тепловой и вентиляционный расчёт	52
2.10. Механический расчет двигателя.....	55
3. Геометрический расчет редуктора.	61
4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.....	65
4.1. Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения.....	65 65
4.1.1. Потенциальные потребители результатов исследования.....	65
4.1.2. Анализ конкурентных технических решений.....	66
4.1.4. SWOT – анализ	69
4.1.5 Определение возможных альтернатив проведения научных исследований.....	72 72
4.2. Планирование и формирование бюджета научных исследований	73
4.2.1. Структура работ в рамках научного исследования	74

4.2.2. Разработка графика проведения научного исследования	74
4.2.3. Бюджет научно-технического исследования	76
4.3. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социально и экономической эффективности исследования	79
5. Социальная ответственность	81
Введение	81
5.1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	81
5.1.1. Специальные (характерные для проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства.	81
5.1.2. Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.	83
5.2. Производственная безопасность	83
5.2.1. Анализ вредных опасных производственных факторов	85
5.2.2. Обоснование мероприятий по защите персонала предприятия от действия опасных и вредных факторов.	89
5.3. Экологическая безопасность	90
5.3.1. Анализ влияния объекта исследования на окружающую среду.	90
5.3.2. Обоснование мероприятий по защите окружающей среды.	91
5.4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях	91
5.4.1. Анализ вероятных ЧС, которые может инициировать объект исследований.	91
Вывод по разделу	92
Литература	94
Приложение А	97
Приложение Б	98

Введение

Как известно, для обеспечения электрооборудования необходимой электроэнергией, используются три вторичные энергетические системы: гидравлическая система, пневматическая система и система электроснабжения. Но использование таких систем для перспективных летательных аппаратов (ЛА) не является идеальным.

Для конкурентоспособности на рынке, необходимо рассматривать концепцию самолета с полностью электрифицированным оборудованием. На данный момент уже есть устоявшееся среди изобретателей наименование данной концепции – «полностью электрический самолет»

Создание электрического привода шасси пассажирского самолета является технологически значимой разработкой, которая позволит отказаться от использования главных (маршевых) двигателей и перейти к небольшим по габаритам и массе электродвигателям, установленным в самом колесе шасси.

Данная идея поможет нам сократить до 4% топлива, свести к минимуму износ и расходы на техническое обслуживание двигателей, уменьшить выбросы углерода и вредных веществ, а также снизить уровень шума на территории аэропорта.

Также электропривод шасси ЛА является решением проблемы загруженности рулежных дорожек в аэропорту. Данная система позволит самолетам выполнять по земле развороты на месте и перемещаться без использования наземного аэродромного оборудования.

В связи с этим, рассмотрение и изучение данного вопроса является актуальным и необходимым в сфере производства летательных аппаратов. Выбрав эту инновационную и стратегическую технологию, авиакомпании могли бы экономить сотни тысяч долларов на самолеты в год, и при этом снижая риск загрязнения воздуха.

В данный момент существуют модели изобретения. Например, один из опытных образцов холдинга «Технодинамика» был представлен на МАКС -2015, над разработкой которого трудился целый ряд организаций. Но успешной реализации проекта не последовало.

Целью этой работы является проектирование электропривода шасси пассажирского самолета

И чтоб достичь данную цель, необходимо решить ряд вопросов:

1. Провести анализ всех возможных вариантов электроприводов для установки в стойки шасси пассажирского самолета.
2. Выбрать наиболее оптимальный тяговый двигатель для привода колёс шасси пассажирского самолета.
3. Определить параметры тягового двигателя.
4. Разработать электропривод.

В данной работе объектом исследования является электропривод для шасси пассажирского самолёта SSJ -100

Электропривод будет интегрирован без дополнительных реконструкции в стойки колес шасси.

Разрабатываемый электропривод предназначен для управления колесами шасси SSJ – 100 (Сухой Суперджет 100) – нового российского пассажирского самолета, спроектированного акционерным обществом «Гражданский самолеты Сухого».

На апрель 2019-го года, по данным открытых источников, насчитывается около 186 выпущенных самолетов SSJ – 100. Из них, около 120 самолетов летают. Самолет эксплуатируется в России и ряд других стран.

1. Объект и методы исследования

1. 1. Конструкции шасси самолета SSJ-100.

Шасси обеспечивает устойчивое положение самолета на стоянке, передвижение самолета по аэродрому при рулении, буксировке, разбеге перед взлётом и пробеге после посадки, а также поглощает кинетическую энергию самолета на пробеге после посадки и прерванного взлета.

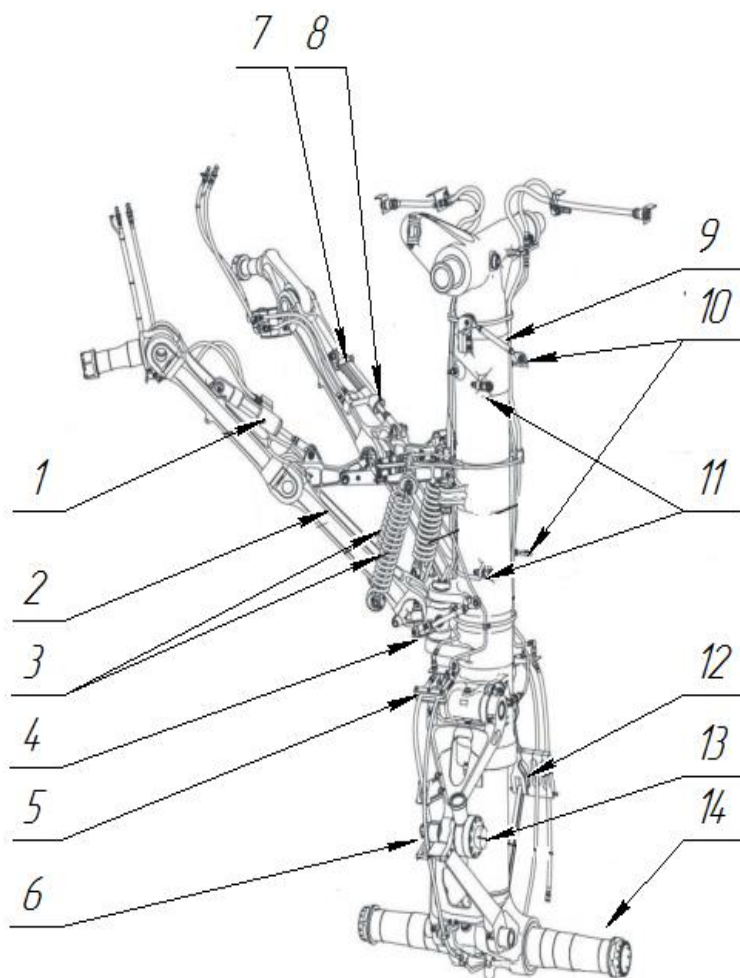


Рисунок 1 – Конструкция основной опоры шасси, где
1 – Цилиндр открытия замка переднего подкоса; 2 – Передний подкос; 3 – Пружины замка переднего подкоса; 4 – Амортизационная стойка; 5 – Тяга створки №2; 6 – Шлиц-шарнир; 7 – Задний подкос; 8 – Цилиндр открытия замка заднего подкоса; 9 – Тяга створки №1; 10 – Тяги щитка; 11 – Ушковые болты; 12 – Направляющий двухзвенник; 13 – Демпфер шимми.

Шасси пассажирского самолёта SSJ-100 сконструировано из трех опор: управляемые колёса передней опоры и колёса основных опор. Каждая из основных опор имеет два тормозных колеса, шины на которых бескамерные радиальной конструкции, типоразмера – H40X14.5R19 24PR.

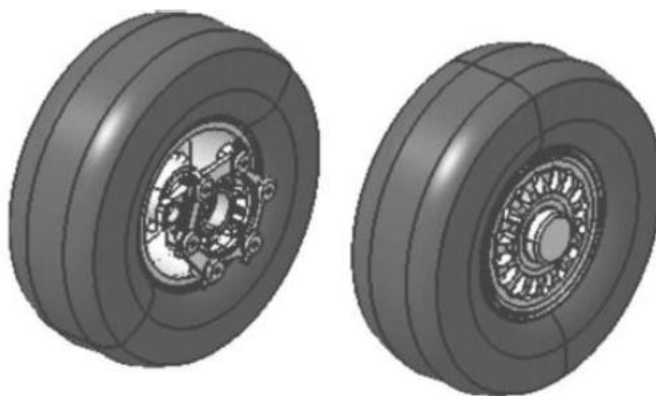


Рисунок 2 – Колеса основных опор шасси в сборке с шиной.

Колесо основной опоры представляет из себя наружный и внутренний полуколеса из легкого металла, между которыми расположено уплотнительное герметизирующее стык кольцо. Соединены они вместе с помощью болтов из высокопрочной стали.

Внутри колеса установлены радиально-упорные конические (внутренний и наружный) подшипники, обеспечивающие вращение колес на оси основных опор.

Помимо этого, для защиты от загрязнения и предотвращения вытекания смазки из подшипников, с внешней стороны колеса установлены манжеты.

Для защиты колеса от тепла, вырабатываемого при торможении, на внутренней поверхности внутреннего полуколеса установлены теплозащитные экраны, а также девять направляющих в зацепление с дисками тормоза, обеспечивающие передачу тормозного момента.

1. 2. Размещение электродвигателя в опорной стойке шасси.

Одним из самых важных вопросов, при решении поставленной цели, является ограниченность области расположения разрабатываемого тягового двигателя.

Кроме этого, необходимо учитывать не только габариты самого двигателя, но и возможность установки механизма для передачи и преобразования крутящего момента, ведь скорость вращения двигателя может в несколько раз превышать допустимую скорость вращения колеса (скорость самолета).

Для решения данного вопроса, необходимо рассмотреть ряд требований:

- a. Массогабаритные характеристики должны быть минимальными, что позволит предотвратить смещения центра масс при раскрытии и закрытии шасси и исключить возможность несрабатывания замков убранного положения и не закрытия створок.
- b. Надежная фиксация и стойкость к внешним влияниям. Подразумевается устойчивость к любым климатическим условиям, к вибрациям и ударам возникающих из-за неровности рулежных дорог, температурным изменениям окружающей среды.
- c. Мощность тягового двигателя должна быть высокой. Необходимо учитывать, что двигатель должен работать при разных изменениях уклона дорог и массы самолета. От изменения угла и массы, зависит сила трения, а, следовательно, и тяговая мощность двигателя.
- d. Удобство в обслуживании - простота конструкции электромеханической системы, доступность к элементам, простота установки и крепления, монтажа и демонтажа.

Таким образом, разрабатываемая электромеханическая система должна устанавливаться без дополнительных изменений в опорных шасси, соблюдая все требования, предъявляемые к его конструкции.

Данное техническое решение требует подробного изучения и рассмотрения тяговых электродвигателей.

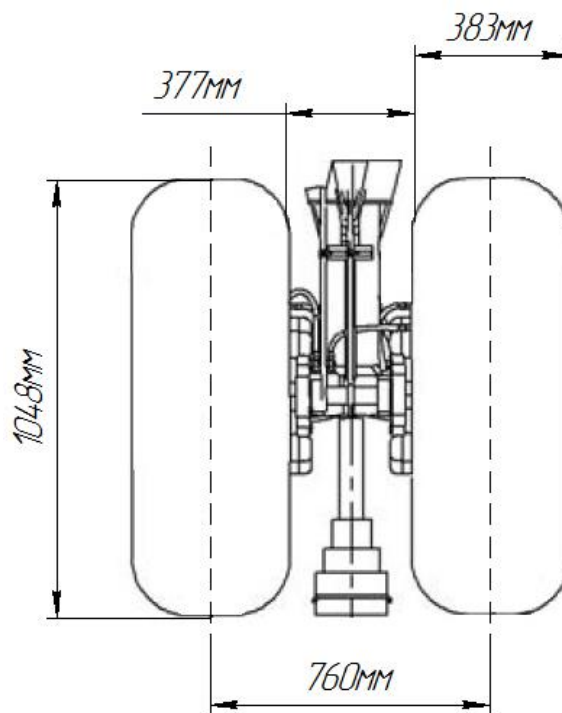


Рисунок 3 – Размеры стойки шасси основных опор.

Таблица №1 – Параметры колеса шасси основных опор.

№	Наименование	SSJ-100
1.	Масса нагрузки, кг	49 450
2.	Диаметр колеса опорного шасси, мм	1048
3.	Ширина колеса опорного шасси, мм	383
4.	Расстояние между колесами. мм	377
5.	Расстояние между осями колес, мм	760
6.	Максимальная скорость, развиваемая при перемещении по рулежным дорожкам, км/час	5
7.	Угол наклона рулежных дорожек, градусов	5

1.3. Тяговая электрическая машина и его виды.

Тяговая электрическая машина – это электрическая машина, которая преобразует электрическую энергию в механическую и приводит в действие пару колес (тяговый электродвигатель), или вырабатывает электроэнергию (тяговый генератор), или является вспомогательным приводом (вспомогательная электрическая машина) согласно ГОСТ 2582-2013. Тяговые электрические машины нашли широкое применение в машиностроении: тепловозов, электропоездов, троллейбусов, трамваев и т.д.

Для приведения в движение транспортных средств используются тяговые двигатели (ТЭД), главной задачей которых является передача крутящего момента.

Тяговый электродвигатель может быть:

- по роду тока: постоянного, пульсирующего и переменного тока;
- по типу: асинхронный, синхронный и постоянного тока.
- по способу питания электроэнергией: от контактной сети, от источника (аккумуляторная батарея);
- по режиму работы: продолжительный, повторно – кратковременный, кратковременном;
- по степени защиты;
- по способу охлаждения;
- по климатическому исполнению

Важной особенностью ТЭД является ограниченность пространства его размещения и низкие весовые показатели. Данный двигатель является экологичным и более безопасным, чем двигатель внутреннего сгорания, что даёт ему большие преимущества.

Но важно также учитывать, что двигатель будет работать при высоких переменных механических и электрических нагрузках на конструкции, в следствие

внешних воздействующих факторов (ВВФ), в соответствии с ГОСТ 21964-76: механические, климатические, биологические, радиационные, термические и воздействия электромагнитных полей. Резкие изменения ВВФ могут привести к быстрому износу изоляционных материалов, разрушению конструкции и сбою в работе двигателя.

Согласно ГОСТ 2582–81 из-за резких перепад температуры изоляция может быстро прийти в негодность. ТЭД должен работать от -60 до $+40^{\circ}\text{C}$. По ГОСТ 2582–81 двигатель должен работать при вибрациях и ударах, имеющих ускорение 150 м/с^2 , а также быть защищённым от воздействия грязи и пыли. Из ГОСТ 15150-69, влажность воздуха, при работе двигателя, не должна превышать 80%.

1.4. Выбор тягового двигателя

Для выбора тягового двигателя необходимо учитывать ряд основных требований: простота регулирования, высокая мощность при малых габаритах, маленькая масса, надежность, простота изготовления, высокий КПД и т.д.

Изначально в машиностроение использовали коллекторные тяговые двигатели. Объясняется это тем, что данный тип двигателей обладает хорошими механическими характеристиками, простотой в управление и передачи энергии. Но необходимо учитывать важнейший их недостаток – это наличие в щеточно-коллекторном узле механического контакта. Коллектор с подвижными контактами (щетками), требует постоянного обслуживания.

Развитие не останавливалось, следующим этапом в преобразование ТЭД стал выпуск асинхронных (АД) тяговых двигателей. Основным недостатком данного типа является трудность в регулирование и выполнение электрического торможения (если короткозамкнутый ротор).

В настоящее время активно разрабатываются тяговые двигатели, в конструкции которых используются синхронные двигатели с ротором на постоянных магнитах или вентильно-индукторные двигатели.

Учитывая то, что разрабатываемый тяговый двигатель, должен регулироваться в широком диапазоне частот, тем самым позволяя изменять скорость вращения, изменять в широком диапазоне крутящий момент (силу тяги), следует рассмотреть и проанализировать вариант тягового электропривода бесконтактного типа с использованием синхронного двигателя с возбуждением от постоянных магнитов (СПДМ).

СПДМ имеет положительные качества:

- большая мощность при маленьком объеме (по сравнению с асинхронным двигателем, синхронный по габаритам в 2 раза меньше);
- высокий коэффициент полезного действия (примерно в 2% больше чем у асинхронных двигателей);
- малая величина инерционности (высокое быстродействие);
- постоянная скорость вращения выходного вала (независимо от нагрузки);
- постоянный момент на валу (независимо от скорости вращения ротора) и невысокая инерция;
- простота конструкции и надежность в эксплуатации;
- большой срок службы (низкая температура – большой срок службы изоляционных материалов).

Большим недостатком синхронных машин является необходимость в применение дополнительного оборудования для пуска и входа в синхронный режим, а также необходимость в установке датчиков обратной связи из-за возможности размагничивания ротора при высоких температурах. Данная проблема решается использованием современных частотных преобразователей и высококоэрцитивных постоянных магнитов (редкоземельные элементы плюс кобальт и неодим-железо-бор, ферриты бария или стронция).

Синхронный двигатель с возбуждением от постоянных магнитов состоит из ротора и статора, конструктивно от асинхронного двигателя отличается

только ротором. Основываясь на том, что при разработке необходимо максимально уменьшить массу и габариты СДПМ, чтоб вместить ТЭД в габариты опорного шасси, необходимо выбирать многополюсный ротор с количеством пар полюсов: $2p \geq 6$.

В обычной конструкции ротор располагается внутри статора, но также существуют конструкции с внешним ротором (обращенного типа).

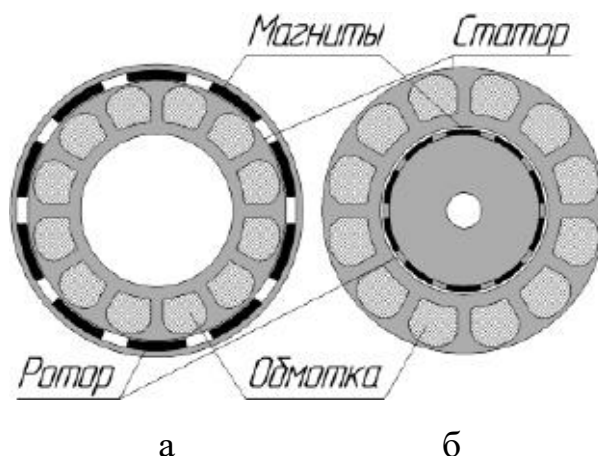


Рисунок 4 – Конструкция СДПМ: а – обращенная, б – стандартная.

Ротор состоит из постоянных магнитов (используются магниты с высокой коэрцитивной силой). Магниты в СДПМ могут располагаться как на поверхности ротора, так и внутри ротора. Обычно ротор со встроенными магнитами используется в двигателях с большой нагрузкой на валу и при высоких скоростях.

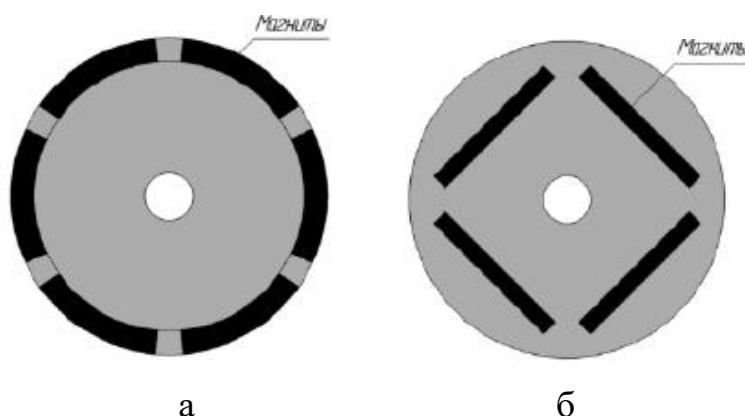


Рисунок 5 – Ротор СДПМ: а – с поверхностной установкой магнитов, б – со встроенными магнитами.

Статор представляет из себя сердечник с обмоткой и корпус. В зависимости от конструкции СДПМ бывают: с сосредоточенной обмоткой и с распределенной обмоткой.

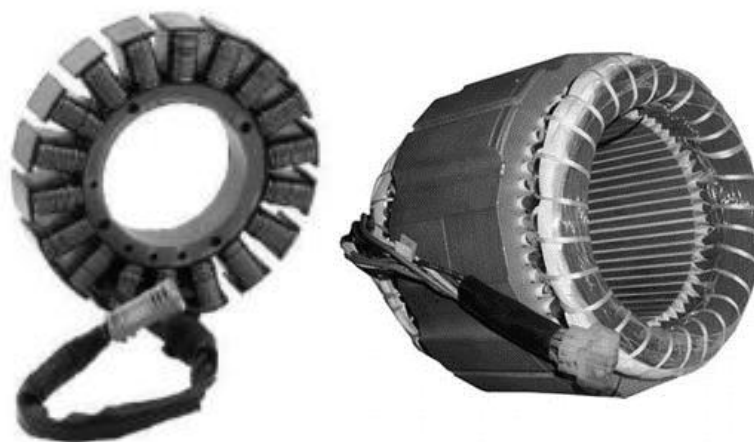


Рисунок 6 – Статор СДПМ: слева – с сосредоточенной обмоткой, справа – с распределительной обмоткой.

Конструкция ротора СДПМ зависит от магнитных и технологических свойств магнитотвердого материала. Можно выделить 2 основных типа ротора СДПМ с призматическими магнитами: ротор звездообразного типа и ротор коллекторного типа.

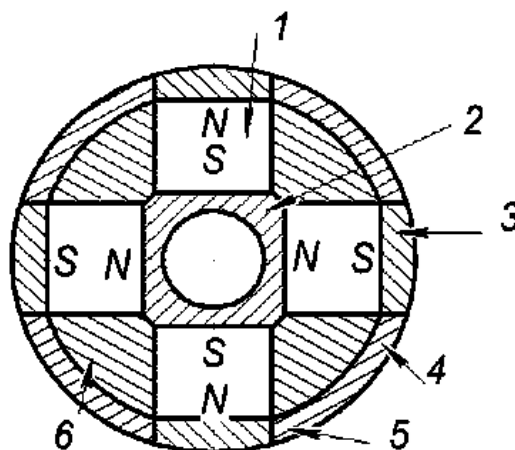


Рисунок 7 – Конструкция ротора звездообразного типа с полюсными башмаками.

Конструкция звездообразного ротора изображена на рисунке 7. Намагненные радиально магниты 1 установлены на втулке 2 из магнитомягкого материала. На полюсы магнитов наложены полюсные башмаки 3 из магнитной стали, которые приварены (5 сваренное место стыка) к немагнитным вставкам 4. Промежутки между магнитами заполняется компаундом 6.

У ротора звездообразного типа есть недостаток: конструкция не технологична из-за количества элементов, а наличие полюсных башмаков увеличивает индуктивность двигателя.

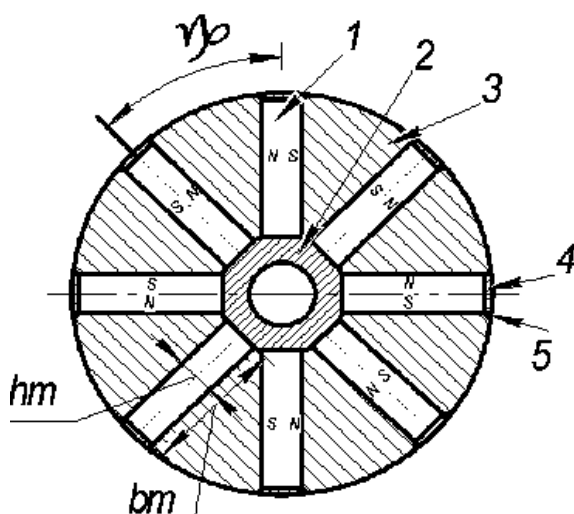


Рисунок 8 – Конструкция ротора коллекторного типа.

Конструкция ротора коллекторного типа изображена на рисунке 8. Между магнитомягких полюсов в виде сегментов расположены намагненные в тангенциальном направлении призматические магниты 1. Установлены магниты торцами на немагнитную втулку 2. Вставки 4, свариваемые (сварка места стыка 5) либо с магнитомягкими участками, либо с полюсами 3, обеспечивают механическую прочность конструкции.

Ротор коллекторного типа позволяет использовать призматические магниты большого диаметра, что даёт возможность конструировать двигатели большой мощности. Такие недостатки, как паразитные зазоры между полюсами и магнитами, можно исключить заполнением их немагнитными порошками из

окси алюминия. Остальные недостатки сглаживаются уменьшением диаметра ротора.

Есть еще третий тип ротора – когтеобразный. Большим недостатком ротора этого типа является сложность конструкции, трудность намагничивания магнита в собранном роторе, и малая степень заполнения магнитом объема ротора.

Для разрабатываемого СДПМ выбираем ротор коллекторного типа.

1.5. Выбор магнитотвердого материала

Для выбранного ротора коллекторного типа наиболее часто применяют анизотропные сплавы типа ЮНДК с направленной кристаллизацией, обладающей высокой удельной магнитной энергией. Сплавы типа ЮНДК позволяют значительно расширить диапазон мощности и частоты магнитоэлектрических машин.

Выбираем магнитотвердый материал марки ЮНДК35Т5Б. В обозначение сплава буквы обозначают: Ю – алюминий, Н – никель, Д – медь, К- кобальт, Т – титан, Б – ниобий. Цифры обозначают процентное содержание элемента.

В таблице 1 приведены параметры магнитотвердого материала марки ЮНДК35Т5Б.

Таблица 1 – параметры магнитотвердого материала

Марка материала	B_r Тл	H_c кА/м	B_d Тл	H_d кА/м	W_{Mmax} Дж/м ³
ЮНДК35Т5Б	0,75	96	0,53	60	16

2. Расчет и аналитика

2.1. Определение главных характеристик двигателя

Тяговая сила определяется по формуле:

$$F_T = m \cdot g \cdot (K_{тр} \cdot \cos \alpha + \sin \alpha) \quad (1)$$

где $k_{тр}$ – коэффициент трения свободно катящегося самолёта по поверхности с сухим бетонным покрытием с заделкой швов или с незаделанными швами; α – угол уклона рулежных дорожек.

$$F = 49\,450 \cdot 9,8 (0,03 \cdot \cos(5^\circ) + \sin(5^\circ)) = 56720 \text{ Н},$$

Крутящий момент:

$$\vec{M} = \vec{F} \cdot \vec{r} = 56720 \cdot 0,524 = 29720 \text{ Н} \cdot \text{м}, \quad (2)$$

где \vec{r} – радиус колеса.

Рассчитываем мощность электродвигателя:

$$P = M \cdot \omega, \quad (3)$$

$$\text{где } \omega = \frac{2\pi}{T} \text{ - угловая скорость.} \quad (4)$$

$$T = \frac{2 \cdot \pi \cdot R}{v} = 2,371 \text{ с}, \quad (5)$$

$$\omega = \frac{2\pi}{2,371} = 2,651 \frac{\text{рад}}{\text{с}},$$

$$P = 29720 \cdot 2,651 = 78,780 \text{ кВт}.$$

Предварительно делаем предположение, что будет установлено 2 двигателя в каждую стойку опорного шасси, следовательно, мощность каждого двигателя будет:

$$P_2 = 39390 \text{ Вт}$$

2.2. Определяем главные размеры

Для того, чтобы определить главные размеры воспользуемся выражением для машинной постоянной:

$$\frac{D^2 \cdot l_i \cdot n}{P'} = \frac{6,1 \cdot 10^7}{a_i \cdot k_\phi \cdot k_{об} \cdot A \cdot B_\delta} = C_A, \quad (6)$$

где C_A - машинная постоянная Арнольда;

D – диаметр якоря;

l_i – расчётная длина якоря;

a_i – расчетный коэффициент полюсного перекрытия;

k_ϕ – коэффициент формы кривой поля;

$k_{об}$ – обмоточный коэффициент;

A – линейная нагрузка;

B_δ – индукция в воздушном зазоре.

Номинальная мощность:

$$P_n = \frac{P_2}{\cos \varphi \cdot \eta'} = \frac{39390}{0,725 \cdot 0,9} = 60380 \text{ Вт}, \quad (7)$$

где $\cos \varphi = 0,725$ - коэффициент мощности;

$\eta' = 0,9$ - КПД.

Расчетная полная мощность:

$$P' = k_E \cdot P_n \quad (8)$$

Коэффициент, учитывающий внутреннее падение напряжение:

$$k_E = \sqrt{\cos^2 \varphi + (\sin \varphi + x'_{\sigma*})^2} = \sqrt{0,725^2 + (0,689 + 0,15)^2} = 1,109 \quad (9)$$

где $x'_{\sigma*} = 0,06 - 0,15$ – индуктивное сопротивление рассеяния обмотки якоря.

Подставляем значения и получаем:

$$P' = \frac{1,074 \cdot 39390}{0,725 \cdot 0,9} = 66940 \text{ В.}$$

Рассчитываем максимально возможный диаметр:

$$D_a = 2 \cdot (h - h_{1\min}) = 2 \cdot (0.280 - 0.028) = 0.504 \text{ м}, \quad (10)$$

где $h = 0.28 \text{ м}$ – высота оси вращения для синхронной машины, из зависимости $h = f(P_2)$.

$h_{1\min} = 0.028 \text{ м}$ – минимально расстояние от нижней части корпуса до опорной плоскости машины, из зависимости $h_{1\min} = f(h)$ для литой станины.

Максимальное значение для внешнего диаметра $D_a = 0,452 \text{ м}$, с высотой вращения $0,25 \text{ м}$.

Внутренний диаметр подберем из отношения $K_D = D/D_a$, для $2p = 12$:

$$K_D = 0,75 - 0,77,$$

$$D = D_a \cdot K_D = 0,452 \cdot 0,77 = 0,348 \text{ м}. \quad (11)$$

Далее находим коэффициенты для нахождения длины якоря.

Коэффициент полюсного перекрытия:

$$ai' = 0,485 + 0,4a_p = 0,797, \quad (12)$$

где $a_p = 0,78$.

Выбираем $ai = 0,8$.

Электромагнитные нагрузки при двукратной перегрузки: $B_\delta' = 0,73 \text{ Тл}$,
 $A' = 39000 \text{ А/м}$;

Коэффициент формы кривой поля выбираем для однослойных обмоток:
 $K_{об} = 0,95 - 0,96$;

Обмоточный коэффициент предварительно принимаем: $k_o' = 1,11$.

Рассчитываем синхронную частоту вращения:

$$n_1 = \frac{60 \cdot f_1}{p} = \frac{60 \cdot 400}{6} = 4000 \frac{\text{об}}{\text{мин}}. \quad (13)$$

Из формулы 6 получаем значение длины якоря:

$$l_1 = \frac{6,1 \cdot 10^7 \cdot P'}{D_1^2 \cdot n_1 \cdot A'_1 \cdot B'_\delta \cdot \alpha' \cdot k_{о\phi} \cdot k_\phi} = \frac{6,1 \cdot 10^7 \cdot 66,940}{34,8^2 \cdot 4000 \cdot 39000 \cdot 0,8 \cdot 0,73 \cdot 0,96 \cdot 1,11} = 0.035 \text{ м}. \quad (14)$$

2.3. Расчет обмотки и геометрии магнитопровода статора.

Сердечник собирают из отдельных отштампованных листов электротехнической стали толщиной 0,5 мм, имеющие изоляционное покрытие для уменьшения потерь от вихревых токов.

Для сердечников статора с высотой оси вращения $h = 28 \div 280$ мм принимаем марку холоднокатаной электротехнической стали 2411 с термостойким электроизоляционным покрытием листов.

Предварительное значение магнитного потока, рассчитываем по формуле:

$$\Phi' = ai' \cdot \tau \cdot l' \cdot B_{\delta}' = 0,8 \cdot 0,09 \cdot 0,035 \cdot 0,73 = 0,0018 \text{ Вб}, \quad (15)$$

где $\tau = \frac{\pi \cdot D}{2p} = \frac{3,14 \cdot 0,348}{12} = 0,09$ м. -полюсное деление.

Число пазов (зубцов) магнитопровода статора:

$$Z_1 = 2p \cdot m \cdot q = 12 \cdot 3 \cdot 2 = 72 \quad (16)$$

где $q = 2$ – количество зубцов статора, приходящейся на полюс и фазу.

ЭДС холостого хода:

$$E_0 = k_E \cdot U_{\phi} = 1,109 \cdot 220 = 243 \text{ В}. \quad (17)$$

Предварительное количество витков в обмотке фазы

$$W' = \frac{E_0}{4 \cdot k_{об} \cdot k_{\phi} \cdot f \cdot \Phi} = \frac{243}{4 \cdot 0,96 \cdot 1,11 \cdot 400 \cdot 0,0018} = 77,19 \text{ Вб} \quad (18)$$

Число эффективных проводников в пазу

$$n_n' = \frac{W' \cdot a}{q \cdot p} = \frac{77,19 \cdot 1}{2 \cdot 6} = 6,43, \quad (19)$$

где a – количество параллельных ветвей обмотки статора.

Принимаем значение: $n_n = 6$.

Предварительное значение номинального фазного тока двигателя

$$I_1 = \frac{P_2}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{л}} \cdot \cos \varphi \cdot \eta'} = \frac{40000}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,724 \cdot 0,9} = 91,76 \text{ А.} \quad (20)$$

Уточняем предварительно установленные параметры W' , A'_1 и B_{δ}'

Число витков:

$$W = \frac{n_n \cdot p \cdot q}{a} = \frac{6 \cdot 6 \cdot 2}{1} = 72. \quad (21)$$

Уточняем значение индукции в воздушном зазоре:

$$B_{\delta} = \frac{B'_{\delta} \cdot W'}{W} = \frac{0,73 \cdot 77}{72} = 0,78 \text{ Тл.} \quad (22)$$

Уточняем значение магнитного потока:

$$\Phi = \frac{\Phi' \cdot W'}{W} = \frac{77,19 \cdot 77}{72} = 0,0022 \text{ Вб.} \quad (23)$$

Уточненное значение линейной нагрузки статора

$$A = \frac{Z_1 \cdot n_n \cdot I_1}{\pi \cdot D \cdot a} = \frac{77 \cdot 6 \cdot 91,76}{3,14 \cdot 0,348 \cdot 1} = 36245 \frac{\text{А}}{\text{м}}. \quad (24)$$

Найденное уточненное значение линейной нагрузки не должно отличаться от предварительного значения более, чем на 10%:

$$\left| \frac{A'_1 - A_1}{A_1} \right| = \left| \frac{36245 - 39000}{36245} \right| \cdot 100\% = 7\% \quad (25)$$

Развернутая схема обмотки статора в Приложение А

Ширина зубца:

$$b_{31} = \frac{t_1 \cdot B_{\delta}}{k_c \cdot B_{31}} = \frac{0,0152 \cdot 0,73}{0,96 \cdot 1,7} = 0,007 \text{ м,} \quad (26)$$

где $t_1 = \frac{\pi \cdot D}{z_1} = 0,0152$ мм. - зубцовое деление по внутреннему диаметру статора;

$k_c = 0,96 - 0,97$ – коэффициент заполнения паза, выбираем $k_c = 0,97$;

$B_{з1} = 1,6 - 1,8$ Тл. – среднее значение магнитной индукции в зубцах статора для двигателей по степени защиты IP44.

Определяем размеры трапецеидальных пазов.

Высота спинки статора:

$$h_{c1} = \frac{\Phi}{2 \cdot k_c \cdot l_1 \cdot B_{c1}} = \frac{0,0022}{2 \cdot 0,96 \cdot 0,035 \cdot 1,3} = 0,025 \text{ м}, \quad (27)$$

где $B_{c1} = 1,2 - 1,4$ Тл. – индукция в спинке статора.

Высота паза:

$$h_{п1} = \frac{D_a - D}{2} - h_{c1} = \frac{0,452 - 0,348}{2} - 0,025 = 0,025 \text{ м}. \quad (28)$$

Большая ширина паза:

$$b_1 = \frac{\pi(D_1 + 2h_{п1})}{z_1} - b_{з1} \quad (29)$$

$$b_1 = \frac{3,14 \cdot (0,348 + 2 \cdot 0,025)}{72} - 0,007 = 0,010 \text{ м}.$$

Меньшая ширина паза:

$$b_2 = \frac{\pi(D_1 + 2h_{ш1} - b_{ш1}) - z_1 \cdot b_{з1}}{z_1 - \pi}, \quad (30)$$

где $h_{ш1} = 0,0005$ м – высота шлица;

$b_{ш1} = 0,3 \cdot \sqrt{h} = 0,3 \cdot 0,53 = 0,005$ – ширина шлица.

$$b_2 = \frac{3,14(0,348 + 2 \cdot 0,0005 - 0,005) - 72 \cdot 0,007}{72 - 3,14} = 0,008 \text{ м}.$$

Проверка правильности определения большей и меньшей ширины паза:

$$z_1(b_1 - b_2) + \pi(b_2 - b_{ш1}) - 2\pi(h_{п1} - h_{ш1}) = 0 \quad (31)$$

$$72 \cdot (0,0102 - 0,008) + 3,14 \cdot (0,008 - 0,005) - 2 \cdot 3,14 \cdot (0,027 - 0,0005) = 0$$

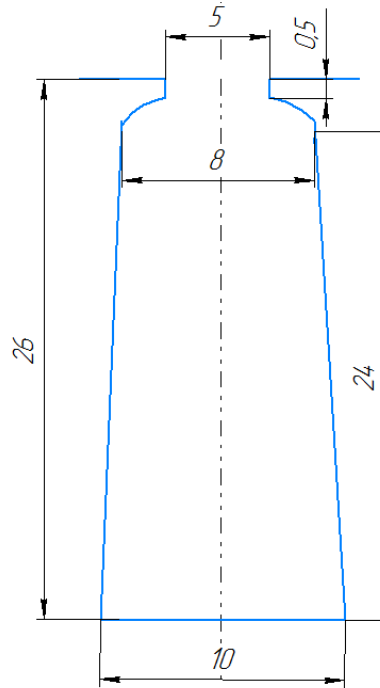


Рисунок 9 – Паз статора с основными размерами.

Площадь поперечного сечения паза в штампе:

$$S_{п1} = \frac{b_1 + b_2}{2} \left(h_{п1} - h_{ш1} - \frac{b_2 + b_{ш1}}{2} \right) \quad (32)$$

$$S_{п1} = \frac{0,0102 + 0,008}{2} \left(0,027 - 0,0005 - \frac{0,008 + 0,005}{2} \right) = 2,26 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2.$$

Припуски на сборку сердечников статора и ротора с $h = 0,28$ м по высоте $h_c = 0,0003$ м, по ширине $b_c = 0,0003$ м.

Площадь поперечного сечения паза в свету:

$$S'_{п1} = \left(\frac{b_1 + b_2}{2} - b_c \right) - \left(h_{п1} - h_{ш1} - \frac{b_2 + b_{ш1}}{2} - h_c \right), \quad (33)$$

$$S'_{п1} = \left(\frac{0,0102 + 0,008}{2} - 3 \cdot 10^{-4} \right) \cdot \left(0,027 - 0,0005 - \frac{0,008 + 0,005}{2} - 3 \cdot 10^{-4} \right) = 2,16 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2.$$

Площадь поперечного сечения корпусной изоляции:

$$S_{и} = b_{и1} \cdot (2h_{п1} + b_1 + b_2), \quad (34)$$

где $b_{и1} = 0,00058$ м – среднее значение односторонней толщины корпусной изоляции.

$$S_{и} = 0,00058 \cdot (2 \cdot 0,027 + 0,0102 + 0,008) = 4,162 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2.$$

Площадь поперечного сечения прокладок между верхней и нижней катушками в пазу, на дне паза и под клином:

$$S_{пр} = (0,5b_1 + 0,75b_2) \cdot 10^{-3} = 0,5 \cdot 0,0102 + 0,75 \cdot 0,008 = 1,12 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2 \quad (35)$$

Площадь поперечного сечения паза, занимаемая обмоткой:

$$S''_{п1} = S'_{п1} - S_{и} - S_{пр} = (21,6 - 4,162 - 1,12) \cdot 10^{-5} = 1,634 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2. \quad (36)$$

Предварительное значение диаметра элементарного изолированного провода:

$$d' = \sqrt{\frac{k'_{п} \cdot S''_{п1}}{n_n \cdot c}} = \sqrt{\frac{0,75 \cdot 1,634 \cdot 10^{-4}}{6 \cdot 7}} = 0,0017 \text{ м}, \quad (37)$$

где $c = 7$ – количество элементарных проводов в эффективном;

$k'_{п} \leq 0,75$ – коэффициент заполнения при ручной укладке.

(131)

Выбираем для намотки провод марки ПНЭТ-имид. Стандартизованный диаметр изолированного провода $d = 1,700$ мм, площадь поперечного сечения неизолированного провода $qa = 2,27$ мм².

Уточняем коэффициент паза:

$$k_{\text{п}} = \frac{n_n \cdot c \cdot d^2}{S''_{\text{п1}}} = \frac{6 \cdot 7 \cdot 1,700 \cdot 10^{-3}}{1,634 \cdot 10^{-4}} = 0,742 \quad (38)$$

Плотность тока в обмотке статора:

$$J_1 = \frac{I_1}{c \cdot S \cdot a_1} = \frac{91,76}{7 \cdot 2,27 \cdot 1} = 5,77 \frac{\text{А}}{\text{мм}^2} \quad (39)$$

Уровень удельной тепловой нагрузки статора от потерь в обмотке:

$$A_1 J_1 = 2092,5 \frac{\text{А}^2}{\text{см} \cdot \text{мм}^2}$$

2.4. Геометрический расчет ротора

Для расчёта геометрических размеров ротора, следует определить необходимый объем постоянных магнитов. Алгоритм расчета и значения коэффициентов зависит от выбранного типа ротора. В данной работе был выбран ротор коллекторного типа.

Значение коэффициентов для ротора коллекторного типа: коэффициент падения магнитного напряжения в магнитной цепи в долях МДС реакции якоря $\beta_1 = 1,2 - 1,25$; коэффициент рассеяния магнита в режиме холостого хода $\sigma_0 = 1,15 - 1,20$; коэффициент краткости тока короткого замыкания $\sigma_0 = 1,15 - 1,20$; коэффициент приведения МДС реакции якоря по продольной оси МДС возбуждения $k_{ad} = 0,82 - 0,87$; коэффициент краткости тока КЗ $k_{\text{кз}} = 2,22 - 2,87$.

Для постоянных магнитов индукция при холостом ходе в нейтральном сечении:

$$B_{\text{мо}} = 0,9 \cdot B_r = 0,9 \cdot 0,75 = 0,675 \text{ Тл}, \quad (40)$$

где $B_r = 0,75$ – магнитная индукция для марки ЮНДК35Е5Б магнитотвердого материала литого сплава (ГОСТ 17809-72).

Напряженность поля в магните при установившемся КЗ:

$$H_{MK} = 0,5 \cdot H_c = 0,5 \cdot 96000 = 48000 \frac{A}{M}, \quad (41)$$

где $H_c = 96000 \frac{A}{M}$ – напряженность поля для марки ЮНДК35Е5Б магнитотвердого материала литого сплава (ГОСТ 17809-72).

Объем магнита определяется по формуле:

$$V_M = \frac{0,225 \cdot P_1 \cdot \beta_1 \cdot \sigma_0 \cdot k_{ad} \cdot k_{K3}}{B_{MO} \cdot H_{MK} \cdot k_\phi \cdot f \cdot \sqrt{1 - \frac{\cos \varphi}{k_{K3}} - \frac{\sin \varphi}{k_{K3}}}} \quad (42)$$

$$V_M = \frac{0,225 \cdot 66940 \cdot 1,22 \cdot 1,17 \cdot 0,85 \cdot 2,5}{0,675 \cdot 48000 \cdot 1,1 \cdot 400 \cdot \sqrt{1 - \frac{0,725}{2,5} - \frac{0,688}{2,5}}} = 0,00352 \text{ м}^3.$$

Предварительное значение ширины тангенциального намагниченного магнита:

$$b_{M'} = 0,5(a_{p'} - \Delta *) \cdot D = 0,5(0,65 - 0,1) \cdot 0,348 = 0,096 \text{ м}, \quad (43)$$

где $a_{p'} = 0,6 - 0,7$ – конструктивный коэффициент полюсного перекрытия;

$\Delta * = 0,07 - 0,15$ – относительный показатель, характеризующий зазор между внутренними торцами соседних магнитов.

Высота тангенциально намагниченного магнита:

$$h_M = \frac{V_M}{2p \cdot l_1 \cdot b_{M'}} = \frac{0,00352}{12 \cdot 0,035 \cdot 0,096} = 0,088 \text{ м}. \quad (44)$$

Уточняем конструктивный коэффициент полюсного перекрытия:

$$a_p = \frac{\tau - h_M}{\tau} = \frac{0,091 - 0,088}{0,091} = 0,9 \quad (45)$$

Уточняем ширину тангенциального намагниченного магнита:

$$b_M = \frac{V_M}{2p \cdot l_1 \cdot h_M} = \frac{0,00352}{12 \cdot 0,035 \cdot 0,088} = 0,095 \text{ м}. \quad (46)$$

Внешний диаметр немагнитной втулки:

$$D_{\text{вт}} = D - 2(\delta + b_{\text{м}}) = 0,348 - 2(0,0006 + 0,096) = 0,155 \text{ м}, \quad (47)$$

где $\delta = 0,0006 \text{ м}$ – величина воздушного зазора.

Выбираем ширину магнита 8 мм.

Высота спинки немагнитной втулки: $h_{\text{вт}} = (4 - 10) \cdot 10^{-3} \text{ м}$.

Диаметр вала ротора:

$$D_{\text{в}} \leq D_{\text{вт}} - 2 \cdot h_{\text{вт}} = 0,155 - 2 \cdot 0,004 = 0,147 \text{ м}. \quad (48)$$

Принимаем $D_{\text{в}} = 120 \text{ мм}$.

2.5. Расчет магнитной цепи

Для синхронных машин характерно сильное насыщение стали зубцов статора и ротора, поэтому расчёт магнитной цепи СДПМ будет рассчитываться при холостом ходе.

Магнитная индукция в воздушном зазоре распределяется неравномерно, в виде провалов, так-как магнитное сопротивление участков в воздушном зазоре из-за зубчатой формы статора различается. Вследствие этого магнитное напряжение и магнитное сопротивление воздушного зазора должно возрасть.

Окончательное значение индукция в зубцах статора:

$$B_{z1} = \frac{B_1 \cdot t_1}{b_{z1} \cdot k_c} = \frac{0,78 \cdot 0,015}{0,0073 \cdot 0,96} = 1,7 \text{ Тл}. \quad (49)$$

Окончательное значение индукция в спинке якоря:

$$B_{c1} = \frac{\Phi}{2 \cdot k_c \cdot l_1 \cdot h_{c1}} = \frac{0,0022}{2 \cdot 0,96 \cdot 0,035 \cdot 0,025} = 1,3 \text{ Тл}. \quad (50)$$

Расчет коэффициента воздушного зазора:

$$k_{\delta} = \frac{t_1 + \frac{5t_1 \cdot \delta}{b_{\text{ш1}}}}{t_1 + \frac{5t_1 \cdot \delta}{b_{\text{ш1}}} - b_{\text{ш1}}} = \frac{0,015 + \frac{5 \cdot 0,015 \cdot 0,6}{0,00502}}{0,015 + \frac{5 \cdot 0,015 \cdot 0,6}{0,00502} - 0,00502} = 1,26 \quad (51)$$

$$\delta_p = k_\delta \cdot \delta = 1,26 \cdot 0,0006 = 0,000756 \text{ м.} \quad (52)$$

Рассчитываем параметры схемы замещения.

Удельное сопротивление фазы обмотки якоря:

$$ra = p_0 \cdot \left(\frac{l_{cp} \cdot W}{q_a \cdot a} \cdot k_t \right) = p_0 \cdot \left(\frac{0,324 \cdot 72}{1,407 \cdot 10^{-5} \cdot 1} \cdot 1,22 \right) = 0,035 \text{ Ом,} \quad (53)$$

где $p_0 = 1,75 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ – удельное сопротивление при $t = 20^\circ \text{C}$;

$k_t = 1,22$ – температурный коэффициент сопротивления;

l_{cp} – средняя длина витка.

Шаг обмотки статора:

$$\beta = 0,8 \quad (54)$$

Коэффициенты, учитывающие укорочение обмотки:

$$k_{y1} = \frac{1 + 3\beta}{4} = \frac{1 + 3 \cdot 0,8}{4} = 0,85 \quad (55)$$

$$k_{y2} = \frac{1 + 3k_{y1}}{4} = \frac{1 + 3 \cdot 0,85}{4} = 0,8875 \quad (56)$$

Удельная проводимость пазового рассеяния для прямоугольного паза:

$$\lambda_{\pi} = \frac{k_{y1}(h_{\pi} - h_k)}{3b_1} + \frac{k_{y2} \cdot h_k}{b_{\pi}} \quad (57)$$

$$\lambda_{\pi} = \frac{0,85(0,0267 - 0,0014)}{3 \cdot 0,0267} + \frac{0,8875 \cdot 0,0014}{0,005} = 0,515$$

где $h_k = (1,3 - 1,5) \cdot 10^{-3} \text{ м}$. – высота коронки зубца.

Удельная проводимость дифференциального рассеяния:

$$\lambda_d = \frac{\delta_p \cdot ai'}{b_{\pi} + 0,8\delta_p} (0,25 + 0,78 \cdot \beta), \quad (58)$$

где ai' – расчетный коэффициент полюсного перекрытия.

$$\lambda_d = \frac{0,000756 \cdot 0,8}{0,005 + 0,8 \cdot 0,000756} = 0,107$$

Длина лобовой части витка:

$$l_{\pi} = 1,4 \cdot \tau = 1,4 \cdot 0,0911 = 0,127 \text{ м.} \quad (59)$$

Средняя длина витка:

$$l_{cp} = 2(l + l_l) = 2(0,035 - 0,127) = 0,324\text{м.} \quad (60)$$

Удельная проводимость лобового рассеяния:

$$\lambda_l = \frac{0,39 \cdot q(l_l - 0,64 \cdot \tau)}{l} \quad (61)$$

$$\lambda_l = \frac{0,39 \cdot 2(0,127 - 0,64 \cdot 0,0911)}{0,035} = 1,356$$

Индуктивное сопротивление рассеяния фазы обмотки якоря:

$$x_\sigma = 4\pi\mu_0 \cdot f \cdot \frac{W^2}{p \cdot q} [(\lambda_p + \lambda_d) \cdot l + \lambda_l \cdot l_l] \quad (62)$$

$$x_\sigma = 16 \cdot 3,14^2 \cdot 400 \cdot \frac{72^2}{6 \cdot 2 \cdot 10^7} [(0,52 + 0,107) \cdot 0,035 + 1,35 \cdot 0,13] = 0,53 \text{ Ом}$$

Коэффициент магнитной проводимости полюса в продольном направлении:

$$\Lambda_{nd} = \frac{\mu_{пм} \cdot b_M \cdot l_M}{h_M} = \frac{1,27 \cdot 0,096 \cdot 0,035}{0,0088} = 0,048, \quad (63)$$

где $\mu_{пм} = 1,23$ – магнитная проницаемость возврата материала постоянного магнита из материала.

Коэффициент магнитной проводимости воздушного зазора по продольной оси:

$$\Lambda_{\delta d} = \frac{\tau \cdot l_M}{k_{\mu d} \cdot \delta_p} = \frac{0,0911 \cdot 0,035}{1,2 \cdot 0,000756} = 3,485, \quad (64)$$

где $k_{\mu d} = 1,1-1,3$ – коэффициент, учитывающий насыщение магнитной цепи машины по продольной оси.

Уточняем коэффициент реакции якоря по продольной оси:

$$k_{ad} = \frac{a_p \cdot \pi + \sin(a_p \cdot \pi)}{4 \cdot \sin(a_p \cdot \frac{\pi}{2})} = \frac{0,034 \cdot 3,14 + \sin(0,034 \cdot 3,14)}{4 \cdot \sin(0,034 \cdot \frac{3,14}{2})} = 0,99 \quad (65)$$

Коэффициент проводимости машины по продольной оси:

$$\Lambda_{ad} = k_b \cdot k_{ad} \cdot \frac{\Lambda_{\delta d} \cdot \Lambda_{nd}}{\Lambda_{\delta d} + \Lambda_{nd}} = 1,08 \cdot 0,99 \cdot \frac{3,485 \cdot 0,048}{3,485 + 0,048} = 0,0511, \quad (66)$$

где $k_b = 1,05 - 1,1$ – коэффициент формы поля возбуждения.

Индуктивное сопротивление якоря по продольной оси:

$$x_{ad} = \frac{16}{10^7 \cdot p} \cdot m \cdot f(W \cdot k_{o6})^2 \cdot \Lambda_{ad} \quad (67)$$

$$x_{ad} = \frac{16}{10^7 \cdot 6} \cdot 3 \cdot 400 \cdot (72 \cdot 0,96)^2 \cdot 0,0511 = 0,078 \text{ Ом.}$$

Коэффициент магнитной проводимости полюса в поперечном направлении:

$$\Lambda_{nq} = \frac{\mu_{пм} \cdot \tau \cdot l_M}{h_M} = \frac{1,27 \cdot 0,0911 \cdot 0,035}{0,088} = 0,0457, \quad (68)$$

Коэффициент магнитной проводимости воздушного зазора по поперечной оси:

$$\Lambda_{\delta q} = \frac{(\tau - h_M) \cdot l_M}{k_{nq} \cdot \delta_p} = \frac{(0,0911 - 0,0088) \cdot 0,035}{1,3 \cdot 0,000756} = 0,11 \quad (69)$$

где $k_{nq} = 1,2 - 1,4$ – коэффициент, учитывающий насыщение магнитной цепи машины по поперечной оси.

Уточняем коэффициент реакции якоря по поперечной оси:

$$k_{aq} = \frac{(a_p \cdot \pi + \sin(a_p \cdot \pi)) + \frac{2}{3} \cdot \cos(a_p \cdot \frac{\pi}{2})}{4 \cdot \sin(a_p \cdot \frac{\pi}{2})} \quad (70)$$

$$k_{aq} = \frac{(0,034 \cdot 3,14 + \sin(0,034 \cdot 3,14)) + \frac{2}{3} \cdot \cos(0,034 \cdot \frac{3,14}{2})}{4 \cdot \sin(0,034 \cdot \frac{3,14}{2})} = 4,098$$

Коэффициент проводимости машины по поперечной оси:

$$\Lambda_{aq} = k_b \cdot k_{aq} \cdot \frac{\Lambda_{\delta q} \cdot \Lambda_{nq}}{\Lambda_{\delta q} + \Lambda_{nq}} = 1,08 \cdot 4,098 \cdot \frac{0,11 \cdot 0,0457}{0,11 + 0,0457} = 0,142 \quad (71)$$

Индуктивное сопротивление якоря по поперечной оси:

$$x_{aq} = \frac{16}{10^7 \cdot p} \cdot m \cdot f(W \cdot k_{об})^2 \cdot L_{aq} \quad (72)$$

$$x_{aq} = \frac{16}{10^7 \cdot 6} \cdot 3 \cdot 400 \cdot (72 \cdot 0,96)^2 \cdot 0,142 = 0,2118 \text{ Ом.}$$

Полные индуктивные сопротивления обмотки якоря по продольной и поперечной осям соответственно:

$$x_d = x_{ad} \cdot x_\sigma = 0,078 \cdot 0,53 = 0,04134 \text{ Ом.} \quad (73)$$

$$x_q = x_{aq} \cdot x_\sigma = 0,2118 \cdot 0,53 = 0,112254 \text{ Ом.} \quad (74)$$

Расчет проводимостей рассеяния ротора коллекторного типа.

Проводимость рассеяния ротора коллекторного типа состоит из проводимости самого магнита λ_{sm} , проводимостей рассеяния полюсов $\lambda_{сп}$. В свою очередь, проводимость рассеяния магнита λ_{sm} состоит из боковых $\lambda_{сmb}$ и торцевых $\lambda_{сmt}$ проводимостей рассеяния на один магнит (рисунок 10).

Торцевая проводимость магнита:

$$\lambda_{сmt} = k_\lambda \cdot \mu_0 \cdot b_M = 0,35 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 0,096 = 4,21 \cdot 10^{-8} \text{ Гн,} \quad (75)$$

где $k_\lambda = 0,35$ – отношение проводимостей рассеяния магнита к проводимости рассеяния эквивалентного элеткромагнита;

Боковая проводимость рассеяния магнита:

$$\lambda_{сmb} = k_\lambda \cdot \mu_0 \cdot \frac{l_M}{2} (\mu_{вт} + 1) = 0,354 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 0,035 = 1,68 \cdot 10^{-8} \text{ Гн,} \quad (76)$$

где $\mu_{вт}=1$ – относительная магнитная проницаемость диамагнитной втулки.

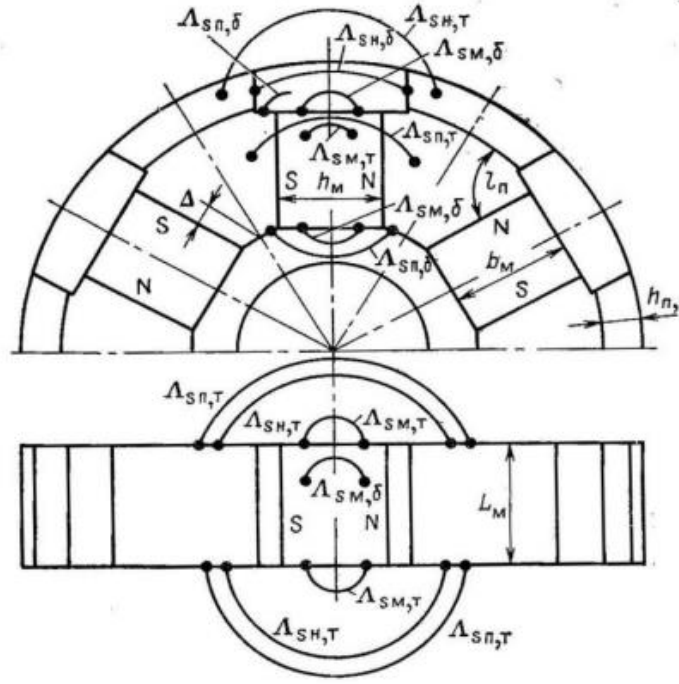


Рисунок 10 – К расчету проводимостей рассеяния в индукторе коллекторного типа.

Проводимость рассеяния магнита:

$$\lambda_{SM} = 2 \cdot \lambda_{SMT} + 2 \cdot \lambda_{SMB} = 2(4,21 + 1,68) \cdot 10^{-8} = 1,18 \cdot 10^{-7} \text{ Гн.} \quad (77)$$

Проводимость рассеяния полюсов $\lambda_{s\Pi}$ складывается из проводимости бокового $\lambda_{s\PiБ}$ рассеяния полюсов и торцевого $\lambda_{s\PiТ}$ рассеяния полюсов.

Минимальное расстояние между двух соседних полюсов:

$$C_p = (1 - a_p) \cdot \tau = (1 - 0,034) \cdot 0,0911 = 0,088 \text{ м.} \quad (78)$$

Минимальное расстояние между магнитами вдоль окружности немагнитной втулки:

$$\Delta = \left(\frac{\tau}{2}\right) - \frac{h_M}{2} = \left(\frac{0,0911}{2}\right) - \frac{0,088}{2} = 0,00156 \text{ м} \quad (79)$$

Проводимость бокового рассеяния полюсов:

$$\lambda_{s\PiБ} = 2 \cdot \mu_0 \cdot l_M \left[\ln \left(1 + \frac{\Delta}{l_M \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2p}\right)} \right) + \ln \left(1 + \frac{C_p - h_M}{l_M} \right) \right] \quad (80)$$

$$\lambda_{сПБ} = 8 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 0,035 \cdot \left[\ln \left(1 + \frac{0,00156}{0,035 \cdot \cos \left(\frac{3,14}{12} \right)} \right) + \ln(1) \right] = 3,96 \cdot 10^{-9} \text{ Гн.}$$

Проводимость торцевого рассеяния полюсов:

$$\lambda_{сПТ} = \frac{2 \cdot \mu_0 \cdot h_M}{\pi^2 \cdot \sin \left(\frac{\pi}{2} \right)} (\gamma_1 \cdot \ln \gamma_1 - \gamma_2 \cdot \ln \gamma_2 - \gamma_3), \quad (81)$$

где

$$\gamma_2 = 1 + \left(\frac{0,5 \cdot \pi \cdot \Delta}{h_M} \right) \sin \left(\frac{\pi}{2p} \right) \quad (82)$$

$$\gamma_2 = 1 + \left(\frac{0,5 \cdot 3,14 \cdot 0,00156}{0,088} \right) \sin \left(\frac{3,14}{12} \right) = 1,007$$

$$\gamma_3 = \left(\frac{\pi \cdot b_M}{h_M} \right) \cdot \sin \left(\frac{\pi}{2p} \right) = \left(\frac{3,14 \cdot 0,095}{0,088} \right) \cdot \sin \left(\frac{3,14}{12} \right) = 0,884 \quad (83)$$

$$\gamma_1 = \gamma_2 + \gamma_3 = 1,007 + 0,884 = 1,89 \quad (84)$$

$$\lambda_{сПТ} = \frac{2 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 0,088}{3,14^2 \cdot \sin \left(\frac{3,14}{2} \right)} (1,89 \cdot \ln 1,89 - 1,007 \cdot \ln 1,007 - 0,884) = 7 \cdot 10^{-9} \text{ Гн.}$$

Проводимость рассеяния полюсов:

$$\lambda_{сП} = \lambda_{сПБ} + 2\lambda_{сПТ} = (3,96 + 2 \cdot 7) \cdot 10^{-9} = 1,8 \cdot 10^{-8} \text{ Гн.} \quad (85)$$

Проводимость рассеяния ротора:

$$\lambda_s = \lambda_{сП} + \lambda_{сМ} = 1,8 \cdot 10^{-8} + 1,17 \cdot 10^{-7} = 1,358 \cdot 10^{-7} \text{ Гн.} \quad (86)$$

МДС, необходимая для проведения потока через воздушный зазор:

$$F_{\delta 0} = 0,8 \cdot B_{\delta} \cdot \delta_p \cdot 10^6 = 0,8 \cdot 0,73 \cdot \delta_p \cdot 10^6 = 441 \text{ А.} \quad (87)$$

Подбираем напряженность поля в зубце и в спинке якоря из таблицы намагничивания для марки листовой электрической стали Э44.

Напряженность поля в зубцах при индукции $B_{з1} = 1,7 \text{ Тл}$:

$$H_3 = 13000 \frac{\text{А}}{\text{м}}$$

Напряженность поля в спинке при индукции $B_{с1} = 1,3 \text{ Тл}$:

$$H_a = 1080 \frac{\text{А}}{\text{м}}$$

МДС необходимая для проведения потока через зубцовую зону:

$$F_{30} = h_{п1} \cdot H_3 = 0,025 \cdot 13000 = 347 \text{ А.} \quad (88)$$

Средняя длина силовой линии в спинке якоря:

$$l_a = \frac{\pi(D + 2h_{п1} + 2h_k + h_a)}{2p} \quad (89)$$

$$l_a = \frac{3,14(0,348 + 2 \cdot 0,026 + 2 \cdot 0,0014 + 0,025)}{12} = 0,112 \text{ м.}$$

МДС затрачиваемая на проведение потока через спинку якоря:

$$F_{da} = l_a \cdot H_a = 0,112 \cdot 1080 = 120,65 \text{ А.} \quad (90)$$

Суммарная МДС на пару полюсов, необходимая для проведения потока через магнитную цепь якоря:

$$F_{10} = 2F_{\delta 0} + 2F_{30} + F_{a0} = 2 \cdot 472 + 2 \cdot 347 + 120,65 = 1797 \text{ А.} \quad (91)$$

Особенностью расчета ротора коллекторного типа является намагничивание магнита в тангенциальном направлении. Магнитный поток воздушном зазоре создается двумя магнитами, поэтому магнитный расчёт удобнее вести на один магнит.

Поток рассеяния между двумя половинками полюсов:

$$\Phi_{сП} = F_{10} \cdot 3 \cdot \lambda_{сП} = 1797 \cdot 3 \cdot 1,8 \cdot 10^{-8} = 9,19 \cdot 10^{-5} \text{ Вб.} \quad (92)$$

Площадь поперечного сечения магнитного потока полуполюса:

$$S_{П} = \frac{l \cdot [b_m + 0,5 \cdot (\tau - h_m)]}{2} \quad (93)$$

$$S_{П} = \frac{0,034 \cdot [0,095 + 0,5 \cdot (0,0911 - 0,088)]}{2} = 1,68 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2.$$

Индукция в полюсном наконечнике:

$$B_{П} = \frac{0,5 \cdot \Phi_{\delta 0} + \Phi_{сП}}{S_{П}} = \frac{0,5 \cdot 0,0022 + 9,72 \cdot 10^{-5}}{1,68 \cdot 10^{-3}} = 0,703 \text{ Тл.} \quad (94)$$

Напряженность полуполюса:

$$H_{\Pi} = 208 \frac{\text{А}}{\text{м}}.$$

Средняя длина силовой линии на полуполюсе:

$$l_n = \sqrt{\left(\frac{h_m}{2}\right)^2 + \left(\frac{b_p}{2}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{0,088}{2}\right)^2 + \left(\frac{0,0911 - 0,088}{2}\right)^2} = 0,044 \text{ м.} \quad (95)$$

МДС затрачиваемая на проведение магнитного потока по полюсу:

$$F_{\Pi} = l_n \cdot H_{\Pi} = 0,044 \cdot 208 = 9,16 \text{ А.} \quad (96)$$

Индукция в стыке магнита с полюсом:

$$B_{\delta \text{сТМ}} = \frac{0,5 \cdot \Phi_{\delta 0} + \Phi_{\text{сП}}}{S_{\text{М}}} = \frac{0,5 \cdot 0,0022 + 9,72 \cdot 10^{-5}}{3,32 \cdot 10^{-3}} = 0,36 \text{ Тл.} \quad (97)$$

где $S_{\text{М}} = b_{\text{М}} \cdot l = 3,32 \cdot 10^{-3}$

МДС стыка полюса с магнитом:

$$F_{\delta \text{сТМ}} = 0,8 B_{\delta \text{сТМ}} \cdot \delta_{\text{ст}} \cdot 10^6 = 0,8 \cdot 0,36 \cdot 50 = 14,290 \text{ А.} \quad (98)$$

где $\delta_{\text{ст}} = 5 \cdot 10^{-5} \text{ м.}$ – расчетный размер стыка.

Поток рассеяния магнита:

$$\Phi_{\text{сМ}} = (F_{10} + 2F_{\Pi} + 2F_{\delta \text{сТМ}}) \cdot \lambda_{\text{сМ}} \quad (99)$$

$$\Phi_{\text{сМ}} = (1797 + 2 \cdot 9,16 + 2 \cdot 14,290) \cdot 1,15 \cdot 10^{-7} = 2,05 \cdot 10^{-4} \text{ Вб.}$$

Магнитный поток и МДС магнита при ХХ:

$$\Phi_{\text{М0}} = 0,5 \cdot \Phi_{\delta 0} + \Phi_{\text{сП}} + \Phi_{\text{сМ}} \quad (100)$$

$$\Phi_{\text{М0}} = 0,5 \cdot 0,0022 + 9,19 \cdot 10^{-5} + 2,05 \cdot 10^{-6} = 1,39 \cdot 10^{-3} \text{ Вб.}$$

$$F_{\text{М0}} = F_{10} + 2F_{\Pi} + 2F_{\delta \text{сТМ}} \quad (101)$$

$$F_{\text{М0}} = 1797 + 2 \cdot 9,16 + 2 \cdot 14,290 = 1,74 \cdot 10^3 \text{ А.}$$

Коэффициент рассеяния магнита:

$$\sigma_0 = \frac{2\Phi_{M0}}{\Phi_{\delta 0}} = \frac{2 \cdot 1.39 \cdot 10^{-3}}{0,0022} = 1,27 \quad (102)$$

2.6. Характеристики короткого замыкания.

Характеристика КЗ представляет собой зависимость потока в магнитной системе Φ_k от МДС F_k при КЗ якоря.

Задаемся расчетной продольной током КЗ:

$$I_{dkp} = (2 - 4)I_{нф} = 4 \cdot 91,76 = 367 \text{ А.} \quad (103)$$

Расчетное сопротивление продольного тока КЗ:

$$X_s = x_\sigma + \frac{r_a^2}{X_q} = 0,53 + \frac{0,035^2}{0,749} = 0,53 \text{ Ом.} \quad (104)$$

ЭДС при КЗ:

$$E_{dk} = I_{dkp} \cdot X_s = 367 \cdot 0,53 = 195,48 \text{ В.} \quad (105)$$

Магнитный поток КЗ в якоре:

$$\Phi_{dk} = \frac{(\Phi_{\delta 0} E_{dk})}{E_0} = \frac{(0,0022 \cdot 195,5)}{269} = 1,6 \cdot 10^{-3} \text{ Вб.} \quad (106)$$

МДС реакции якоря:

$$F_a = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{m \cdot W \cdot k_o}{p} \cdot I_{нф} \cdot ka, \quad (107)$$

где $ka = 1,11$ – отношение основной волны потока реакции якоря к полному потоку реакции якоря.

$$F_a = \frac{\sqrt{2}}{3,14} \cdot \frac{3 \cdot 72 \cdot 0,96}{6} \cdot 91,76 \cdot 1,1 = 1569,9 \text{ А.} \quad (108)$$

МДС продольной реакции якоря при КЗ (на один полюс):

$$F_{ak} = \frac{F_a \cdot I_{dkp}}{I_{нф}} = \frac{1569,9 \cdot 366,95}{91,76} = 6279,6 \text{ А.} \quad (109)$$

Магнитное напряжение цепи якоря при КЗ:

$$F_{1k} = \frac{F_{10} \cdot E_{dk}}{E_0} = \frac{1698 \cdot 195,5}{243} = 1234 \text{ А.} \quad (110)$$

Поток дифференциального рассеяния при КЗ:

$$\Phi_{sd} = \frac{\Phi_{\delta 0} \cdot F_{ak}}{F_{10}} \left(1 - \frac{1}{ka \cdot k_{\Phi B}} \right) \quad (111)$$

$$\Phi_{sd} = \frac{0,0022 \cdot 6279}{1698} \left(1 - \frac{1}{1,11 \cdot 0,95} \right) = 3,488 \cdot 10^{-4} \text{ Вб.}$$

МДС полюса:

$$\Phi_{s\Pi k} = (F_{10} + 2F_{ak} + 2F_{\Pi})\lambda_{s\Pi} \quad (112)$$

$$\Phi_{s\Pi k} = (1698 + 2 \cdot 6279 + 2 \cdot 9,16) \cdot 1,8 \cdot 10^{-8} = 2,57 \cdot 10^{-4} \text{ Вб.}$$

$$B_{\Pi k} = \frac{0,5 \cdot \Phi_{dk} + \Phi_{s\Pi k}}{S_{\Pi}} = \frac{0,5 \cdot 1,6 \cdot 10^{-3} + 2,57 \cdot 10^{-4}}{1,69 \cdot 10^{-3}} = 0,62 \text{ Тл.} \quad (113)$$

$$H_{\Pi k} = 190 \frac{\text{А}}{\text{м}}.$$

$$F_{\Pi k} = H_{\Pi k} \cdot l_{\Pi} = 190 \cdot 0,044 = 8,36 \text{ А}$$

МДС стыка полюса с магнитом при КЗ:

$$B_{\delta \text{стМК}} = \frac{0,5 \cdot \Phi_{dk} + \Phi_{s\Pi k}}{S_{\text{М}}} = \frac{0,5 \cdot 1,59 \cdot 10^{-3} + 2,57 \cdot 10^{-4}}{3,32 \cdot 10^{-3}} = 0,32 \text{ Тл.} \quad (113)$$

$$F_{\delta \text{стМК}} = 0,8 \cdot B_{\delta \text{стМК}} \cdot \delta_{\text{стМ}} \cdot 10^6 = 0,8 \cdot 0,32 \cdot 50 = 12,67 \text{ А.} \quad (114)$$

Поток рассеяния магнита:

$$\Phi_{s\text{МК}} = (F_{1k} + 2F_{ak} + 2F_{\Pi k})\lambda_{s\text{М}} \quad (115)$$

$$\Phi_{s\text{МК}} = (1234 + 2 \cdot 6279 + 2 \cdot 8,36) \cdot 1,177 \cdot 10^{-7} = 1,63 \cdot 10^{-3} \text{ Вб.}$$

Расчетный поток рассеяния ротора при КЗ:

$$\Phi_{sk} = \Phi_{s\Pi k} + \Phi_{s\text{МК}} = 2,57 \cdot 10^{-4} + 1,63 \cdot 10^{-3} = 1,88 \cdot 10^{-3} \text{ Вб.} \quad (116)$$

Поток магнита при КЗ:

$$\Phi_{mk} = \Phi_{dk} + \Phi_{sd} + \Phi_{sk} \quad (117)$$

$$\Phi_{mk} = 1,6 \cdot 10^{-3} + 3,488 \cdot 10^{-4} + 1,88 \cdot 10^{-3} = 3,82 \text{ Вб.}$$

МДС магнита при КЗ:

$$F_{Mk} = F_{1k} + 2F_{ak} + 2F_{pk} = 1234 + 2 \cdot 6279 + 2 \cdot 8,36 = 1,38 \cdot 10^4 \text{ A.} \quad (118)$$

2.7. Построение диаграммы магнита и вольтамперной характеристики синхронного двигателя

На основании данных, полученных при расчете магнитной цепи СДПМ строим рабочую диаграмму магнита.

При построение диаграммы магнита из редкоземельного металлов учитываем, что кривая размагничивания совпадает с прямой возврата и имеет линейную форму. Кривая размагничивания строится по двум точкам – остаточному потоку и коэрцитивной МДС.

Для индуктора коллекторного типа:

$$\Phi_{\Gamma} = 2 \cdot B_{\Gamma} \cdot b_m \cdot l = 2 \cdot 0,75 \cdot 0,095 \cdot 0,035 = 4,99 \cdot 10^{-3} \text{ Вб.} \quad (119)$$

$$F_c = H_c \cdot h_m = 96000 \cdot 0,088 = 8448 \text{ A.} \quad (120)$$

Данные для построения диаграммы:

$$\Phi_{M0} = 1,39 \cdot 10^{-3} \text{ Вб.}$$

$$F_{M0} = 1,74 \cdot 10^3 \text{ A.}$$

$$\Phi_{sk} = 1,89 \cdot 10^{-3} \text{ Вб.}$$

$$F_{Mk} = 1,38 \cdot 10^4 \text{ A.}$$

Диаграмма магнита изображена на рисунке 10.

Пользуясь диаграммой магнита можно для любого режима работы СДПМ найти магнитный поток в воздушном зазоре с продольной составляющей реакцией якоря.

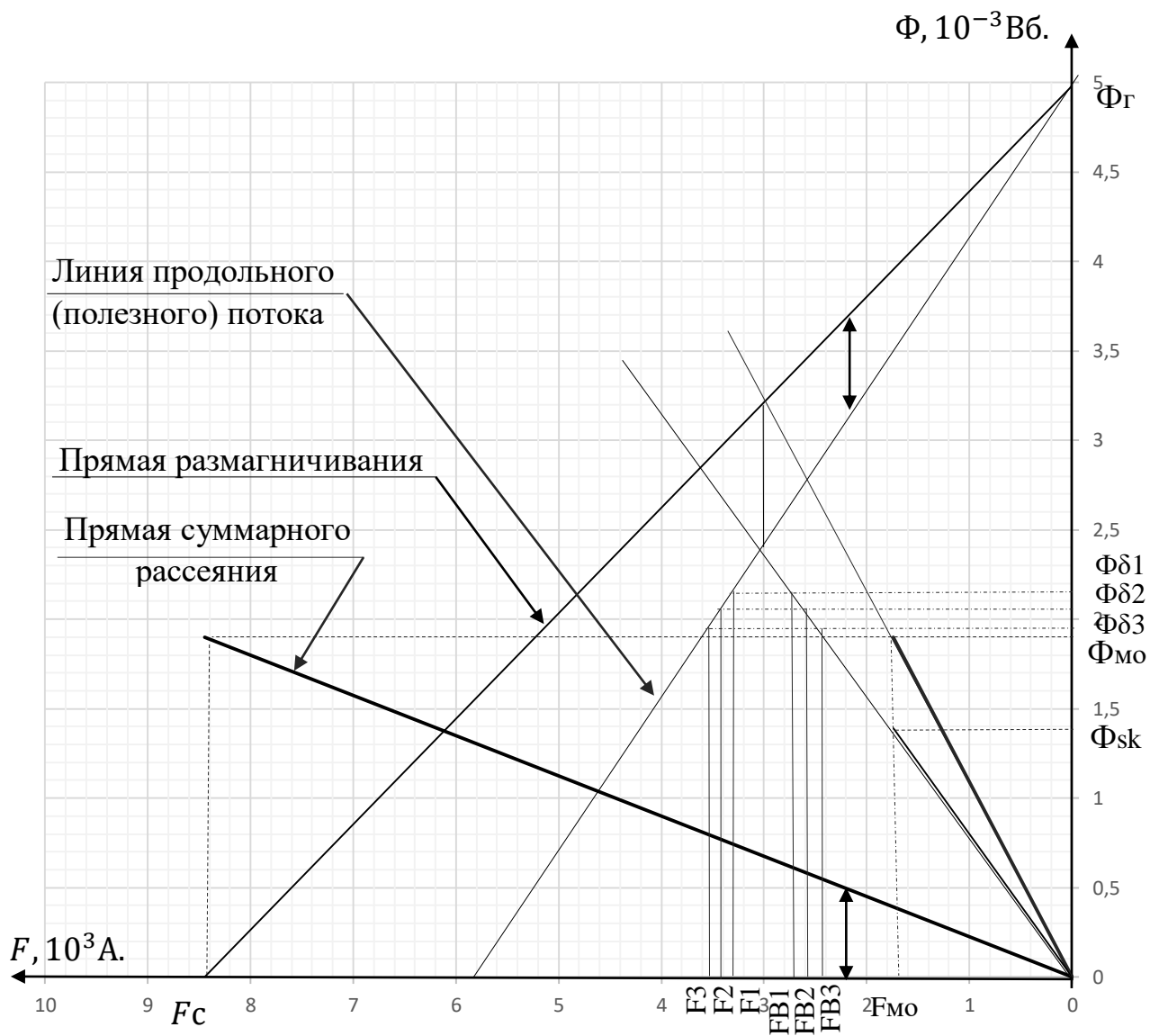


Рисунок 11 – Рабочая диаграмма магнита.

Зададимся несколькими рабочими точками, на указанной прямой, и определим соответствующие этим режимам значения тока нагрузки и напряжения двигателя. Например, в первой точке соответствует значение потока в воздушном зазоре $\Phi_{\delta 1}$ и некоторое значение МДС F_1 , расходуемой на проведение этого потока по магнитной цепи двигателя и преодоление размагничивающей продольной составляющей реакции якоря F_{ad} .

Находим данные, необходимые для построения внешней характеристики (рисунок 12):

$$\Phi_{\delta 1} = 2,15 \cdot 10^{-3}; F_1 = 3,3 \cdot 10^3 \text{ А}; F_{B1} = 2,74 \cdot 10^3 \text{ А}; F_{ad1} = 820 \text{ А}.$$

$$\Phi_{\delta 2} = 2,15 \cdot 10^{-3}; F_2 = 3,3 \cdot 10^3 \text{ A}; F_{B2} = 2,74 \cdot 10^3 \text{ A}; F_{ad2} = 560 \text{ A}.$$

$$\Phi_{\delta 3} = 1,95 \cdot 10^{-3}; F_3 = 3,46 \cdot 10^3 \text{ A}; F_{B3} = 2,42 \cdot 10^3 \text{ A}; F_{ad3} = 1,04 \cdot 10^3 \text{ A}.$$

Расчёт ЭДС нагруженного двигателя для трех точек:

$$E_0 = 268 \text{ В}.$$

$$Ei = 4,44 \cdot k_{об} \cdot f \cdot W \cdot \Phi_{\delta} \quad (121)$$

$$E_1 = 4,44 \cdot 0,96 \cdot 400 \cdot 2 \cdot 72 \cdot 2,15 \cdot 10^{-3} = 263,92 \text{ В}.$$

$$E_2 = 4,44 \cdot 0,96 \cdot 400 \cdot 2 \cdot 72 \cdot 2,05 \cdot 10^{-3} = 251,65 \text{ В}.$$

$$E_3 = 4,44 \cdot 0,96 \cdot 400 \cdot 2 \cdot 72 \cdot 1,95 \cdot 10^{-3} = 239,376 \text{ В}.$$

Величина тока при нагрузке:

$$I = \frac{F_{ad}}{S_1 \cdot \sin(\psi)}, \quad (122)$$

$$\text{где } S_1 = 0,9 \cdot m \cdot k_{об} \cdot \frac{W}{p} \cdot k_{ad} = 0,9 \cdot 3 \cdot 0,96 \cdot \frac{72}{6} \cdot 1 = 31,089.$$

Поправочные коэффициенты:

$$q_i = \frac{X_q - r_a \cdot \operatorname{tg}(\varphi)}{\left(S_1 \cdot \frac{Ei}{F_{adi}}\right) - x_{\sigma} + r_a \cdot \operatorname{tg}(\varphi)}, \quad (123)$$

$$q_1 = \frac{0,74 - 0,035 \cdot 0,95}{\left(31,09 \cdot \frac{263,92}{560}\right) - 0,53 + 0,035 \cdot 0,95} = 0,0505,$$

$$q_2 = \frac{0,74 - 0,035 \cdot 0,95}{\left(31,09 \cdot \frac{251,65}{820}\right) - 0,53 + 0,035 \cdot 0,95} = 0,0791$$

$$q_3 = \frac{0,74 - 0,035 \cdot 0,95}{\left(31,09 \cdot \frac{239,376}{1,04 \cdot 10^3}\right) - 0,53 + 0,035 \cdot 0,95} = 0,107.$$

Фазовый угол между током и ЭДС:

$$\psi = \operatorname{arctg}\left[\left(\frac{\operatorname{tg}\varphi \cdot (1 + q)}{2}\right) + \sqrt{\frac{\operatorname{tg}\varphi^2 \cdot (1 + q)^2}{4} + q}\right], \quad (124)$$

$$\psi_{10} = \arctg \left[\left(\frac{0,95 \cdot (1 + 0,05)}{2} \right) + \sqrt{\frac{0,95^2 \cdot (1 + 0,05)^2}{4} + 0,05} \right] = 0,80^\circ,$$

$$\psi_{20} = \arctg \left[\left(\frac{0,95 \cdot (1 + 0,079)}{2} \right) + \sqrt{\frac{0,95^2 \cdot (1 + 0,079)^2}{4} + 0,079} \right] = 0,83^\circ,$$

$$\psi_{30} = \arctg \left[\left(\frac{0,95 \cdot (1 + 0,107)}{2} \right) + \sqrt{\frac{0,95^2 \cdot (1 + 0,107)^2}{4} + 0,107} \right] = 0,86^\circ.$$

Данные для определения точки внешней характеристики в режиме КЗ:

$$F_{ad} = 0,5 \cdot F_c = 0,5 \cdot 8448 = 4224 \text{ A}, \quad (125)$$

$$\psi = \arctg \left(\frac{x_q}{r_a} \right) = \arctg \left(\frac{0,749}{0,35} \right) = 1,52^\circ. \quad (126)$$

Токи внешней характеристики:

$$I_2 = \frac{560}{31 \cdot \sin(0,80)} = 24,910 \text{ A},$$

$$I_1 = \frac{820}{31 \cdot \sin(0,83)} = 35,678 \text{ A},$$

$$I_3 = \frac{1,04 \cdot 10^3}{31 \cdot \sin(0,86)} = 44,390 \text{ A},$$

$$I_3 = \frac{4,224 \cdot 10^3}{31 \cdot \sin(1,52)} = 136,019 \text{ A}.$$

Фазные напряжения для точек внешней характеристики:

$$U = \frac{E - I(x_\sigma \cdot \sin(\psi) + r_a \cos(\psi))}{\cos(\psi - \varphi)}, \quad (127)$$

$$U_1 = \frac{263,93 - 24,91 \cdot (0,53 \cdot \sin(0,80) + 0,35 \cos(0,80))}{\cos(0,80 - 0,76)} = 254,048 \text{ В},$$

$$U_2 = \frac{251,65 - 35,67 \cdot (0,53 \cdot \sin(0,83) + 0,35 \cos(0,83))}{\cos(0,83 - 0,76)} = 254,048 \text{ В},$$

$$U_3 = \frac{239,37 - 44,39 \cdot (0,53 \cdot \sin(0,86) + 0,35 \cos(0,86))}{\cos(0,86 - 0,76)} = 221,545 \text{ В}.$$

По полученным данным строим внешнюю характеристику (рисунок 12).

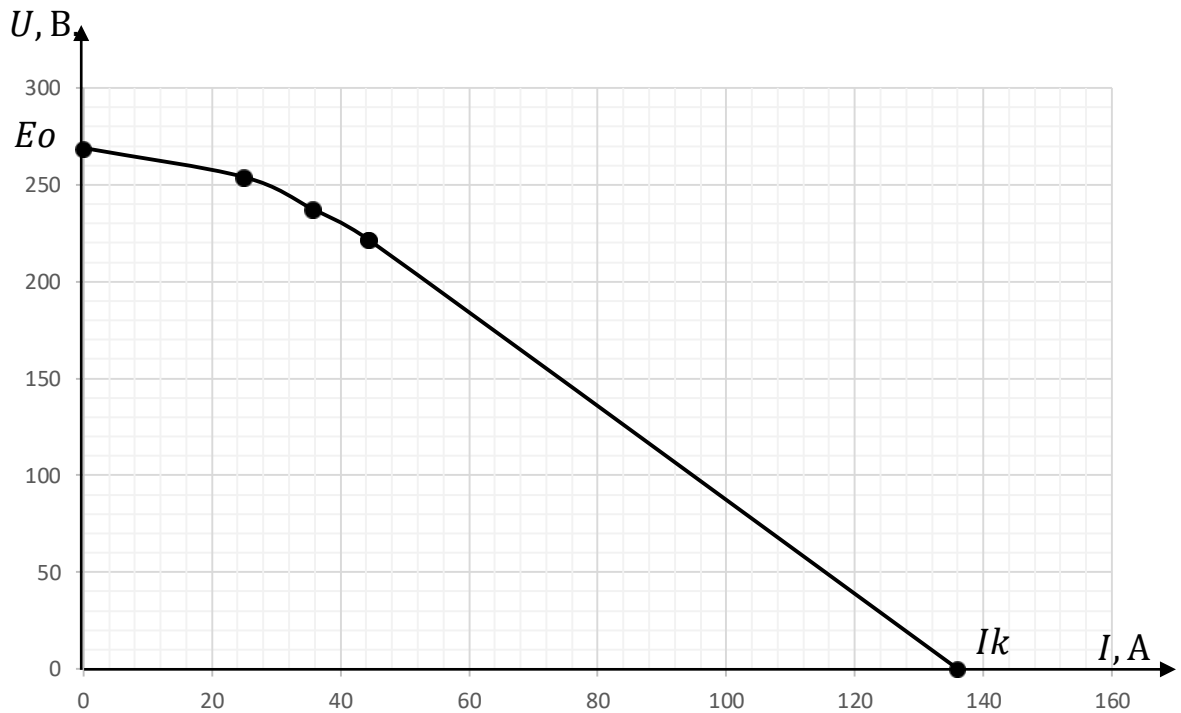


Рисунок 12 – ВАХ СДПМ.

2.8. Определение массы, потерь и КПД двигателя.

Масса меди обмотки якоря:

$$M_{oa} = m \cdot W \cdot l_{cp} \cdot c \cdot S_{пр} \cdot \gamma_m, \quad (128)$$

где $\gamma_m = 8,3 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ – плотность меди.

$$M_{oa} = 3 \cdot 72 \cdot 0,32 \cdot 3 \cdot 2,06 \cdot 10^{-6} \cdot 8,3 \cdot 10^3 = 3,59 \text{ кг.}$$

Масса зубцов якоря:

$$M_z = \left[\frac{\pi}{4} [(D1 + 2h_{\pi})^2 - D1^2] - z_1 \cdot b_1 \cdot h_{\pi} \right] \cdot l \cdot k_c \cdot \gamma_{ст}, \quad (129)$$

где $\gamma_{ст} = 7,8 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ – плотность стали.

$$M_z = \left[\frac{3,14}{4} [(0,35 + 2 \cdot 0,03)^2 - 0,35^2] - 72 \cdot 0,01 \cdot 0,03 \right] \cdot 0,034 \cdot 0,96 \cdot 7,8 \cdot 10^3 = 3,05 \text{ кг.}$$

Масса спинки якоря:

$$M_a = \pi (D1 + 2h_{\pi} + h_a) h_a \cdot l \cdot k_c \cdot \gamma_{ст}, \quad (130)$$

$$M_a = 3,14(0,35 + 2 \cdot 0,03 + 0,025)0,025 \cdot 0,034 \cdot 0,96 \cdot 7,8 \cdot 10^3 = 8,813 \text{ кг.}$$

Масса активных материалов статора:

$$M_1 = M_a + M_z + M_{oa} = 8,813 + 3,05 + 3,59 = 15,45 \text{ кг.} \quad (131)$$

Масса постоянных магнитов:

$$M_{\text{пм}} = 2p \cdot b_m \cdot h_m \cdot l \cdot \gamma_{\text{пм}}, = 12 \cdot 0,095 \cdot 0,088 \cdot 0,034 \cdot 7,5 \cdot 10^3 = 26,3 \text{ кг,} \quad (132)$$

где $\gamma_{\text{пм}}, = 7,5 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ – плотность магнита.

Масса полюсов:

$$M_{\text{п}} = \frac{\pi}{4} [(D1 + 2\delta)^2 - (D1 - 2\delta - 2b_m)^2 - 2p \cdot h_m \cdot b_m] \cdot l \cdot \gamma_{\text{ст}}, \quad (133)$$

$$M_{\text{п}} = \frac{3,14}{4} [(0,348 + 1,2 \cdot 10^{-4})^2 - (0,348 - 1,2 \cdot 10^{-4} - 2)^2 - 12 \cdot 0,095 \cdot 0,088] \cdot 0,034 \cdot 7,8 \cdot 10^3 = 1,048 \text{ кг.}$$

Масса активных материалов ротора:

$$M_2 = M_{\text{п}} + M_{\text{пм}} = 1,048 + 26,3 = 27,376 \text{ кг.} \quad (134)$$

Масса активных материалов двигателя:

$$M_{\text{ам}} = M_1 + M_2 = 15,45 + 27,376 = 42,835 \text{ кг.} \quad (135)$$

Полная масса двигателя:

$$M_{\sigma} = K_{\text{кон}} \cdot M_{\text{ам}} = 1,5 \cdot 42,835 = 64,25 \text{ кг.} \quad (136)$$

Потери и КПД двигателя определяется для номинального режима его работы.

Потери в меди обмотки якоря:

$$P_m = m \cdot I^2 \cdot r_a = 3 \cdot 92^2 \cdot 0,035 = 895 \text{ Вт.} \quad (137)$$

Потери в стали ярма якоря:

$$P_a = p_o \cdot k_{ra} \cdot B_a^2 \cdot \left(\frac{f}{50}\right)^{0,2} \cdot M_a \quad (138)$$

$$P_a = 10,5 \cdot 1,5 \cdot 1,3^2 \cdot \left(\frac{400}{50}\right)^{0,2} \cdot 8,81 = 355 \text{ Вт.}$$

где $p_o = 10,5 \frac{\text{Вт}}{\text{кг}}$. – удельные потери в стали при 400 Гц;

$k_{ra} = 1,5$ – технологический коэффициент для спинки якоря, учитывающий увеличение потерь.

Потери в стали зубцов якоря:

$$P_z = p_0 \cdot k_{rz} \cdot B_{z1}^2 \cdot \left(\frac{f}{50}\right)^{0.2} \cdot M_z \quad (139)$$

где $k_{ra} = 2$ – технологический коэффициент для зубца якоря, учитывающий увеличение потерь.

$$P_z = 10,5 \cdot 2 \cdot 1,7^2 \cdot \left(\frac{400}{50}\right)^{0.2} \cdot 3,04 = 280 \text{ Вт.}$$

Потери в стали:

$$P_{ст} = P_a + P_z = 355 + 280 = 636 \text{ Вт.} \quad (140)$$

Механические потери:

$$P_{мех} = 0,02 \cdot P \cdot \cos \varphi = 0,02 \cdot 39388 \cdot 0,72 = 571 \text{ Вт.} \quad (141)$$

Добавочные потери, обусловленные высшими гармониками магнитного поля, вихревыми токами от полей рассеяния и другими причинами, определяем по соотношению:

$$P_d = 0,01 \cdot P \cdot \cos \varphi = 0,01 \cdot 39388 \cdot 0,72 = 285 \text{ Вт.} \quad (142)$$

Суммарные потери:

$$\sum P = P_m + P_a + P_z + P_{мех} + P_d \quad (143)$$

$$\sum P = 895 + 355 + 280 + 571 + 285 = 3023 \text{ Вт.}$$

Коэффициент полезного действия двигателя:

$$\eta = \frac{P \cdot \cos \varphi}{P \cdot \cos \varphi + \sum P} \cdot 100\% = \frac{39388 \cdot 0,72}{39388 \cdot 0,72 + 3023} \cdot 100\% = 90\% \quad (144)$$

2.9. Тепловой и вентиляционный расчёт

Для того, чтобы дать предварительную оценку для теплового режима СДПМ проведём тепловой расчет, основанный на упрощённом представлении о характере тепловых связей между элементами электрической машины.

Тепловой расчёте проведём только для статора. Предполагается, что обмотка может быть нагрета до предельно допустимой для принятого класса изоляции температуры.

Электрические потери в обмотке статора в пазовой части:

$$P'_{\text{эп}} = k_p \cdot P_m \cdot \frac{2 \cdot l}{l_{\text{ср}}} = 1,15 \cdot 895 \cdot \frac{2 \cdot 0.034}{0.32} = 220 \text{ Вт.} \quad (145)$$

где $k_p = 1,15$ – коэффициент увеличения потерь.

Электрические потери в обмотке статора в лобовой части:

$$P'_{\text{эл}} = k_p \cdot P_m \cdot \frac{2 \cdot l_{\text{л}}}{l_{\text{ср}}} = 1,15 \cdot 895 \cdot \frac{2 \cdot 0.127}{0.32} = 809 \text{ Вт.} \quad (146)$$

Превышение температуры внутренней поверхности сердечника статора над температурой воздуха внутри машины:

$$\Delta\theta_{\text{пов}} = K \cdot \frac{P'_{\text{эл}} + P_{\text{ст}}}{\pi \cdot D \cdot l \cdot a_1} = 0,16 \cdot \frac{809 + 636}{3,14 \cdot 0,348 \cdot 0,034 \cdot 60} = 60 \text{ °C} \quad (147)$$

где $K = 0,16$ – коэффициент, учитывающий, что часть потерь в сердечнике статора и в пазовой части обмотки передаётся через станину в окружающую среду;

$a_1 = 60 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{°C}}$ – коэффициент теплоотдачи с поверхности сердечника статора.

Расчётный периметр поперечного сечения паза статора:

$$\Pi_{\text{п}} = 2 \cdot h_{\text{п}} + b_1 + b_2 = 2 \cdot 0,026 + 0,01 + 0.008 = 0,071 \text{ м.} \quad (148)$$

Перепад температуры в изоляции пазовой части обмотки статора:

$$\Delta\theta_{\text{из.п}} = \frac{P'_{\text{эп}}}{z_1 \cdot \Pi_{\text{п}} \cdot l} \cdot \left(\frac{b_u}{\lambda_{\text{эКВ}}} + \frac{b_1 + b_2}{16 \cdot \lambda_{\text{эКВ}}} \right) \quad (149)$$

где $\lambda_{\text{экв}} = 0,16 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С}}$ - средняя эквивалентная теплопроводность изоляции;
 $\lambda'_{\text{экв}} = 1,3 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С}}$ - среднее значение коэффициента теплопроводности внутренней изоляции катушек всыпной обмотки из эмалированных проводником с учётом неплотности прилегания проводников друг к другу.

$$\Delta\theta_{\text{из.п}} = \frac{220}{72 \cdot 0,071 \cdot 0,034} \cdot \left(\frac{0,1 \cdot 10^{-3}}{0,16} + \frac{0,01 + 0,008}{16 \cdot 1,3} \right) = 1,85 ^\circ\text{С}.$$

Перепад температуры по толщине изоляции лобовых частей:

$$\Delta\theta_{\text{из.л}} = \frac{P'_{\text{эл}}}{2 \cdot z_1 \cdot \Pi_{\text{л}} \cdot l_{\text{л}}} \cdot \left(\frac{b_{\text{из.л}}}{\lambda_{\text{экв}}} + \frac{h_{\text{п}}}{12 \cdot \lambda'_{\text{экв}}} \right) \quad (150)$$

$$\Delta\theta_{\text{из.л}} = \frac{809}{2 \cdot 72 \cdot 0,071 \cdot 0,127} \cdot \left(\frac{0,006 \cdot 10^{-3}}{0,16} + \frac{0,026}{12 \cdot 1,3} \right) = 1,28 ^\circ\text{С}.$$

Превышение температуры наружной поверхности изоляции лобовых частей обмотки над температурой воздуха внутри машины:

$$\Delta\theta_{\text{пов.л}} = \frac{K \cdot P'_{\text{эл}}}{2\pi \cdot D \cdot l_{\text{л}} \cdot a_1} = \frac{0,16 \cdot 809}{12 \cdot 0,348 \cdot 0,127 \cdot 60} = 4,049 ^\circ\text{С}. \quad (151)$$

Среднее превышение температуры обмотки статора над температурой воздуха внутри машины:

$$\Delta\theta'_1 = \frac{(\Delta\theta_{\text{пов}} + \Delta\theta_{\text{из.п}})2l}{l_{\text{ср}}} + \frac{(\Delta\theta_{\text{из.л}} + \Delta\theta_{\text{пов.л}})2l_{\text{л}}}{l_{\text{ср}}} \quad (152)$$

$$\Delta\theta'_1 = \frac{(60 + 1,85)2 \cdot 0,034}{0,324} + \frac{(1,28 + 4,049)2 \cdot 0,127}{0,324} = 29,96 ^\circ\text{С}.$$

Эквивалентная поверхность охлаждения корпуса:

$$S_{\text{кор}} = (\pi \cdot D_a + 8 \cdot \Pi_{\text{р}}) \cdot (l + 2l_{\text{л}}) \quad (153)$$

где $\Pi_{\text{р}} = 0,32 \text{ м}$ – условный периметр поперечного сечения рёбер станины.

$$S_{\text{кор}} = (3,14 \cdot 0,504 + 8 \cdot 0,32) \cdot (0,034 + 2 \cdot 0,127) = 1,15 \text{ м}^2$$

Сумма потерь, отводимых в воздух внутри двигателя:

$$\Sigma P'_B = (\Sigma P + (kp - 1)P_M) - (1 - K) \cdot (P'_{\text{эп}} + P_{\text{ст}}) - 0,9P_{\text{мех}} \quad (154)$$

$$\Sigma P'_B = 3023 + (1,15 - 1) \cdot 895 - (1 - 0,16) \cdot (220 + 636) - 0,9 \cdot 571 = 1220 \text{ Вт.}$$

Превышение температуры воздуха внутри машины над температурой окружающей среды:

$$\Delta\theta_B = \frac{\Sigma P'_B}{S_{\text{кор}} \cdot a_B} = \frac{1220}{1,2 \cdot 9} = 117 \text{ }^\circ\text{C.} \quad (155)$$

где $a_B = 9$ – коэффициент подогрева воздуха.

Среднее превышение температуры обмотки статора над температурой окружающей среды:

$$\Delta\theta = \Delta\theta'_1 + \Delta\theta_B = 29,96 + 117 = 134 \text{ }^\circ\text{C.} \quad (156)$$

Полученное значение превышения температуры ниже допустимого превышения температуры для принятого класса изоляции F (155°C).

Коэффициент, учитывающий изменение условий охлаждения по длине поверхности корпуса, обдуваемого наружным вентилятором:

$$k_T = m \cdot \sqrt{\frac{n1}{100} \cdot D_{a1}} = 1,8 \cdot \sqrt{\frac{4000}{100} \cdot 0,452} = 7,63 \quad (157)$$

где $m = 1,8$ – коэффициент для двигателя с $2p = 12$.

Требуемый для охлаждения расход воздуха:

$$Q_B = \frac{k_T \cdot \Sigma P'_B}{1100 \cdot \Delta\theta_B} = \frac{7,63 \cdot 1220}{1100 \cdot 117} = 0,024 \frac{\text{м}^3}{\text{с}}. \quad (158)$$

Расход воздуха, обеспечиваемый наружным вентилятором:

$$Q'_B = 0,16 \cdot D_{a1}^3 \cdot \frac{n1}{100} = 0,16 \cdot 0,452^3 \cdot \frac{4000}{100} = 2,26 \frac{\text{м}^3}{\text{с}}. \quad (159)$$

$$Q'_B > Q_B$$

Необходимое условие для охлаждения машин выполнено.

Нагрев частей двигателя находится в допустимых пределах. Вентилятор обеспечивает необходимый расход воздуха.

2.10. Механический расчет двигателя

Вал электрической машины необходим для передачи вращающегося момента. Двигатель имеет горизонтальное расположение вала, поэтому он нагружен всей массой вращающихся частей и изгибающим моментом передачи. Также на вал действуют и силы одностороннего магнитного притяжения, обусловленные неравномерностью воздушного зазора.

При разработке вала необходимо учитывать ряд требований: несущий сердечник ротора; прочность и способность выдерживать все действующие на него нагрузки без каких-либо остаточных деформаций; вал должен также иметь жёсткость, достаточную для того, чтобы при работе ротор не задевал статор; критическая частота вращения вала должна быть значительно больше рабочих частот вращения машины.

Эскиз вала изображен на рисунке 13.

Масса вала:

$$M_{\text{вал}} = 0,25 \cdot \pi \cdot p_{\text{вал}} \cdot (D_{\text{вал}}^2 \cdot l + D_3^2 \cdot l_3 + D_2^2 \cdot l_2) \quad (160)$$

где $p_{\text{вал}} = 8300 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ - плотность металла.

$$M_{\text{вал}} = 0,25 \cdot 3,14 \cdot 8300 \cdot (120^2 \cdot 35 + 114^2 \cdot 20 + 100^2 \cdot 26) = 6.64 \text{ кг.}$$

Масса втулки:

$$M_{\text{вт}} = 0,25 \cdot \pi \cdot p_{\text{вт}} \cdot (D_{\text{вт}}^2 \cdot l - D_{\text{вал}}^2 \cdot l) \quad (161)$$

$$M_{\text{вт}} = 0,25 \cdot 3,14 \cdot 2700 \cdot 0.035 \cdot (155^2 - 120^2) = 0.708 \text{ кг.}$$

Масса магнитомягких полюсов: $M_{\Pi} = 1,048 \text{ кг}$

Масса постоянных магнитов: $M_{\Pi\text{М}} = 26,3 \text{ кг}$

Сила тяжести ротора с валом:

$$G_p = 9,81 \cdot (M_{\text{вал}} + M_{\text{вТ}} + M_{\Pi} + M_{\Pi\text{М}}) \quad (162)$$

$$G_p = 9,81 \cdot (6,64 + 0,708 + 1,048 + 26,3) = 320 \text{ Н.}$$

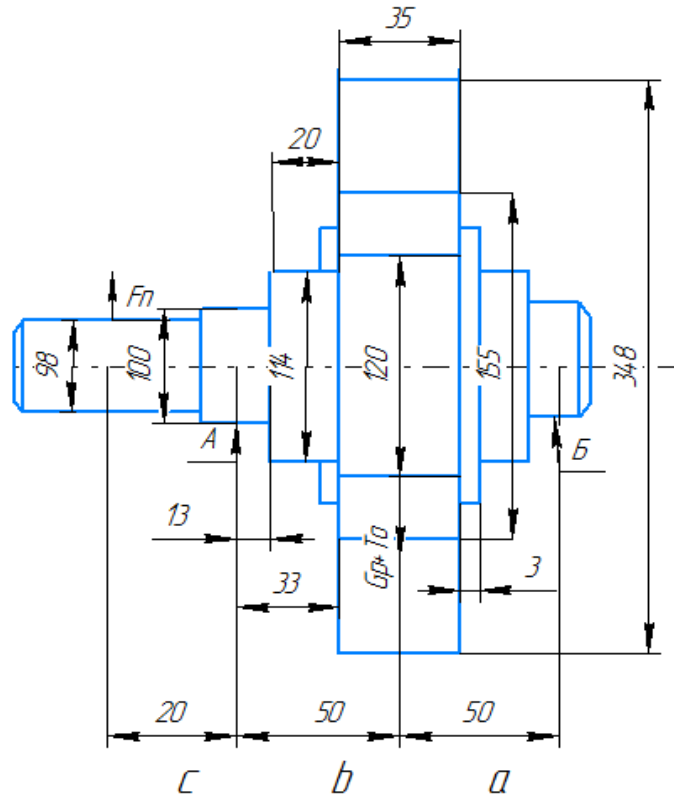


Рисунок 13 – Эскиз вала с размерами и обозначением опор.

Номинальный вращающийся момент:

$$M_{\text{н}} = 9,55 \cdot \frac{P_2}{n} = 9,55 \cdot \frac{40000}{4000} = 94 \text{ Н} \cdot \text{м.} \quad (163)$$

При работе машины возникает поперечная сила, вызываемая передачей через упругую муфту.

Поперечная сила:

$$F_{\Pi} = k_{\Pi} \cdot \frac{M_{\text{н}} \cdot 2}{D_{\Pi}} = 0,3 \cdot \frac{95,5 \cdot 2}{0,11} = 513 \text{ Н.} \quad (164)$$

где $k_{\Pi} = 0,3$ – коэффициент передачи для соединения на полумуфте;

$D_{\Pi} = 0.110$ м - диаметр по центрам пальцев (ГОСТ 21424-93).

Разбиваем вал на три участка: $a = 0,05$ м, $b = 0,05$ м, $c = 0,02$ м.

Прогиб вала посередине под действием силы тяжести:

$$f_q = \frac{G_p}{3 \cdot E \cdot l^2} \cdot (S_A \cdot a^2 + S_B \cdot b^2), \quad (165)$$

где $E = 2,06 \cdot 10^{11}$ Па –модуль упругости стали.

$$S_A = \sum \frac{x_i^3 - x_{i-1}^3}{J_i}; \quad S_B = S_c = \sum \frac{y_i^3 - y_{i-1}^3}{J_i}; \quad J_i = \frac{\pi \cdot d_i^4}{64} \quad (166)$$

Таблица 2 –Участок «а»

$d_i, \text{мм}$	$J_i, \text{мм}^4$	$x_i, \text{мм}$	$x_i^3, \text{мм}$	$\frac{x_i^3 - x_{i-1}^3}{J_i} \text{ мм}^{-1},$
100	4908	13	2197	0,0447
114	7272	33	35937	0,46
120	848	50	125000	1,04
S_A				1,558

Таблица 3 –Участок «б»

$d_i, \text{мм}$	$J_i, \text{мм}^4$	$y_i, \text{мм}$	$y_i^3, \text{мм}$	$\frac{y_i^3 - y_{i-1}^3}{J_i}; \text{ мм}^{-1}$
100	4908	13	2197	0,0447
114	7272	33	35937	0,46
120	848	50	125000	1,04
S_B				1,558

Таблица 4 –Участок «с»

$d_i, \text{мм}$	$J_i, \text{мм}^4$	$y_i, \text{мм}$	$y_i^3, \text{мм}$	$\frac{y_i^3 - y_{i-1}^3}{J_i}; \text{ мм}^{-1}$
100	4908	13	2197	0,0447
98	4620	20	2198	0,1256
S_c				0,170

$$f_q = \frac{320}{3 \cdot 2,06 \cdot 10^{11} \cdot 0,035^2} \cdot (1,558 \cdot 0,05^2 + 1,558 \cdot 0,05^2) = 3,34 \cdot 10^{-9} \text{ м.}$$

Прогиб вала посередине магнитопровода ротора от поперечной силы муфты:

$$f_n = \frac{F_n \cdot c}{3 \cdot E \cdot l^2} \cdot ((1,5 \cdot S_c - S_B) \cdot a + S_A \cdot b), \quad (167)$$

$$f_n = \frac{513 \cdot 0,02}{3 \cdot 2,06 \cdot 10^{11} \cdot 0,035^2} \cdot ((1,5 \cdot 0,17 - 1,558) \cdot 0,05 + 1,558 \cdot 0,05) = 1,75 \cdot 10^{-10} \text{ м.}$$

Первоначальное смещение ротора:

$$e_0 = 0,1 \cdot \delta + f_q + f_n, \quad (168)$$

$$e_0 = 0,1 \cdot 0,6 \cdot 10^{-3} \cdot 3,34 \cdot 10^{-9} + 1,75 \cdot 10^{-10} = 6 \cdot 10^{-5} \text{ м}$$

Начальная сила одностороннего магнита притяжения:

$$T_0 = 2,94 \cdot D_p \cdot l \cdot \frac{e_0}{\delta} \cdot 10^5 = 2,94 \cdot 0,348 \cdot 0,035 \cdot \frac{6}{0,6 \cdot 10^{-3}} = 355 \text{ Н.} \quad (169)$$

Прогиб вала от начальной силы одностороннего магнита притяжения:

$$f_m = \frac{f_q \cdot T_0}{G_p} = \frac{3,34 \cdot 10^{-9} \cdot 355}{320} = 3,71 \cdot 10^{-9} \text{ м.} \quad (170)$$

Установившейся прогиб вала от одностороннего момента притяжения:

$$f_M = \frac{f_m}{1 - \frac{f_m}{e_0}} = \frac{3,71 \cdot 10^{-9}}{1 - \frac{3,71 \cdot 10^{-9}}{6 \cdot 10^{-5}}} = 3,71 \cdot 10^{-9} \text{ м.} \quad (171)$$

Суммарный прогиб посередине магнитопровода ротора:

$$f = f_M + f_q + f_n = 3,71 \cdot 10^{-9} + 3,34 \cdot 10^{-9} + 1,75 \cdot 10^{-10} = 7,23 \cdot 10^{-9} \text{ м.} \quad (172)$$

Суммарный прогиб в % от воздушного зазора:

$$f\% = \frac{f}{\delta} \cdot 100\% = \frac{7,23 \cdot 10^{-9}}{0,6 \cdot 10^{-3}} \cdot 100\% = 1,2 \cdot 10^{-3} < 12\% \quad (173)$$

Диаметр вала соответствует условию прогиба.

Критическая частота вращения:

$$n_k = 30 \cdot \sqrt{\frac{1 - \frac{f_m}{e_0}}{f_q}} = 30 \cdot \sqrt{\frac{1 - \frac{3,71 \cdot 10^{-9}}{6 \cdot 10^{-5}}}{3,34 \cdot 10^{-9}}} = 5,18 \cdot 10^5 \frac{\text{об}}{\text{мин}}. \quad (174)$$

Для подбора материала для вала необходимо рассчитать вал на прочность. Исходя из теории максимально касательных напряжений, воспринимаемых валом, и намеченных предварительно размеров, подбирают материал, который удовлетворяет предъявляемым требованиям. Материал вала электрической машины испытывает знакопеременные напряжения от изгиба в следствии вращения при постоянно направленных нагрузках.

Изгибающий момент в расчётном сечении вала на участке «а»:

$$M_{ua} = k \cdot F_n \cdot Z = 2 \cdot 513 \cdot 0,045 = 46,16 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (175)$$

где $Z = 0,045 \text{ м}$ – отрезок от середины втулки муфты. (ГОСТ 21424-93);

$k = 2$ – коэффициент нагрузки.

Момент сопротивления при изгибе:

$$W_a = 0,1 \cdot d^3 = 0,1 \cdot 0,098^3 = 9,41 \cdot 10^{-5} \text{ м}. \quad (176)$$

Напряжение изгиба:

$$\sigma_{\text{пр}} = \frac{1}{W_a} \cdot \sqrt{M_{ua}^2 + (k \cdot a \cdot M_n)^2}, \quad (177)$$

где $a = 0,8$ – отношение допустимого напряжения при изгибе к удвоенному до пускаемого напряжению при кручение.

$$\sigma_{\text{пр}} = \frac{1}{9,41 \cdot 10^{-5}} \cdot \sqrt{46,16^2 + (2 \cdot 0,8 \cdot 94)^2} = 1,67 \cdot 10^6 \text{ Па}.$$

Условие прочности:

$$\sigma_{\text{пр}} < 0,7 \sigma_{\text{пр.тек}} \quad (178)$$

где $\sigma_{\text{пр.тек}} = 3600 \cdot 10^5 \text{ Па}$ – предел текучести для стали 45.

$$1,67 \cdot 10^6 < 0,7 \cdot 3600 \cdot 10^5 \text{ Па}.$$

Условие выполняется.

Для подбора подшипников, насаживаемых на шейки вала электрической машины необходимо определить реакции опор.

Исходные данные:

$$G_p = 320 \text{ Н}; T_0 = 355 \text{ Н}; F_{\Pi} = 513 \text{ Н}; a = b = 0,05 \text{ м}; L = 0,1 \text{ м}; c = 0,02 \text{ м}.$$

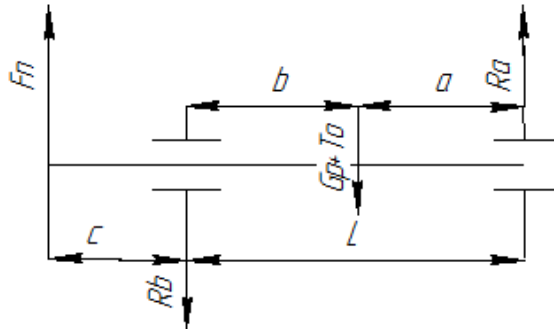


Рисунок 14 - К определению радиальных реакций подшипников R_a и R_b .

Радиальные нагрузки для опоры А:

$$R_a = F_{\Pi} \cdot \frac{c + L}{L} + (G_p + T_0) \cdot \frac{b}{L} \quad (179)$$

$$R_a = 513 \cdot \frac{0,02 + 0,1}{0,1} + (320 + 355) \cdot \frac{0,05}{0,1} = 953 \text{ Н}.$$

Приведенная динамическая нагрузка:

$$Q_a = k_n \cdot R_a = 1,5 \cdot 953 = 1429 \text{ Н}. \quad (180)$$

Предполагаем, что срок службы $L_d = 18000$ ч.

Динамическая грузоподъемность шарикоподшипника:

$$C_a = \frac{Q_a}{25,9} (L_d \cdot n)^{0,333} = \frac{1429}{25,9} (18000 \cdot 4000)^{0,333} = 22830 \text{ Н}. \quad (181)$$

Радиальная нагрузка для опоры Б:

$$R_b = F_{\Pi} \cdot \frac{c}{L} + (G_p + T_0) \cdot \frac{a}{L} \quad (182)$$

$$R_b = 513 \cdot \frac{0,02}{0,1} + (320 + 355) \cdot \frac{0,05}{0,1} = 440 \text{ Н}$$

Приведенная динамическая нагрузка:

$$Q_b = k_n \cdot R_b = 1,5 \cdot 440 = 660 \text{ Н}. \quad (183)$$

Динамическая грузоподъемность шарикоподшипника:

$$C_b = \frac{Q_b}{25,9} (L_D \cdot n)^{0,333} = \frac{660}{25,9} (18000 \cdot 4000)^{0,333} = 10546 \text{ Н.} \quad (184)$$

При диаметре шейки вала 100 мм выбираем шарикоподшипник легкой серии 209, $C = 25200 \text{ Н}$.

Заключение по главе

В данной главе были проведены расчеты параметров и размеров электрического привода шасси пассажирского самолета. Из полученных результатов видно, что разрабатываемый тяговый синхронный двигатель с возбуждением от постоянных магнитов не превышает габариты опорного шасси и может быть интегрированным без дополнительных его изменений. Коэффициент полезного действия двигателя составляет 90%. По предварительным расчетам масса двигателя 65 кг.

3. Геометрический расчет редуктора.

Угловая скорость, которую должен развивать электродвигатель для вращения колеса шасси: $w_3 = 2,651 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$.

Угловая скорость, разрабатываемого синхронного двигателя переменного тока, находим из связи угловой скорости с частотой вращения:

$$w_1 = \frac{n_1 \cdot \pi}{30} = \frac{4000 \cdot 3,14}{30} = 418,879 \frac{\text{рад}}{\text{с}}. \quad (185)$$

Развиваемая угловая скорость СДПМ в несколько раз превышает необходимую угловую скорость вращения колеса. Поэтому надо разработать механизм, который уменьшит угловую скорость и крутящий момент.

Для преобразования высокой угловой скорости вращения входного вала (двигателя) в более низкую на выходном валу (колеса) необходимо использовать редуктор.

В данной работе будет рассматриваться планетарный редуктор с трёхрядным расположением зубчатых колес в передаче.



Рисунок 15 – Планетарный редуктор.

Полное передаточное отношение, складывается из произведения передаточных отношений всех трёх звеньев, вошедших в состав редуктора:

$$i = i_1 + i_2 + i_3 \quad (186)$$

Находим полное передаточное отношение из отношения угловых скоростей:

$$i' = \frac{w_1}{w_3} = \frac{418,879}{2,650533} = 158,035 \quad (187)$$

Принимаем значение полного передаточного числа: $i = 160$.

Тогда передаточные числа первого, второго и третьего ряда:

$$i_1 = 4, i_2 = 5, i_3 = 8.$$

Расчет первого ряда редуктора:

- Числа зубьев должны быть целыми:

Пусть: $z_1 = 90$ – количество зубьев на водиле;

Из формулы Виллиса находим число зубьев на солнечной шестерне:

$$i_1 = 1 + \frac{z_3}{z_1}, \quad (188)$$

$$z_3 = \frac{z_1}{(i_1 - 1)} = \frac{90}{(4 - 1)} = 30 \quad (189)$$

Из условия соосности находим количество зубьев на сателлитах:

$$z_2 = \frac{z_3 - z_1}{2} = \frac{90 - 30}{2} = 30. \quad (190)$$

Число сателлитов принимаем $k = 3$.

- Проводим проверку условие соседства:

$$\sin\left(\frac{\pi}{k}\right) \geq \frac{z_2 + 2}{z_3 + z_2}, \quad (191)$$

$$0,866 \geq 0,533.$$

- Проверяем условия сборки:

$$\frac{z_3 \cdot i_1}{k} = \frac{30 \cdot 4}{3} = 40 - \text{целое число.} \quad (192)$$

Таким образом, получаем $z_1 = 90$; $z_2 = 30$; $z_3 = 30$.

Модуль зацепления (зубьев) выбираем в соответствии со стандартным рядом модулей (СТ СЭВ 310-76): $m = 0.003$ м.

Межосевое расстояние определяется по формуле:

$$a_w = \frac{m \cdot (1 + i_1) \cdot z_3}{2} = \frac{0,003 \cdot (1 + 4) \cdot 30}{2} = 0,225 \text{ мм} \quad (193)$$

Ширина шестерни внутреннего зацепления:

$$b_1 = \psi \cdot a_w = 0,4 \cdot 0,225 = 0,09 \text{ м.} \quad (194)$$

Ширина сателлитов:

$$b_2 = 1,04 \cdot b_3 = 1,04 \cdot 0,18 = 0,0936 \text{ м.} \quad (195)$$

Ширина солнечной шестерни:

$$b_3 = 1,04 \cdot b_2 = 1,04 \cdot 0,0936 = 0,0973 \text{ м.} \quad (196)$$

Рассчитываем величины диаметров:

$$d_1 = m \cdot z_1 = 0,003 \cdot 90 = 0,27 \text{ м.} \quad (197)$$

$$d_2 = m \cdot z_2 = 0,003 \cdot 30 = 0,09 \text{ м.} \quad (198)$$

$$d_3 = m \cdot z_3 = 0,003 \cdot 30 = 0,09 \text{ м.} \quad (199)$$

Аналогично рассчитываем 2 и 3 ступень, результаты расчетов внесены в таблицу 5.

Таблица 5 - Результаты расчета планетарного редуктора.

	1 ряд	2 ряд	3 ряд
i	4	5	8
$z_1/z_2/z_3$	90/30/30	90/34/21	90/31/14
$m, \text{ м}$	0,003	0,003	0,003
$a, \text{ м}$	0,225	0,189	0,189
$b_1, \text{ м}$	0,09	0,076	0,075
$b_2, \text{ м}$	0,094	0,078	0,078
$b_3, \text{ м}$	0,097	0,082	0,081
$d_1, \text{ м}$	0,27	0,27	0,27
$d_2, \text{ м}$	0,09	0,102	0,093
$d_3, \text{ м}$	0,09	0,063	0,042

Предполагаемую длину редуктора рассчитываем из максимальных значений ширин:

$$b_p = b_{13} + b_{23} + b_{33} = 0,097 + 0,082 + 0,081 = 0,25 \text{ м.} \quad (200)$$

Вывод по главе

Рассматриваемый редуктор по своим габаритам не превышает допустимые значения. Следовательно, его можно использовать для преобразования высокой угловой скорости вращения входного вала (двигателя) в более низкую на выходном валу (колеса).

4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

4.1. Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

4.1.1. Потенциальные потребители результатов исследования

Проект тягового электропривода для шасси пассажирского самолета SSJ -100 является новой технологией приведения самолета в движение на территории аэропорта без использования маршевых двигателей.

Самолет SSJ -100 является новым российским пассажирским самолетом, который эксплуатируется авиакомпаниями таких стран, как Казахстан, Таиланд, Мексика, и ряд других стран.




Разрабатываемая электромеханическая система является одной из составляющей концепта «полностью электрический самолет». На данный период эта идея является одной из главных тенденций в авиастроение.

Объединенная авиастроительная корпорация подсчитала выгоды от перехода на электроприводное шасси: за год можно сэкономить до 200 тысяч литров горючего (на один самолет). Следовательно, данный проект может стать интересным не только для компании «Гражданские самолёты Сухого», разрабатывающей самолет SSJ-100, но и другим компаниям.

Для анализа потребителей результатов исследования проведем сегментирование рынка. (рисунок 1)

		Тип Электропривода		
		Многодвигательный СДПМ с зубчатой передачей	СДПМ со смешанным редуктором	СДПМ с планетарным редуктором
Класс самолетов	Магистральные			
	Местных воздушных линий			

Рисунок 16 – Карта сегментирования рынка услуг по разработке проекта.

 - ООО «НИК «ОСА»  - Холдинг «Технодинамика»  - НЦ ОАК

Таким образом, в результате анализа сегментирования можно сделать вывод, что реализация проекта электромеханического привода, состоящего из СДПМ и планетарного редуктора является сегментом рынка, не занятым конкурентами.

4.1.2. Анализ конкурентных технических решений

На данный период времени проект электропривода является лишь идеей и разработкой, на создании которого работают ряд компаний.

К примеру, объединённая авиастроительная корпорация (ОАК) объявила, что разработала электропривод шасси Superjet. Изначально в их планы входила установка на передние опоры шасси, но на него приходится лишь 7 – 8 % массы самолета. Вследствие чего привод установили в основные опоры шасси. Как утверждает директор научного центра ОАК, благодаря их разработки самолёт спокойно разворачивается на месте и ездит задним ходом. [9]

Холдинг «Технодинамика» представила систему наземного передвижения воздушных судов с электроприводом колеса. По информации в источниках, новая система позволяет сократить время передвижения в аэропорту, экономить топливо при рулении и соблюсти самые жёсткие экологические стандарты. Первый их образец был представлен в 2015 году на МАКСЕ. Но так и не интегрировалось напрямую в шасси. [10]

Проект многодвигательного электропривода, запатентованный ООО "Научно-инженерная компания "Объектные системы автоматики" по идее должен устанавливаться на тяжелых самолетах, на каждом колесе шасси. Из чего полезная масса самолета будет уменьшаться. [11]

Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения целесообразно проводить с помощью оценочной карты, приведенной в таблице 1, где Бф – Электропривод с СДПМ и с планетарным редуктором, Бк1 - Электропривод с СДПМ и со смешанным редуктором, Бк2 – Электропривод с Многодвигательный СДПМ и с зубчатой передачей.

Таблица 6 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических разработок

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		Бф	Бк1	Бк2	Кф	Кк1	Кк2
1	2	3	4	5	6	7	8
Технические критерии оценки ресурсоэффективности							
1. Повышение производительности	0,07	5	4	3	0,35	0,28	0,21
2. Удобство в эксплуатации	0,06	4	4	3	0,24	0,24	0,18
3. Энергоэкономичность	0,09	5	5	4	0,45	0,45	0,36
4. Надежность	0,1	5	4	3	0,5	0,4	0,3
5. Безопасность	0,1	4	4	3	0,4	0,4	0,3
6. Функциональная мощность	0,1	5	5	5	0,5	0,5	0,5
7. Простота эксплуатации	0,05	4	4	3	0,2	0,2	0,2
8. Массогабаритные показатели	0,08	5	4	3	0,4	0,32	0,24
Экономические критерии оценки эффективности							
1. Конкурентоспособность продукта	0,07	5	4	3	0,35	0,28	0,21
2. Финансирование научной разработки	0,06	3	5	3	0,18	0,3	0,18
3. Срок выхода на рынок	0,05	4	5	3	0,2	0,25	0,15
4. Цена	0,04	4	4	3	0,16	0,16	0,12
5. Уровень проникновения на рынок	0,07	4	5	3	0,28	0,34	0,21
6. Наличие сертификата разработки	0,06	5	5	5	0,3	0,3	0,3
Итого	1				4,51	4,42	3,46

Из анализа конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения видно, что разрабатываемый электродвигатель с возбуждением от постоянных магнитов и с редуктором планетарного типа имеет преимущество над конкурентными разработками.

4.1.3. Технология QuaD

Для измерения характеристик, описывающих качество новой разработки и её перспективность на рынке проведём оценку конкурентных решений разрабатываемого электропривода. Результаты оценки приведены в таблице 7.

Таблица 7 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических разработок

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы	Максимальный балл	Относительное значение (3/4)	Средневзвешенное значение (5x2)
1	2	3	4	5	6
Показатели оценки качества разработки					
1. Энергоэффективность	0,08	95	100	0,95	0,076
2. Надежность	0,1	85	100	1	0,1
3. Унифицированность	0,06	65	100	0,65	0,039
4. Уровень материалоемкости разработки	0,07	75	100	0,75	0,052
5. Уровень шума	0,08	80	100	0,8	0,064
6. Безопасность	0,1	80	100	0,8	0,08
7. Функциональные возможности	0,09	85	100	0,85	0,076
8. Простота эксплуатации	0,08	75	100	0,75	0,06
9. Ремонтопригодность	0,09	75	100	0,75	0,067
Экономические критерии оценки эффективности					
10. Конкурентоспособность продукта	0,08	90	100	0,9	0,072
11. Уровень проникновения на рынок	0,07	80	100	0,8	0,056
12. Перспективность рынка	0,06	90	100	0,9	0,054
13. Цена	0,07	75	100	0,075	0,053
14. Срок выхода на рынок	0,06	75	100	0,75	0,045
15. Наличие сертификации разработки	0,06	70	100	0,7	0,042
16. Финансовая эффективность	0,06	80	100	0,8	0,048
Итого	1				

Оценка качества и перспективности по технологии QuaD определяется по формуле:

$$P_{cp} = \sum B_i \cdot \bar{B}_i = 6,08 + 1 + 2,34 + 6,84 + 5,12 + 8 + 6,84 + 4,8 + 6,03 + 5,76 + 3,92 + 3,24 + 3,71 + 2,7 + 2,52 + 2,88 = 80,78\%,$$

где B_i – вес показателя;

\bar{B}_i – средневзвешенное значение i -го показателя.

Оценка качества и перспективности позволяет сделать вывод, что такая разработка является перспективной.

4.1.4. SWOT – анализ

SWOT-анализ поможет выявить слабые и сильные стороны проекта, также возможности и угрозы, то есть исследовать данный проект (работу) для внешней и внутренней среды.

Для проведения SWOT-анализа составляется матрица SWOT, в которую записываются слабые и сильные стороны проекта, а также возможности и угрозы.

При составлении матрицы SWOT удобно использовать следующие обозначения:

С – сильные стороны проекта;

Сл – слабые стороны проекта;

В – возможности;

У – угрозы;

Матрица SWOT приведена в таблице 8.

Таблица 8 - SWOT – анализ.

	<p>Сильные стороны научно – исследовательского проекта:</p> <p>С1. Экологичность технологии.</p> <p>С2. Экономичность и энергоэффективность технологии.</p> <p>С3. Востребованность научного исследования.</p> <p>С4. Высокий срок эксплуатации.</p> <p>С5. Надежность данной системы.</p> <p>С6. Квалифицированный персонал.</p>	<p>Слабые стороны научно-исследовательского проекта:</p> <p>Сл1. Отсутствие финансирования.</p> <p>Сл2. Отсутствие квалифицированного персонала у потенциальных потребителей.</p> <p>Сл3. Отсутствие прототипа научной разработки.</p> <p>Сл4. Большой срок выхода на рынок.</p>
<p>Возможности:</p> <p>В1: Появление дополнительного спроса на новый продукт.</p> <p>В2. Снижение стоимости на электроэнергию и материалы.</p> <p>В3. Развитие технологий в данной отрасли</p> <p>В4. Повышение стоимости конкурентных разработок.</p>	<p>В1С1С2С3С4С5</p> <p>В2С1С2С3</p> <p>В3С3С4С5</p> <p>В4С3С6</p>	<p>В1Сл1</p> <p>В3Сл1Сл3</p> <p>В4Сл1Сл3</p>
<p>Угрозы:</p> <p>У1. Развитая конкуренция технологий производства.</p> <p>У2. Введение дополнительных государственных требований к сертификации продукции.</p> <p>У3. Экономическая ситуация в стране, влияющая на спрос.</p> <p>У4. Появление новых конкурентных разработок.</p>	<p>У1С2С3</p> <p>У2С2</p> <p>У3С2С3С6</p> <p>У4С2С3</p>	<p>У1Сл1Сл2</p> <p>У2Сл1Сл4</p> <p>У3Сл1Сл2Сл3Сл4</p> <p>У4Сл1Сл4</p>

На основании матрицы SWOT строятся интерактивные матрицы возможностей и угроз, позволяющие оценить эффективность проекта, а также надежность его реализации.

При построении интерактивных матриц используются следующие обозначения:

С – сильные стороны проекта;

Сл – слабые стороны проекта;

В – возможности;

У – угрозы;

«+» – сильное соответствие;

«-» – слабое соответствие;

Полученная интерактивная матрица проекта представлена в таблице 9 и в таблице 10.

Таблица 9 – Интерактивная матрица проекта

	Сильные стороны проекта						
Возможности проекта		С1	С2	С3	С4	С5	С6
	В1	+	+	+	+	+	-
	В2	+	+	+	-	-	-
	В3	-	-	+	+	+	+
	В4	-	-	+	-	-	+
	Слабые стороны						
Возможности проекта		Сл1	Сл2	Сл3	Сл4		
	В1	+	-	-	-		
	В2	-	-	-	-		
	В3	+	-	+	-		
	В4	+	-	+	-		

Таблица 10 – Интерактивная матрица проекта

	Сильные стороны проекта						
Угрозы проекта		C1	C2	C3	C4	C5	C6
	У1	-	+	+	-	-	-
	У2	-	+	-	-	-	-
	У3	-	+	+	-	-	+
	У4	-	+	+	-	-	-
	Слабые стороны						
Угрозы проекта		Сл1	Сл2	Сл3	Сл4		
	У1	+	+	-	-		
	У2	+	-	-	+		
	У3	+	+	+	+		
	У4	+	-	-	+		

Из анализа полученных результатов видно, что разработка обладает большими количеством сильных сторон, а также большими возможностями. Основной угрозой является экономическая ситуация в стране.

4.1.5 Определение возможных альтернатив проведения научных исследований

Для определения возможных альтернатив проведения научного исследования воспользуемся морфологическим подходом.

Морфологический подход основан на систематическом исследовании всех теоретических возможных вариантов, вытекающих из закономерностей строения (морфологии) объекта исследования.

Путём комбинирования возможных вариантов исполнения разрабатываемого тягового двигателя для электропривода шасси самолета SSJ-100, составим морфологическую матрицу, таблица 11.

Таблица 11 – Морфологическая матрица для тягового двигателя.

	1	2	3
А. Род тока.	Постоянный	Пульсирующий	Переменного
Б. Тип	Асинхронный	Синхронный	ДПТ
В. Режиму работы	Продолжительный	Повторно - кратковременный	Кратковременный
Г. Конструкция ротора	Состоит из постоянных магнитов	Фазный ротор	Короткозамкнутый ротор
Д. Защита от внешних воздействий.	Не защищенные	Брызгозащищенный	Закрытые
Е. Способ охлаждения	С независимой вентиляцией	Самовентиляцией	Естественным охлаждением
Ж. Способ питания электроэнергии	От сети	От аккумулятора	От топливного элемента
З. Где используется	Машина	Самолет	Трамвай

Наиболее экономичный, ресурсоэффективный и экологичным является вариант исполнения тягового двигателя: А1Б2В1Г1Д3Е2Ж2З2 (Исп.1)

Также возможно исполнение: А3Б1В1Г3Д3Е1Ж2З2 (Исп.2)
и А1Б3Д3Е3Ж1З2 (Исп.3)

4.2. Планирование и формирование бюджета научных исследований

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.

4.2.1. Структура работ в рамках научного исследования

В данном подразделе составляется перечень этапов и работ в рамках проведения научного исследования.

Таблица 12 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей








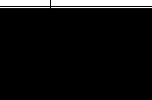


№	Наименование работ	Исполнители (НР, инженер)
1.	Выдача и получение технического задания	НР, инженер
2.	Подбор и изучение материалов по теме	Инженер
3	Календарное планирование работ	НР, инженер
4.	Разработка структурной схемы	Инженер
5.	Проведение теоретических расчетов и обоснований	Инженер
5.	Проектирование модели	Инженер
6.	Проверка полученных результатов	НР, инженер
7.	Оформление пояснительной записки	Инженер
8.	Проверка пояснительной записки и чертежей	НР, инженер
9.	Оценка эффективности полученных результатов	НР.

4.2.2. Разработка графика проведения научного исследования

На основе таблицы 12 строим календарный план-график (таблица 13). 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 ВКР. При этом работы на графике следует выделить различной штриховкой в зависимости от исполнителей, ответственных за ту или иную работу.

Календарный план график представляет из себя диаграмму Гранта – горизонтальный ленточный график, на котором работы по теме представлены протяженными по времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения работ.

Таблица 13 – Календарный план график

№	Наименование работ	Исполнители	Количество дней	Продолжительность выполнения работ						
				Апрель			Май			Июнь
				1	2	3	1	2	3	1
1.	Выдача и получение технического задания	НР, инженер	2							
2.	Подбор и изучение материалов по теме	Инженер	7							
3.	Календарное планирование работ	НР, инженер	2							
4.	Разработка структурной схемы	Инженер	7							
5.	Проведение теоретических расчетов и обоснований	Инженер	20							
6.	Проектирование модели	Инженер	8							
7.	Проверка полученных результатов	НР, инженер	4							
8.	Оформление пояснительной записки	Инженер	8							
9.	Проверка пояснительной записки и чертежей	НР, инженер	3							
-	 оводитель	-  женер								

4.2.3. Бюджет научно-технического исследования

При формировании бюджета НТИ должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов расходов, связанных с его выполнением

4.2.3.1. Материальные затраты

К материальным затратам относятся приобретаемые и покупаемые материалы, необходимые для создания научно – технической продукции.

Для создания данного проекта необходимо:

- Канцелярские товары – 600 руб.
- Распечатка документов – 500 руб.

Итого: $Z_{\text{мат}} = 1100$ руб.

4.2.3.2. Расчет затрат на специальное оборудование для научных работ.

Для выполнения проекта была использована компьютерная техника

Амортизация компьютерной техники вычисляется по формуле:

$$Z_{\text{ам}} = \frac{T_{\text{исп.кт}}}{T_{\text{кал}}} \cdot C_{\text{кт}} \cdot \frac{1}{T_{\text{сл}}} = \frac{61}{365} \cdot 25000 \cdot \frac{1}{5} = 837 \text{ руб.},$$

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

$T_{\text{кал}}$ - календарное время;

$C_{\text{кт}}$ - цена компьютерной техники;

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

4.2.3.3. Заработная плата исполнителей

Зарплата рассчитывается по следующей формуле:

$$ЗП = ЗП_0 \cdot k_1 \cdot k_p,$$

где $ЗП_0$ - месячный оклад исполнителей (НР – 26300 руб., И – 17000 руб.);

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

$k_p = 1,3$ - районный коэффициент.

Таким образом, зарплата инженера в г. Томске рассчитывается следующим образом:

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

Зарплата научного руководителя в месяц:

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

Общие затраты на заработную плату:

$$З_{зп} = ЗП_{инж} + ЗП_{нр} = 24310 + 37609 = 61919 \text{ руб.}$$

Фактическая заработная плата на научного руководителя:

$$ЗП_{финж} = \frac{ЗП_{нр}}{21} \cdot n_{\phi} = \frac{37609}{21} \cdot 6 = 10745 \text{ руб.}$$

где n_{ϕ} - фактическое количество дней, потраченных на разработку проекта.

Фактическая заработная плата для инженера:

$$ЗП_{фнр} = \frac{ЗП_{инж}}{21} \cdot n_{\phi} = \frac{24310}{21} \cdot 63 = 72930 \text{ руб.}$$

Итого затраты на заработную плату:

$$З_{зп} = ЗП_{финж} + ЗП_{фнр} = 10745 + 72930 = 83675 \text{ руб.}$$

4.2.3.4. Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

В данном подразделе отражаются обязательные отчисления по установленным законодательством Российской Федерации, нормам органа государственного социального страхования (ФСС), пенсионного фонда (ПФ) и медицинского страхования (ФФОМС) от затрат на оплату труда работников.

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

$$З_{со} = 0,3 \cdot З_{зп} = 0,3 \cdot 83675 = 25102,5 \text{ руб.}$$

4.2.3.5. Накладные расходы

Накладны расходы учитывают прочие затраты. Прочие затраты представляют собой комплекс статей затрат, не вошедших в другие элементы. Это, как правило, виды расходов, каждый из которых не имеет большого удельного веса в себестоимости продукции (работ, услуг), однако их совокупность может быть достаточно ощутимой частью общей суммы затрат отчетного периода.

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

$$З_{накл} = (З_{мат} + З_{ам} + З_{зп} + З_{со}) \cdot k_{нр}$$

$$З_{накл}(1100 + 837 + 83675 + 25103) \cdot 0,1 = 11071,5 \text{ руб.}$$

4.2.3.5. Формирование бюджета затрат научно – исследовательского проекта.

Итоговый расчет плановых затрат:

$$З_{мат} + З_{ам} + З_{зп} + З_{со} + З_{накл} = 121786,5 \text{ руб.}$$

Бюджет затрат на научно-исследовательский проект приведен в таблице 14.

Таблица 14 – расчет бюджета затрат НТИ

№	Наименование статьи	Сумма, руб.		Примечание
		Инженер	НР	
1.	Материальные затраты НТИ	1100		Пункт 7.2.3.1
2.	Затраты на специальное оборудование для научных работ	837		Пункт 7.2.3.2
3.	Затраты на заработную плату	10745	72930	Пункт 7.2.3.3
4.	Отчисления во внебюджетные фонды	25102,5		Пункт 7.2.3.4
5.	Накладные расходы	11071,5		Пункт 7.2.3.5
Итого:		121786,5		Пункт 7.2.3.5

4.3. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социально и экономической эффективности исследования

Определение эффективности происходит на основе расчета интегрального показателя эффективности научного исследования. В данной работе рассчитаем интегральный показатель ресурсоэффективности.

Интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов исполнения объекта исследования можно определить по формуле:

$$I_{pi} = \sum a_i \cdot b_i,$$

где a_i – весовой коэффициент i -го варианта исполнения разработки;

b_i – балльная оценка i -го варианта исполнения разработки, устанавливается экспертным путём по выбранной шкале оценивания.

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности проводим с помощью таблицы 15

Таблица 15 – Сравнительная оценка характеристик
вариантов исполнения проекта

№	Критерии	Весовой коэффициент	Бальная оценка разработки		
			Исп.1	Исп.2	Исп.3
1.	Безопасность	0,15	4	3	3
2.	Надежность	0,15	4	4	3
3.	Долговечность	0,20	5	4	3
4.	Удобство в эксплуатации	0,05	5	4	3
5.	Технологичность	0,10	5	4	3
6.	Энергоэкономичность	0,10	5	3	3
7.	Массогабаритные показатели	0,20	5	4	3
8.	Конкурентоспособность проекта	0,05	5	4	3
Итого:		1	4,7	3,75	3

Рассчитываем показатель ресурсоэффективности на примере тягового двигателя синхронного исполнения с возбуждением от постоянных магнитов:

$$\text{Исп1: } I_{\text{исп1}} = 2(0,15 \cdot 4) + 2(0,2 \cdot 5) + 2(0,05 \cdot 5) + 2(0,1 \cdot 5) = 4,7$$

Аналогично рассчитываем и для других исполнений.

Таким образом, выбранный вариант исполнения тягового двигателя (синхронный двигатель с возбуждением от постоянных магнитов) является наиболее ресурсоэффективным.

Общее количество дней, затраченных на выполнение работы: 62 дня.

Затраты на проектирование составили: 121786,5 руб.

Разработанный проект имеет значительно больше ресурсных, финансовых и экономических достоинств по сравнению с аналогами и тем самым будет востребованным на рынке

5. Социальная ответственность

Введение

Электропривод шасси пассажирского самолета SSJ-100 представляет из себя закрытую конструкцию электромеханической системы тягового двигателя (синхронный двигатель с возбуждением от постоянных магнитов) и передаточного механизма (трехступенчатый редуктор планетарного типа).

В данном разделе будет разрабатываться проект по обеспечению безопасности жизнедеятельности организации, снижения вредоносных воздействий на окружающую среду, экономного расхода ресурсов и соблюдения трудовых, социальных прав персонала, соответственно международному стандарту IC CSR 26000:2011.

Проект позволяет самостоятельно оценить возможные неблагоприятные воздействия на общество и окружающую среду, а также организовать соответствующие работы по развитию и внедрению производства данной разработки.

5.1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

5.1.1. Специальные (характерные для проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства.

Для эффективной разработки проекта следует подробно рассмотреть правовые нормы трудовых отношений, которые регламентируются Трудовым Кодексом Российской Федерации.

8.1.1.1. Режим работы

Для работников, работающих в опасных и вредоносных условиях, режим работы имеет сокращенную продолжительность: 36 - часовой рабочей неделе – 8 часов в день. 30 – часовой рабочей недели – 6 часов в день. [12]

Также установлена минимальная продолжительность оплачиваемого ежегодного отпуска, который составляет 7 календарных дней. [13]

5.1.1.2. Оплата труда

Для работников, занятых на работах с вредными и опасными условиями труда, устанавливается повышенный размер оплаты труда. Минимальный размер доплаты составляет 4% тарифной ставки. [14]

5.1.1.3. Медицинский осмотр

Работники, занятые на работах с вредными и опасными условиями труда должны обязательно проходить предварительные и периодические медицинские осмотры. [15]

5.1.1.4. Обязанность работодателя

Работодатель обязан обеспечить безопасные условия и охрану труда работника на работах с вредными и опасными условиями труда. [16]

Обязанности работодателя: обеспечить безопасность при эксплуатации зданий, оборудования, проведении работ, применении в производстве сырья, материалов и инструментов; представить работникам за счет собственных средств специальную одежду, обувь и другие средства индивидуальной защиты, смывающие и обезвреживающие средства; организовать обучение по выполнению работ, оказанию первой помощи пострадавшим, провести инструктаж и проверить знания по охране труда; проводить контроль и оценку состояния условий труда, информировать работников об условиях и охране труда и принимать меры по предотвращению аварийных ситуаций; организовать медицинское обслуживание и доставку работников, заболевших или травмированных на рабочем месте; застраховать работников от несчастных случаев и профзаболеваний и т.д.

5.1.1.5. Дополнительные льготы и гарантии

Работникам, работающим на работах с вредными условиями труда, бесплатно предоставляют молоко или другие равноценные пищевые продукты, или компенсируют выдачу лечебно-профилактического питания дополнительной выплатой. [17] В случае заболевания, травм, повреждении здоровья на рабочем месте, работнику возмещается утраченный доход и компенсируется лечение. [18]

5.1.2. Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.

Планировка рабочего места должна быть направлена на устранение лишних и нерациональных трудовых движений, максимальное сокращение перемещения рабочего и материальных элементов трудового процесса. Рационально распланировка рабочего места должна предусматривать четкий порядок размещения инструментов, деталей, документов как в процессе работы, так и при хранении

В рабочей зоне не должно быть сквозняков, но при этом должна быть постоянна вентиляция помещения. Температура в помещении должна быть комфортной. Уровни шума и вибрации не должны превышать допустимых значений, установленных санитарными нормами. Рабочее место должно иметь достаточное естественное и искусственное освещение. Также должны быть соблюдены санитарно-гигиенические требования к организации рабочих мест.

Помещения должны быть обеспечены первичными средствами пожаротушения согласно действующим нормам. Не допускается загромождение рабочих мест, проходов, выходов из помещений и зданий, доступа к противопожарному оборудованию. Помещение должно быть оснащено сигнализацией и связью.

Перед началом работы необходимо провести специальную оценку условия труда (СОУТ) – оценка рабочих мест.

5.2. Производственная безопасность

Важным фактором производственного процесса является благоприятная производственная среда. Для создания благоприятной производственной среды необходимо разработать ряд мероприятий и технических средств, предотвращающий неблагоприятные воздействия на работников.

Неблагоприятные действующие производственные факторы делятся, как правило, на два важных типа: вредные производственные факторы (ВПФ) и опасные производственные факторы (ОПФ). [19]

В таблице 16. представлена перечень вредных и опасных факторов (ГОСТ 12.0.003-2015), которые могут повлиять на работников, разрабатывающих, изготавливающих и эксплуатирующих проектируемую электромеханическую систему.

Таблица 16 – ОПФ и ВПФ

Факторы (ГОСТ 12.0.003-2015)	Этапы работы			Нормативные документы
	Разработка	Изготовление	Эксплуатация	
Превышение уровня шума	-	+	+	- ГОСТ 12.1.003-2014 ССБТ «Шум. Общие требования безопасности» [20]
Превышение уровня вибрация	-	+	+	- СН 2.2.4/2.1.8.566 – 96 «Производственная вибрация в помещениях жилых и общественных зданий» [21]
Недостаточная освещенность	+	+	+	- ГОСТ Р 55710-2013 «Освещение рабочих мест внутри зданий» [22]
Отклонение показателей микроклимата	+	+	+	- СН 2.2.4.548-96 «Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений» [23]
Нервно психические нагрузки	+	+	+	- МР 2.2.9.2311-07 «Профилактика стрессового состояния работников при различных видах профессиональной деятельности» [24]
Поражение электрическим током.	-	+	+	- ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ «Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов» [25]
Пожара – взрывоопасность	+	+	+	- ГОСТ Р 12.3.047-98 ССБТ «Пожарная безопасность технологических процессов» [26]

5.2.1. Анализ вредных опасных производственных факторов

5.2.1.1. Превышение уровня шума

Разрабатываемый электродвигатель является источником высокого уровня шума, что представляет из себя вредный фактор производственной среды.

Непосредственное воздействие шума на организм может выражаться учащением пульса, дыхания, повышением артериального давления, изменением двигательной и секреторной функции желудка и других органов. Отражение на нервной системе может заключаться в головной боли, бессоннице, ослаблении внимания, замедлении психических реакций.

В таблице 17 представлены предельно допустимые уровни звука в соответствии с СН 2.2.4/2.1.8.562-96 «Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки» для выполнения всех видов работ.

Таблица 17 - Предельно допустимые уровни звука

Уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах со среднегеометрической частотами, Гц									По шкале
31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
107	95	87	82	78	75	73	71	69	80

Для защиты от шума предусматриваются индивидуальные средства защиты (наушники), звукоизолирующие экраны и звукоизолирующие кабины.

5.2.1.2. Превышение уровня вибрации

Высокая вибрация представляет из себя такую же опасность, как и шум. Это допустимо в период работы двигателя при нагрузке выше допустимой. Под вибрацией имеется в виду колебание твёрдых тел.

Негативное влияние вибрации на организм человека выражается во влиянии ее на работу центральной нервной системы, желудочно-кишечного тракта и вестибулярного аппарата человека. Большую опасность для организма представляют вибрации частотой 6-9 Гц, так как эти частоты наиболее близки к

собственным частотам внутренних органов человека. Совпадение частоты вибрации и внутреннего органа приведёт к резонансному явлению.

Согласно СН 2.2.4/2.1.8.566–96 «Производственная вибрация, вибрация в помещениях жилых и общественных зданий» предельно допустимые значения производственной локальной вибрации представлены в таблице 18.

Таблица 18 – Технические нормы вибрации

Среднеквадратичная частота, Гц, Предельно допустимые виброскорости, Дб.								
8	16	31,5	63	125	250	500	1000	Корректировочное значение
115	109	109	109	109	109	109	109	112

Для виброзащиты применяются средства индивидуальной защиты для рук, ног и тела работника (рукавицы и перчатки, вкладыши и прокладки, сапоги). Кроме этого используются виброизолирующие материалы под оборудование (пружины, резины и другие прокладочные материалы).

5.2.1.3. Недостаточная освещенность

Для изготовления и непосредственного наблюдения за объектом необходимо организовывать правильное освещение рабочих мест. Неправильное освещение может привести не только к утомлению зрения рабочего, что может вызвать утомление всего организма, но и даже ухудшение зрения и порой даже необратимое. Для глаз вредно как недостаток света, так и его избыток.

Согласно СП 52.13330.2016 «Естественное и искусственное освещение» оптимальное освещение: 200 -500 лк при комбинированном освещении.

На рабочих местах, где трудовая деятельность ведется в условиях отсутствия естественного освещения, необходимо проводить мероприятия, направленные на уменьшение уровня вредности условий труда путём использования искусственного освещения и защиты временем.

5.2.1.4. Отклонение показателей микроклимата

При разработке и изготовлению проекта работник может столкнуться с неблагоприятными показателями микроклимата. Для работы важны комфортные и

безопасные условия. Низкая (высокая) температура, сквозняки, повышенная (пониженная) влажность воздуха могут привести к ухудшению здоровья человека.

Оптимальные и допустимые метеорологические условия для категории работ средней тяжести Па, согласно ГОСТ 12.1.005 – 88 ССБТ «Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны» представлены в таблице 19.

Таблица 19. Оптимальные и допустимые показатели микроклимата
в рабочей зоне производственных помещений

Период	Оптимальная температура °С	Допустимая температура °С	Оптимальная влажность %	Допустимая влажность %	Скорость движения воздуха оптимальная м/с	Скорость движения воздуха допустимая м/с
Холодный	18-20	15-23	40-60	не более 75	0,2	не более 0,3
Теплый	21-23	17-27	40-60	не более 65	0,3	0,2-0,4

Для защиты организма от неблагоприятного воздействия микроклимата необходимо проводить проверки помещения на соответствие показателей микроклимата. От возможного переохлаждений при проведении работ в условиях пониженной температуры следует использовать индивидуальные средства защиты: куртки, перчатки, шапки. Также следует организовывать помещения для отдыха и обогрева.

5.2.1.5. Нервно - психические перегрузки

Разрабатываемый проект является сложным техническим решением, которое требует точного и верного исполнения. При выполнении работ по разработке проекта, его монтажу и эксплуатации инженеры сталкиваются с нервно-психическими перегрузками, связанными с напряженностью трудового процесса.

Нервно – психические перегрузки вызывают усталость, ухудшают стрессоустойчивость, что влияет на качество выполняемых работ.

Для минимизации действия данного фактора необходимо соблюдать режим труда и отдыха, в также оборудовать комнаты для отдыха и психологической разгрузки персонала.

5.2.1.6. Поражение электрическим током.

При разработке проекта необходимо учитывать электротравматизм на производстве. Причиной которого являются: неисправное электрооборудование; отсутствие или недостаточность защитного заземления; прикосновение к металлическим конструкциям и частям оборудования, находящимся под током вследствие соприкосновения их с оголенными проводами, а также к самим оголенным проводам; отсутствие индивидуальных и коллективных средств защиты и т.д.

Поражение электрическим током – является самым опасным производственным фактором, в следствие которого человек может получить ожоги, поражение внутренних органов и потерю памяти.

Для защиты от поражения электрическим током применяют коллективные средства электрозащиты: изоляция токопроводящих частей (проводов) и ее непрерывный контроль, установка оградительных устройств, предупредительная сигнализация и блокировка, использование знаков безопасности и предупреждающих плакатов, применение малых напряжений, защитное заземление, зануление, защитное отключение, а также изолирующие средства защиты: диэлектрические перчатки, инструменты с изолированными рукоятками, диэлектрические боты, изолирующие подставки.

5.2.1.7. Пожарная опасность

В следствие электрических замыканий или других факторов, которые возникают при производстве объекта исследования, может возникнуть пожар.

Источниками возникновения пожара могут быть устройства электропитания, где в результате различных нарушений образуются перегретые элементы,

электрические искры и дуги, способные вызвать загорания горючих материалов, короткие замыкания, перегрузки.

Результатам негативного воздействия пожара на организм человека являются ожоги различной степени тяжести, повреждения и возможен летальный исход.

Для предотвращения пожара на производстве необходимо своевременно проверять оборудование на исправность и проверять соблюдение норм пожарной безопасности.

Перечень первичных средств для пожаротушения включает в себя пожарные стволы, огнетушители, сухой песок, асбестовые одеяла, вода. В ангарах, складских помещениях, административных, производственных зданиях устанавливаются системы автоматического пожаротушения.

5.2.2. Обоснование мероприятий по защите персонала предприятия от действия опасных и вредных факторов.

Важнейшим требованием при организации рабочего места является обеспечение безопасных, комфортных условий для работы, пресечение возникновения профзаболеваний и несчастных случаев.

Для борьбы с шумом и вибрациями на производственных участках необходимо использовать коллективные и индивидуальные средства защиты. При проектировании производственных участков следует отделять малошумные помещения от помещений с интенсивными источниками шума.

Для оптимизации освещения на рабочих местах необходимо оборудовать некоторые станки индивидуальными светильниками. Искусственное общее освещение должно располагаться в верхней зоне помещений и по возможности в непосредственной близости рабочей зоны.

Производственные помещения должны своевременно отапливаться, поддерживая комфортную для работников температуру. Влажность воздуха должна строго контролироваться.

Для персонала необходимо организовать специальные комнаты, где они могут отдыхать и переодеваться в рабочую форму.

Для предотвращения поражением электрическим током все токоведущие провода и кабели необходимо изолировать. В электрических шкафах необходимо применять защитно-отключающие устройства. Все места, в которых рабочий может получить поражение электрическим током должны быть выделены и обозначены специальными предупреждающими знаками.

Для обеспечения пожарной безопасности следует не допускать до работы лица, не прошедшие противопожарный инструктаж. Каждый работник должен знать, как эвакуироваться и как пользоваться первичными средствами тушения. Для успешной эвакуации, в коридорах, проходах, тамбурах не должно быть загромождений. Для своевременного предотвращения пожара, необходимо проводить проверку помещений.

5.3. Экологическая безопасность

5.3.1. Анализ влияния объекта исследования на окружающую среду.

Одной из идей создания электропривода шасси пассажирского самолета SSJ-100 является улучшение экологических характеристик воздушного судна, снижение количества вредных выбросов в зоне аэропорта и снижение шума.

Технологический процесс изготовления данной электромеханической системы не является вредным, не имеет значительных выбросов в атмосферу вредных веществ. В процессе производства образуются отходы, которые при соответствующей обработке могут быть использованы повторно, для промышленной продукции.

Для того, что утилизировать электромеханического привод, необходимо разобрать конструкцию и переплавить металлические изделия для вторичного использования - это позволит сэкономить природные ресурсы (железо, медь).

5.3.2. Обоснование мероприятий по защите окружающей среды.

В случае наличия опасных отходов, которые нельзя использовать повторно и рециклировать, их следует сдать на утилизацию или обезвреживание.

К сфере защиты окружающей среды и рационального использования природных ресурсов относится экономия ресурсов, в частности энергетических.

Реальным вкладом в экологию страны может стать экономия электрической и тепловой энергии на производстве. Во-первых, это улучшает экономические показатели деятельности предприятия (уменьшение расходов на электротепловую энергию). Во-вторых, экономия энергии означает уменьшение газа, мазута, угля, сжигаемого в топках котлов ТЭС и электроустановок (котельных) промпредприятий и одновременное уменьшение выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух.

5.4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях

5.4.1. Анализ вероятных ЧС, которые может инициировать объект исследований.

При разработке, производстве и эксплуатации проектируемого решения, как правило, могут возникнуть аварии, в следствие которых возникают чрезвычайные ситуации: производственные взрывы, пожары, обрушение зданий.

Наиболее вероятным видом ЧС является Пожар.

Основными причинами пожара могут быть: перегрузка проводов, короткое замыкание, большие переходные сопротивления в электрических цепях, электрическая дуга, искрение и неисправности оборудования, нарушение технологического режима и мер пожарной безопасности.

Основными опасными факторами пожара являются: тепловое излучение, высокая температура, отравляющее действие дыма (продуктов сгорания: окиси углерода и др.) и снижение видимости при задымлении.

5.4.2. Обоснование мероприятий по предотвращению ЧС и разработка порядка действия в случае возникновения ЧС.

Пожарная профилактика обеспечивается: системой противопожарной защиты; организационно - техническими мероприятиями.

К мерам противопожарной защиты относятся: применение средств защитного отключения возможных источников загорания; применение искробезопасного оборудования; применение устройства молниезащиты здания; выполнение правил (инструкций) по пожарной безопасности; применение пожарной сигнализации; средств коллективной и индивидуальной защиты от факторов пожара и т.д.

Организационно-технические мероприятия: наглядная агитация и инструктаж работающих по пожарной безопасности; разработка схемы действия администрации и работающих в случае пожара, и организация эвакуации людей; организация внештатной пожарной дружины.

При обнаружении загорания рабочий немедленно сообщает по телефону 01 в пожарную охрану, сообщает руководителю, приступают к эвакуации людей и материальных ценностей. Тушение пожара организуется первичными средствами с момента обнаружения пожара. Пострадавшим при пожаре обеспечивается скорая медицинская помощь.

Вывод по разделу

В данном разделе были подробно изучены правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности. Выявлены потенциально вредные и опасные производственных факторы, с которыми можно столкнуться при разработке, изготовлению и эксплуатации электропривода шасси, проведен их анализ. Так же обоснованы мероприятия по устранению этих факторов. Рассмотрены возможные работы по улучшению экологии. Определены возможные чрезвычайные ситуации и разработан комплекс мер по их предотвращению.

Все принимаемые меры необходимо постоянно поддерживать, т.к. меры по обеспечению безопасности работ и купированию опасных и вредных факторов нацелены на самое главное – сохранение здоровья работника и недопущения его постепенного или резкого ухудшения. Рабочая среда должна быть максимально комфортной, что обязательно положительно повлияет на производительность труда и в итоге на успешность производственной деятельности предприятия в целом. Разработка мер экологической безопасности призваны максимально сократить воздействие производства на окружающую среду, а профилактика чрезвычайных ситуаций и пожарная безопасность позволит избежать ущерба как здоровью работников, так и экономике предприятия.

Литература

1. Проектирование электрических машин: учебник для вузов /И. П. Копылов, Б. К. Клоков, В. П. Морозкин, Б. Ф. Токарев; Под ред. И. П. Копылова. – 3-е изд., испр. и доп. – М.: Высш. шк., 2002. – 757 с.: ил.
2. В.А. Балагуров, Ф.Ф. Галтеев Электрические генераторы с постоянными магнитами.-М.: Энергоатомиздат, 1988.-280. ил.
3. Балагуров В.А. Проектирование специальных электрических машин переменного тока. М.:Высшая школа,1982.-272 с.
4. О.Д. Гольдберг, Я.С. Гурин, И.С. Свириденко. Проектирование электрических машин. Издание второе, переработанное. Москва «Высшая школа». 2001
5. Неисчерпаемая энергия. кн. 1. Ветроэлектрогенераторы/ В.С. Кривцов, А.М. Олейников, А.И. Яковлев. Учебник-Харьков. Нац. аэрокосм. ин-т «Харьковский авиастр. ин-т», Севастополь 2003.-400с.
6. Неисчерпаемая энергия. кн. 2. Ветроэлектрогенераторы/ В.С. Кривцов, А.М. Олейников, А.И. Яковлев. Учебник-Харьков. Нац. аэрокосм. ин-т «Харьковский авиастр. ин-т», Севастополь 2004. –519с.
7. Слободнюк Р. С. Проектирование планетарных зубчатых передач/ Р. С. Слободнюк – МОРФ ДГТУ, Владивосток 2000. - 23с.
8. Видяев И.Г., Серикова Г.Н., Гаврикова Н.А. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение: учебно-методическое пособие / И.Г. Видяев, Г.Н. Серикова, Н.А. Гаврикова, Н.В. Шаповалова, Л.Р. Тухватулина, З.В. Криницина; ТПУ. – Томск: Изд-во ТПУ, 2014 – 36с.
9. Г.В. Тарасевич. Более электрический самолет//Кот Шреденгера. Живой научно-популярный журнал фестиваля науки. – 2017. - №11-12 (37-38). С. 50.
- 10.«Технодинамика» представила систему наземного передвижения воздушных судов с электроприводом колеса [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://sdelanounas.ru/blogs/66718/>

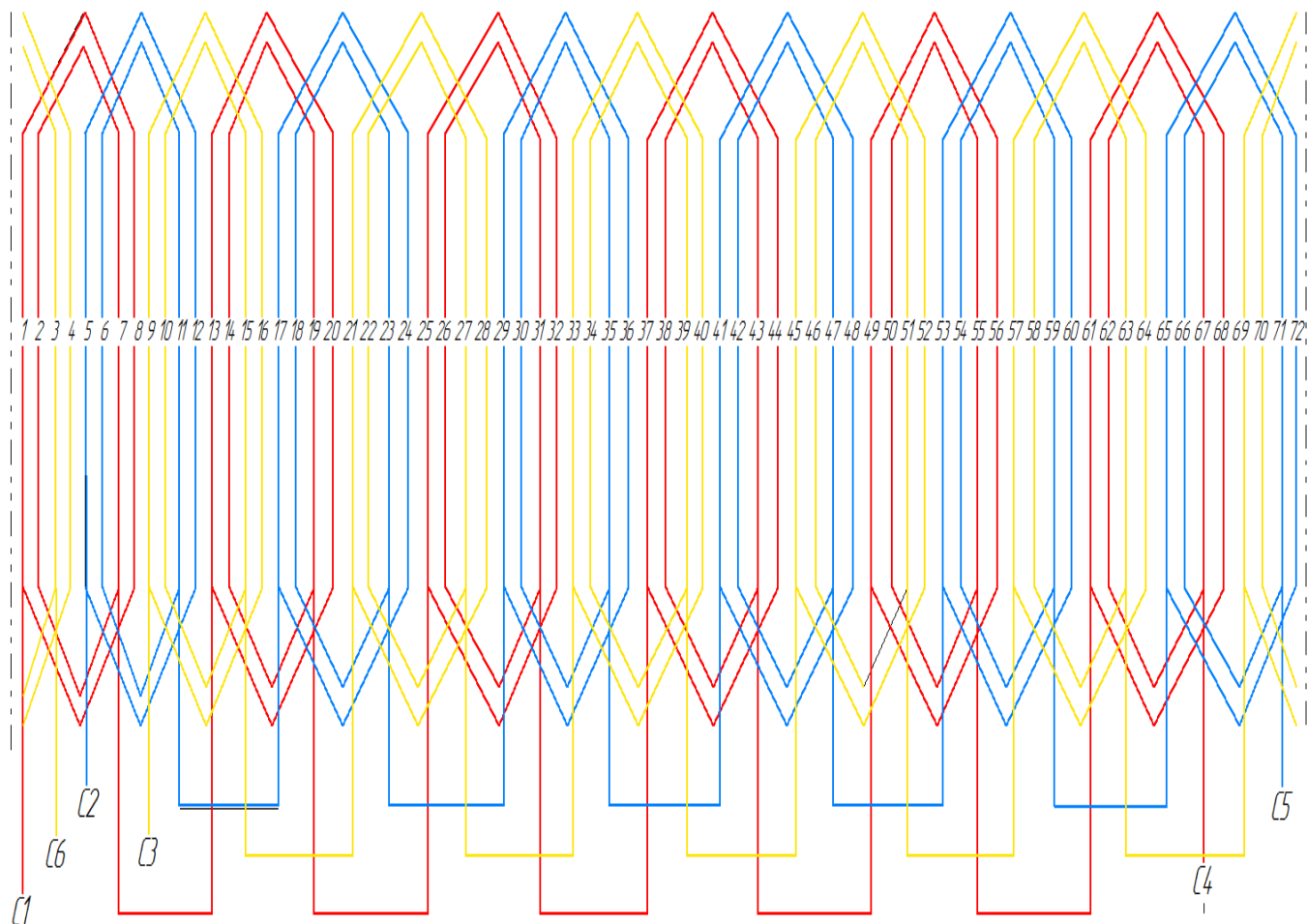
11. В.Е. Урсу. RU 2 583 535 C1 Многодвигательный электропривод колеса шасси самолета и способ его работы / В.Е. Урсу В.В. Урсу. – 2016
12. "Трудовой кодекс Российской Федерации" от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 24.04.2020). Статья 94. Продолжительность ежедневной работы (смены).
13. "Трудовой кодекс Российской Федерации" от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 24.04.2020). Статья 117. Ежегодный дополнительный оплачиваемый отпуск работникам, занятым на работах с вредными и (или) опасными условиями труда.
14. "Трудовой кодекс Российской Федерации" от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 24.04.2020). Статья 147. Оплата труда работников, занятых на работах с вредными и (или) опасными условиями труда.
15. "Трудовой кодекс Российской Федерации" от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 24.04.2020) Статья 213. Медицинские осмотры некоторых категорий работников.
16. "Трудовой кодекс Российской Федерации" от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 24.04.2020). Статья 212. Обязанности работодателя по обеспечению безопасных условий и охраны труда.
17. "Трудовой кодекс Российской Федерации" от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 24.04.2020). Статья 222. Выдача молока и лечебно-профилактического питания.
18. "Трудовой кодекс Российской Федерации" от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 24.04.2020). Статья 184. Гарантии и компенсации при несчастном случае на производстве и профессиональном заболевании.
19. ГОСТ 12.1.003-2014 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Шум. Общие требования безопасности (Переиздание)
20. СН 2.2.4/2.1.8.566 – 96. Производственная вибрация, вибрация в помещениях жилых и общественных зданий. Санитарные нормы.

- 21.ГОСТ Р 55710-2013 Освещение рабочих мест внутри зданий. Нормы и методы измерений.
- 22.СанПиН 2.2.4.548-96 Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений.
- 23.МР 2.2.9.2311-07 Профилактика стрессового состояния работников при различных видах профессиональной деятельности
- 24.ГОСТ 12.1.038-82 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов (с Изменением N 1)
- 25.ГОСТ Р 12.3.047-98 ССБТ. Пожарная безопасность технологических процессов

Приложение А

Обмотка статора.

$$z = 72; 2p = 12; q = 2; a = 1; y = 5, 7.$$



Приложение Б

Эскиз поперечного сечения активной части СДПМ

