

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ КАЗЁННОЕ ВОЕННОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«КРАСНОДАРСКОЕ ВЫСШЕЕ ВОЕННОЕ АВИАЦИОННОЕ УЧИЛИЩЕ
ЛЁТЧИКОВ ИМЕНИ ГЕРОЯ СОВЕТСКОГО СОЮЗА А.К. СЕРОВА»
МИНИСТЕРСТВА ОБОРОНЫ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «МОСКОВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ
ИНСТИТУТ (НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»

На правах рукописи

Князев Алексей Сергеевич



**АВИАЦИОННЫЙ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС
С УЛУЧШЕННЫМИ МАССОГАБАРИТНЫМИ ПОКАЗАТЕЛЯМИ
ДЛЯ АВАРИЙНОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ВОЗДУШНОГО СУДНА**

Специальность: 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы»

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание учёной степени кандидата технических наук

Научные руководители:

кандидат технических наук, доцент,

Кашин Яков Михайлович

доктор технических наук, с.н.с.,

Ковалёв Константин Львович

г. Краснодар, г. Москва – 2018

СОДЕРЖАНИЕ

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ.....	5
ВВЕДЕНИЕ.....	6
1 СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ АВИАЦИОННЫХ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ ДЛЯ АВАРИЙНЫХ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	14
1.1 Актуальность развития аварийных систем электроснабжения воздушных судов с авиационными ветроэнергетическими комплексами.....	14
1.2 Состояние развития авиационных ветроэнергетических комплексов.....	16
1.2.1 Состояние развития авиационных ветроэнергетических комплексов в России.....	16
1.2.2 Состояние развития авиационных ветроэнергетических комплексов за рубежом.....	18
1.3 Требования, предъявляемые к генератору авиационного ветроэнергетического комплекса в составе системы электроснабжения воздушного судна.....	23
1.4 Критический анализ существующих конструкций авиационных ветроэнергетических комплексов. Обоснование конструкции перспективного авиационного ветроэнергетического комплекса.....	29
1.5 Постановка задачи исследования.....	35
2 РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ ПЕРСПЕКТИВНОГО АВИАЦИОННОГО ВЕТ- РОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА.....	36
2.1 Анализ структурной схемы аварийной системы электроснабжения и особенностей конструкции авиационного ветроэнергетического комплекса.....	36
2.2 Разработка и описание конструкции перспективного авиационного ветроэнергетического комплекса.....	41
2.3 Анализ особенностей конструктивного исполнения и изготовления генератора с постоянными магнитами для перспективного авиационного ветроэнергетического комплекса.....	47
2.4 Выводы по главе.....	58

3 РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОГО АППАРАТА ДЛЯ РАСЧЁТА ГЕНЕРАТОРА ПЕРСПЕКТИВНОГО АВИАЦИОННОГО ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА.....	59
3.1 Вывод формул для определения габаритных размеров генератора с постоянными магнитами для перспективного авиационного ветроэнергетического комплекса.....	59
3.2 Исследование эквивалентных генераторов с постоянными магнитами для авиационного ветроэнергетического комплекса.....	67
3.3 Анализ зависимости оптимального соотношения главных размеров генератора авиационного ветроэнергетического комплекса от его формы.....	77
3.4 Выводы по главе.....	86
4 РАСЧЁТ, ОПТИМИЗАЦИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРСПЕКТИВНОГО АВИАЦИОННОГО ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА.....	87
4.1 Разработка методики проектирования авиационного ветроэнергетического комплекса.....	87
4.1.1 Методика проектирования ветроколеса для авиационного ветроэнергетического комплекса.....	87
4.1.2 Методика проектирования генератора с постоянными магнитами для авиационного ветроэнергетического комплекса.....	96
4.2 Разработка методики массогабаритной оптимизации авиационного ветроэнергетического комплекса.....	100
4.2.1 Обоснование и описание методики массогабаритной оптимизации генератора с постоянными магнитами.....	101
4.2.2 Определение влияния формы генератора с постоянными магнитами на его габаритные размеры.....	107
4.2.3 Определение влияния формы генератора с постоянными магнитами на его массу активных материалов.....	112
4.2.4 Определение влияния высоты постоянных магнитов на массогабаритные показатели генератора с постоянными магнитами	120
4.3 Разработка программы для расчёта и массогабаритной оптимизации генератора с постоянными магнитами.....	124

4.4 Электромагнитный анализ моделей генераторов с постоянными магнитами для перспективного авиационного ветроэнергетического комплекса в программе «Ansys Maxwell 16».....	132
4.5 Сквозное проектирование генератора с постоянными магнитами для авиационного ветроэнергетического комплекса.....	136
4.6 Обоснование достоверности разработанной методики проектирования генератора с постоянными магнитами для перспективного авиационного ветроэнергетического комплекса и результатов моделирования в программе «Ansys Maxwell 16».....	140
4.7 Преимущества разработанного перспективного авиационного ветроэнергетического комплекса.....	145
4.8 Выводы по главе.....	148
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	151
Список литературы.....	154
ПРИЛОЖЕНИЕ А (обязательное) Конструкция перспективного авиационного ветроэнергетического комплекса.....	168
ПРИЛОЖЕНИЕ Б (обязательное) Кривые размагничивания электротехнических сталей 49К2ФА и Somaloy	169
ПРИЛОЖЕНИЕ В (обязательное) Кривая размагничивания неодимового магнита марки N35.....	170
ПРИЛОЖЕНИЕ Г (обязательное) Расчёт параметров генератора с постоянными магнитами для авиационного ветроэнергетического комплекса.....	171
ПРИЛОЖЕНИЕ Д (обязательное) Листинг скрипта для автоматического построения модели электрической машины с постоянными магнитами в программе «Ansys Maxwell 16» на примере магнитопровода индуктора.....	234

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

АБ – аккумуляторная батарея

АВЭЖ – авиационный ветроэнергетический комплекс

ВС – воздушное судно

ВУ – выпрямительное устройство

ИНВ - инвертор

КПД – коэффициент полезного действия

ПМ – постоянный магнит

СЭС – система электроснабжения

ЭДС – электродвижущая сила

ЭМ – электрическая машина

D_0 – диаметр эталонной окружности

R_0 – радиус эталонной окружности

α – угол наклона воздушного зазора к оси вращения ротора

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность и степень разработанности избранной темы.

В случае возникновения нештатных ситуаций на борту воздушного судна (ВС) при отказе одного или нескольких двигателей жизнь экипажа и пассажиров зависит от работы аварийных систем. В силу того, что в настоящее время увеличивается степень электрификации бортового оборудования, повышение надёжности работы системы электроснабжения, как основной, так и аварийной, имеет важное значение. Однако, при повышении надёжности нельзя допустить увеличения массогабаритных показателей всей системы электроснабжения в целом и источников электроэнергии в частности, так как массогабаритные показатели являются одними из важнейших показателей для любого авиационного агрегата.

Система электроснабжения ВС состоит из основной и аварийной систем, каждая из которых имеет свои источники электроэнергии. Примерами аварийных источников служат аккумуляторная батарея (АБ), преобразователь постоянного тока в переменный – инвертор (ИНВ), питаемый от АБ, и генератор авиационного ветроэнергетического комплекса (АВЭК). Все перечисленные аварийные источники электроэнергии могут использоваться на ВС одновременно.

В случае отказа всех двигателей основные источники электроэнергии перестают работать, а самолёт становится планером. При этом электродистанционная система управления получает питание от аварийных источников. Это означает, что не только безопасность, но и сама возможность выполнения полёта напрямую зависят от работы аварийных источников электроэнергии.

АБ и питаемый от неё ИНВ являются источниками энергии с ограниченным временем работы, зависящим от емкости АБ, её технического состояния, мощности преобразователя, а также от величины нагрузки. На борту ВС устанавливают несколько АБ в зависимости от мощности потребителей. В среднем, АБ обеспечивают бесперебойную работу потребителей первой категории (приборов и систем, необходимых для совершения безаварийной посадки) в течение 30 минут. Поэтому использование АБ без аварийных генераторов не гарантирует безопасного завершения полёта при отказе основных генераторов, что недопустимо.

В настоящее время проблема ограниченного времени работы аварийной системы электроснабжения ВС, как правило, решается путем использования вспомогательной силовой установки и (или) АВЭК. Вспомогательная силовая установка имеет ряд недостатков: сложная конструкция, ограниченный ресурс, высокая стоимость производства, обслуживания и ремонта, потребление авиационного топлива, приводящее к сокращению продолжительности полёта ВС. Поэтому вспомогательная силовая установка, хотя и обеспечивает приёмники электроэнергии в течение всего времени полёта ВС, вместе с тем, сокращает это время, уменьшая вероятность безопасного завершения полёта. Кроме того, в случае утечки топлива запуск вспомогательной силовой установки становится невозможным, а значит, она не всегда может являться источником электроэнергии в чрезвычайной ситуации.

Указанные недостатки можно исключить при использовании АВЭК, входящего в состав аварийной системы электроснабжения ВС. АВЭК просты по конструкции, неприхотливы в обслуживании (в случае применения бесконтактного генератора) и используются только в качестве аварийных источников энергии. Такие источники электроэнергии являются первичными, не зависящими от источников энергии с ограниченным временем работы. Они могут продолжать работу в течение всего полёта ВС, поэтому максимальное время их работы определяется только максимальным временем полёта ВС. Надёжность АВЭК определяется, в основном, надёжностью генератора. В случае применения бесконтактного генератора, а также с учётом крайне редкого использования, можно считать, что АВЭК имеет высокую надёжность и вероятность его отказа в полёте при работе в качестве аварийного источника электроэнергии очень мала. Кроме того, АВЭК не потребляет авиационное топливо, поэтому при его работе максимальное время продолжительности полёта ВС не сокращается.

Массогабаритные показатели всего АВЭК в значительной степени зависят от его генератора. Существенный вклад в развитие ветроэнергетических комплексов и генераторов для них внесли А.И. Яковлев [102, 103, 147, 148], Б.С. Зечихин [48, 50, 51], А.В. Левин [103, 104, 105, 106, 107, 108, 109, 110, 111, 117, 141, 144], Ф.Р. Исмагилов [58, 59], М.Ю. Румянцев, В.Е. Вавилов [59], А.М. Сугробов [127, 133], А.М. Русаков [127, 133], А.М. Олейников [49, 102, 103], В.П. Харитонов [142], Р.А. Янсон [149], С.А. Ганджа [32, 33, 34, 35, 36], А.С. Мартьянов [35, 36]. Однако, некоторые параметры, необходимые для расчёта, в методиках указанных авторов не вычисляются, а приводятся в виде конкретных

значений (диапазонов возможных значений). Это не позволяет проектировать электрогенераторы для АВЭК, параметры или условия работы которых отличаются от указанных в известных методиках.

Преимущества АВЭК по сравнению с другими аварийными источниками электроэнергии на ВС очевидны: автономность (независимость от топлива и других ресурсов), простота конструкции, надёжность, продолжительность работы (неограниченное время вплоть до посадки). Главной причиной, по которой они не получили широкого распространения являются не вполне удовлетворительные массогабаритные показатели. В связи с этим, улучшение массогабаритных показателей АВЭК позволит расширить область их применения и, тем самым, повысить безопасность полётов.

Таким образом, диссертационное исследование, связанное с проектированием АВЭК с улучшенными массогабаритными показателями, является актуальным.

Актуальность диссертационного исследования подтверждается также соответствием его одному из приоритетных направлений развития науки, технологий и техники РФ: транспортные и космические системы (согласно Указа Президента РФ от 07.07.2011 г. №899) и приказа Министерства промышленности и торговли РФ №663 от 31 марта 2015 года «Об утверждении плана мероприятий по импортозамещению в отрасли гражданского авиастроения Российской Федерации», а именно: «Система генерирования постоянного и переменного тока на самолёте Sukhoi SuperJet 100».

Тема диссертации связана с планом научной работы Краснодарского высшего военного авиационного училища лётчиков имени Героя Советского Союза А.К. Серова Министерства обороны Российской Федерации и НИР «Повышение эффективности систем автономного электроснабжения» (шифр «АКС-САЭ-ДЭМ»).

Объект исследования. Авиационный ветроэнергетический комплекс аварийной системы электроснабжения воздушного судна.

Предмет исследования. Массогабаритные показатели авиационного ветроэнергетического комплекса, методика проектирования авиационного ветроэнергетического комплекса.

Цель диссертационной работы заключается в улучшении массогабаритных показателей авиационного ветроэнергетического комплекса аварийной системы электроснабжения воздушного судна.

Научная задача исследования заключается в разработке конструкции авиационного ветроэнергетического комплекса с улучшенными массогабаритными показателями, разработке методики проектирования авиационного ветроэнергетического комплекса.

Для достижения поставленной цели в работе определены и решены следующие задачи:

1. Разработка конструкции АВЭК;
2. Разработка методики проектирования АВЭК;
3. Разработка методики массогабаритной оптимизации АВЭК.

Степень достоверности. Достоверность полученных результатов обеспечивается корректностью поставленных задач, обоснованностью принятых допущений, сходимостью результатов теоретических исследований и экспериментов имитационного моделирования.

Научная новизна.

1. Разработана конструкция перспективного авиационного ветроэнергетического комплекса, отличающаяся тем, что магнитная система электрогенератора имеет коническую форму;

2. Разработана методика проектирования АВЭК, отличающаяся методикой проектирования генератора с постоянными магнитами, которая содержит выведенные формулы эквивалентного преобразования электрических машин (ЭМ), формулу определения оптимального значения конструктивного коэффициента для ЭМ с заданным углом наклона воздушного зазора к оси вращения ротора, формулу определения диаметра эталонной окружности для эквивалентной ЭМ с выбранным углом наклона воздушного зазора к оси вращения ротора, формулу определения критического угла наклона воздушного зазора к оси вращения ротора;

3. Разработана методика массогабаритной оптимизации АВЭК, отличающаяся тем, что она содержит способы улучшения каждого из массогабаритных показателей АВЭК, а также разработанную методику массогабаритной оптимизации генератора с постоянными магнитами.

Методы исследования. При выполнении диссертационной работы использовались методы обобщенного электромеханического преобразования энергии, имитационного моделирования, инструменты программного продукта «Ansys Maxwell 16».

Теоретическая и практическая значимость работы.

1. Разработанная конструкция перспективного авиационного ветроэнергетического комплекса позволяет создавать АВЭК с улучшенными массогабаритными показателями по сравнению с существующими аналогами при тех же энергетических показателях;
2. Разработанная методика проектирования АВЭК позволяет определять и сравнивать параметры АВЭК с генератором (с постоянными магнитами) радиальной, аксиальной и конической формы;
3. Разработанная методика оптимизации АВЭК позволяет оптимизировать массогабаритные показатели АВЭК по выбранному критерию.

Положения, выносимые на защиту.

1. Конструкция перспективного АВЭК;
2. Методика проектирования АВЭК;
3. Методика массогабаритной оптимизации АВЭК.

Апробация результатов работы.

Основные положения работы докладывались и обсуждались на международных и всероссийских конференциях: IV Международная научная конференция «Технические и технологические системы», филиал ВУНЦ ВВС «ВВА», 10-12 октября 2012 г., г. Краснодар; XIV Южно-Российская научно-практическая конференция «Инновационные технологии в образовательном процессе», филиал ВУНЦ ВВС «ВВА», 18 октября 2012 г., г. Краснодар; VI Международная научная конференция «Технические и технологические системы», филиал ВУНЦ ВВС «ВВА», 08-10 октября 2014 г., г. Краснодар; II Всероссийская научно-практическая конференция «АВИАТОР», ВУНЦ ВВС «ВВА», 11-13 февраля 2015 г., г. Воронеж; VII Международная научная конференция «Технические и технологические системы», КВВАУЛ им. А.К. Серова, 07-09 октября 2015 г., г. Краснодар; III Всероссийская научно-практическая конференция «Академические Жуковские чтения» ВУНЦ ВВС «ВВА», 25-26 ноября 2015 г., г. Воронеж; III Всероссийская научно-практическая конференция «АВИАТОР», ВУНЦ ВВС «ВВА», 11-12 февраля 2016 г., г. Воронеж; IV Всероссийская научно-практическая конференция «Академические Жуковские чтения», ВУНЦ ВВС «ВВА», 23-24 ноября 2016 г., г. Воронеж; IV Всероссийская научно-практическая конференция «АВИАТОР», ВУНЦ ВВС «ВВА», 16-17 февраля 2017 г., г. Воронеж.

Публикации.

Основное содержание работы опубликовано в 35 научных работах, в том числе 8 в изданиях, рекомендованных ВАК, 8 патентах на изобретение, 5 свидетельствах государственной регистрации программ для ЭВМ, 14 тезисах докладов Всероссийских и Международных научных конференций.

Структура и объем работы.

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы из 162 наименований и 5 Приложений. Общий объем работы составляет 238 страниц машинописного текста, включая 122 рисунка, 14 таблиц и 68 страниц Приложений.

Содержание работы.

В первой главе приведен обзор состояния развития систем электроснабжения воздушных судов с АВЭК как в России, так и за рубежом, обоснована необходимость их использования. Обоснована актуальность развития АВЭК и электрогенераторов для них. Кратко описаны и проанализированы существующие образцы АВЭК. Обозначена проблема отсутствия подходящих методик расчёта и обоснована необходимость создания методики проектирования АВЭК с генераторами с ПМ, имеющими различную форму - аксиальную, радиальную или коническую. Выполнена постановка задачи исследования и обоснована её актуальность.

Во второй главе представлен анализ работы и конструктивных особенностей АВЭК с учётом специфики его использования на ВС. Разработана структурная схема аварийной СЭС ВС с учётом параметров отечественных агрегатов, которые могут быть использованы при импортозамещении. Предложены меры, которые позволяют расширить допустимый диапазон выходного напряжения генератора и снизить ограничения на пилотирование ВС при выпущенном АВЭК. Представлена и описана конструкция перспективного АВЭК с электрогенератором, имеющим магнитную систему конической формы, описана её работа и приведена электрическая схема. Выполнен анализ особенностей конструктивного исполнения и описаны технологические особенности производства магнитопроводов для ЭМ с ПМ с магнитной системой радиальной, аксиальной и конической формы.

В третьей главе сформулировано определение эквивалентных ЭМ, у которых результаты электромеханического преобразования энергии одинаковы. Выдвинуто предположение о возможности создания эквивалентных ЭМ с ПМ различного конструктивного исполнения, обладающих одинаковыми энергетическими показателями. Представлены

выведенные формулы эквивалентного преобразования ЭМ, которые позволяют определять геометрические размеры эквивалентных ЭМ с разным углом наклона воздушного зазора к оси вращения ротора. В программе «Ansys Maxwell 16» построены трёхмерные компьютерные модели генераторов с ПМ радиального и аксиального конструктивного исполнения. Представлены результаты исследования построенных моделей, подтверждающие справедливость выдвинутого предположения об их эквивалентности. Выполнен анализ зависимости соотношения главных размеров генератора АВЭЖ от его формы.

В четвертой главе обоснована и описана методика проектирования АВЭЖ, содержащая методику проектирования ветроколеса, а также разработанную методику проектирования генератора с ПМ. Выведены формулы, учитывающие влияние формы генератора с постоянными магнитами для перспективного АВЭЖ на его габаритные размеры, на массу активных материалов, а также на массу магнитов. Описана методика массогабаритной оптимизации АВЭЖ, содержащая способы улучшения каждого из массогабаритных показателей АВЭЖ, а также разработанную методику массогабаритной оптимизации генератора с ПМ. Описана разработанная программа для расчёта и массогабаритной оптимизации генератора с ПМ для перспективного АВЭЖ, позволяющая выполнить расчёт и массогабаритную оптимизацию (по выбранному критерию) параметров генератора с ПМ различного конструктивного исполнения на основе исходных данных. Выполнен расчёт параметров генератора с ПМ радиальной, конической и аксиальной формы (полный расчёт приведен в Приложении Г только для генератора конической формы) с использованием разработанной программы, реализующей разработанную методику. Разработана программа для построения трёхмерных моделей ЭМ с ПМ радиальной, аксиальной и конической формы в программе «Ansys Maxwell 16». Описан порядок построения трёхмерной компьютерной модели генератора с ПМ в программе «Ansys Maxwell 16» в автоматическом режиме на основе результатов расчёта (листинг программы приведен в Приложении Д). В результате электромагнитного анализа построенных моделей в программе «Ansys Maxwell 16» получены осциллограммы напряжений в трёхфазной обмотке якоря генератора перспективных АВЭЖ как на холостом ходу, так и под нагрузкой, а также картины распределения магнитной индукции. Раскрыто понятие сквозного проектирования ЭМ, рассмотрены его этапы. Описано выполнение первых двух этапов сквозного проектирования генератора с ПМ с использованием разработанной методики и программы расчёта параметров генератора с ПМ, а также инструментов программы «Ansys Maxwell 16».

На примере подвозбудителя известного генератора ГТ30НЖЧ12 обоснована достоверность результатов расчёта параметров генератора с ПМ с использованием разработанной методики, а также результатов исследования трёхмерных моделей ЭМ с ПМ в программе «Ansys Maxwell 16». Изложены преимущества разработанного перспективного АВЭК с генераторами различного конструктивного исполнения.

В **заключении** приведены выводы по результатам всей диссертационной работы.

Благодарность. Выражаю благодарность за помощь и поддержку при работе над диссертацией: Гайтову Багаудину Хамидовичу, Кашину Якову Михайловичу, Кашину Александру Яковлевичу, Князевой Марии Олеговне, Пичугину Александру Васильевичу.

ГЛАВА 1 СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ АВИАЦИОННЫХ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ ДЛЯ АВАРИЙНЫХ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1 Актуальность развития аварийных систем электроснабжения воздушных судов с авиационными ветроэнергетическими комплексами

Неотъемлемой частью системы электроснабжения ВС является источник электроэнергии. На ВС устанавливаются основные и аварийные источники электроэнергии, кроме того могут устанавливаться резервные источники. Основными источниками являются генераторы переменного и постоянного тока, которые обеспечивают работу потребителей электроэнергии в течение всего времени штатной работы силовой установки, от которой отбирается механическая энергия для вращения вала генератора. К резервным источникам относят генератор вспомогательной силовой установки. Во время полёта вспомогательная силовая установка и её генератор не используются, но при необходимости они могут быть переведены в рабочий режим.

К аварийным источникам электроэнергии относят аккумуляторные батареи и независимые источники: генераторы с приводом от турбины, выпускаемой в поток встречного воздуха, или с гидроприводом, а также дополнительные генераторы, устанавливаемые на двигателе (ГОСТ Р 54073-2010).

Главной задачей, стоящей перед аварийным источником электроэнергии на ВС, является обеспечение электроэнергией тех систем и агрегатов, которые необходимы для возврата на ближайший аэродром и совершения безаварийной посадки. Такие системы и агрегаты относят к потребителям первой категории. Во время полёта прерывание обеспечения их электроэнергией недопустимо.

На ВС основные источники электроэнергии соединяют с так называемыми «шинами», к которым подключаются потребители. Потребители первой категории подключаются к аварийной шине, которая должна обеспечиваться электроэнергией от аварийных источников при отказе основных. Аварийные шины могут подключаться к источнику постоянного или переменного тока. Количество аварийных шин на разных ВС может быть различным. При работающих основных источниках электроэнергии основные и аварийные шины соединены между собой.

В зависимости от суммарной мощности потребителей первой категории и вида электроэнергии, необходимого для их работы, для каждого ВС рассчитывается необходимая мощность аварийных источников электроэнергии, определяется их тип и количество.

Несколько аварийных источников электроэнергии (например, АВЭЖ, аккумуляторная батарея и преобразователь постоянного тока в переменный - инвертор) могут использоваться на ВС одновременно.

В целях экономии топлива аэродинамическую схему современных ВС, как правило, делают неустойчивой, поэтому при отключении электронной системы управления ВС становится неуправляемым. Это особенно опасно для ВС, не оснащённых резервными источниками электроэнергии, например, такими, как вспомогательная силовая установка, так как для них время для возврата на аэродром и совершения безаварийной посадки строго ограничено временем работы аккумуляторных батарей. При этом появляется риск возникновения авиационного происшествия при их разряде.

В случае отказа основных источников электроэнергии безопасность полёта ВС напрямую зависит от времени работы аварийных источников. Аккумуляторные батареи и питаемый от них преобразователь (инвертор) являются источниками энергии с ограниченным временем работы, зависящим от емкости аккумуляторных батарей, их технического состояния, мощности преобразователя, а также от величины и характера нагрузки.

Для решения проблемы ограниченного времени работы аварийных источников электроэнергии целесообразно использовать АВЭЖ, работающий в составе аварийной системы электроснабжения ВС.

АВЭЖ просты по конструкции, неприхотливы в обслуживании (в случае применения бесконтактного генератора) и, в отличие от вспомогательной силовой установки, используются только в качестве аварийных источников энергии. Главным преимуществом АВЭЖ является неограниченное время работы вплоть до совершения посадки. Поэтому максимальное время их работы определяется только максимальным временем полёта ВС (в том числе при планировании с неработающими двигателями [124]). Надёжность АВЭЖ определяется, в основном, надёжностью генератора. С учётом применения бесконтактного генератора, а также крайне редкого использования, можно считать, что АВЭЖ имеет высокую надёжность и вероятность его отказа в случае использования в качестве аварийного источника электроэнергии в полёте очень мала. Масса АВЭЖ обычно меньше массы

вспомогательной силовой установки, а габариты определяются исходя из мощности электрогенератора. Кроме того, АВЭК при работе не потребляет авиационное топливо, поэтому его работа не влияет на максимальную продолжительность полёта ВС.

АВЭК в качестве аварийных источников электроэнергии в настоящее время установлены на небольшом количестве типов отечественных ВС военного и гражданского назначения. АВЭК также применяются в самолётах, предназначенных для опыления полей, так как не требуется ставить вал отбора мощности, двигатель остаётся немодифицированным, и самолёт проходит допуск к эксплуатации. АВЭК нет на турбовинтовых самолётах и вертолётах [2].

При проектировании ВС от установки АВЭК зачастую отказываются, считая, что при крайне редком использовании он будет занимать полезное пространство и увеличит массу ВС. В силу такого подхода следует проектировать АВЭК с минимально возможными массой и габаритами.

Из всех вышеперечисленных аварийных источников электроэнергии АВЭК является наиболее надёжным, простым и неприхотливым в обслуживании устройством, продолжительность работы которого ограничивается только продолжительностью полёта ВС. Использование АВЭК значительно увеличивает вероятность безопасного завершения полёта ВС в случае отказа основных источников электроэнергии, что, в совокупности с вышеперечисленными фактами, делает дальнейшее развитие АВЭК и электрогенераторов для них перспективным и востребованным.

1.2 Состояние развития авиационных ветроэнергетических комплексов

1.2.1 Состояние развития авиационных ветроэнергетических комплексов в России

В России АВЭК, называемые ветрянками, впервые были установлены в 1912 г. на самолёте «Илья Муромец» (рис. 1.1). Генераторы переменного тока (1000Гц, 2кВА) являлись не аварийными, а основными источниками электроэнергии, и питали лампы накаливания для освещения приборов внутри кабины, сигнальные огни на концах плоскостей для опознавания самолета, фары для освещения взлётно-посадочной полосы, а также электрические бомбодержатели и радиостанцию. В качестве основных источников электроэнергии такие генераторы применялись вплоть до 1926 г., после чего от ветрянок стали переходить на привод от авиадвигателя [8, 77, 79].



Рисунок 1.1 - Самолёт «Илья Муромец»

На учебно-тренировочном самолете Л-39 (СССР, 1968 г.) (рис. 3) установлен аварийный АВЭК, содержащий напорную турбину В-910, электрогенератор типа ЛУН 2117.02 и корпус, выполняющий функции рамы и концентратора воздушного потока. Электрогенератор представляет собой щеточный генератор постоянного тока мощностью 3 кВт [78, 80, 129].



Рисунок 1.2 - АВЭК с электрогенератором на Л-39

К современным ВС, оборудованным АВЭК, относится ближнемагистральный пассажирский самолёт Sukhoi SuperJet-100 (рис. 1.3).



Рисунок 1.3 - АВЭЖ с электрогенератором на самолёте Sukhoi SuperJet-100

АВЭЖ на Sukhoi SuperJet-100 (рис. 1.3) состоит из двухлопастного ветроколеса и генератора, установленных на общем валу. Ветроколесо имеет диаметр 61 см и оснащена механизмом изменения угла установки лопастей для получения постоянной скорости вращения. Генератор выдаёт трехфазное напряжение 115/200 В и частотой 400 Гц, передающееся к потребителям. Номинальная мощность аварийного генератора равна 15 кВА при скорости полета в пределах от 214 км/ч до 230 км/ч. Генератор является бесконтактным, имеет шестиполосную конструкцию, при работе охлаждается наружным воздухом через отверстия в корпусе [78, 80, 134].

Несмотря на то, что самолёт Sukhoi SuperJet-100 выпускается в России, АВЭЖ, установленный на нём, производится за границей (модель ADG 1711405A, производитель - компания Hamilton Sundstrand, США), поэтому он не является отечественной разработкой и подлежит импортозамещению согласно приказа Министерства промышленности и торговли РФ №663 от 31 марта 2015 года «Об утверждении плана мероприятий по импортозамещению в отрасли гражданского авиастроения Российской Федерации».

1.2.2 Состояние развития авиационных ветроэнергетических комплексов за рубежом

Известно, что АВЭЖ установлен на одном из первых реактивных самолётов Мессершмит «Комета» Me-163 (Германия, 1941 г.) (рис. 1.4). В носовой части обтекателя

установлен двухлопастной винт, который размещен на валу генератора. Генератор с воздушным приводом на Me-163, как и на самолёте «Илья Муромец» (рис. 1.1) используется как основной, а не как аварийный источник электроэнергии, и не убирается под фюзеляж [78, 80, 156].



Рисунок 1.4 – АВЭК на реактивном самолёте Мессершмитт Me-163

В качестве примера самолёта, оснащенного АВЭК, можно также привести дальнемагистральный авиалайнер Vickers VC10 (Англия, 1962 г.) (рис. 1.5). Этот самолёт оснащён сразу двумя АВЭК – один с гидронасосом, второй – с электрогенератором (обведен на рис. 1.5). В этом отношении данный самолёт является уникальным, так как обычно ВС оснащаются только одним АВЭК [78, 80, 160].



Рисунок 1.5 - Самолёт Vickers VC10 (Англия) с двумя АВЭК - гидравлическим (слева) и электрическим (справа)

Ещё одним примером является среднемагистральный пассажирский самолет ERJ-170 (Бразилия, 2002 г.) (рис. 1.6). На нем установлен АВЭК (производитель - компания Hamilton Sundstrand, США), аналогичный тому, что устанавливается на самолёте Sukhoi SuperJet-100 (рис. 1.3) [78, 80, 159].



Рисунок 1.6 - АВЭК на самолёте ERJ-170 (Бразилия)

На самолёте Boeing 777 установлен АВЭК, который одновременно является гидравлическим и электрическим аварийным источником. Электрогенератор и гидронасос установлены на одном валу с ветроколесом (рис. 1.7) [78, 80, 151].



Рисунок 1.7 – АВЭК на самолёте Boeing 777

Зарубежные образцы АВЭК установлены на ВС гражданского и военного назначения, а также на частных ВС (бизнес-авиация) (рис. 1.8 и 1.9) [78, 80, 153]. На рис. 1.8 представлено многообразие АВЭК зарубежного производства, однако, при внешнем сходстве они могут иметь различное назначение. Некоторые из АВЭК, представленных на рис. 1.8, оснащены электрогенератором, другие – гидронасосом (рис. 1.10).



Рисунок 1.8 – Множество АВЭК зарубежного производства

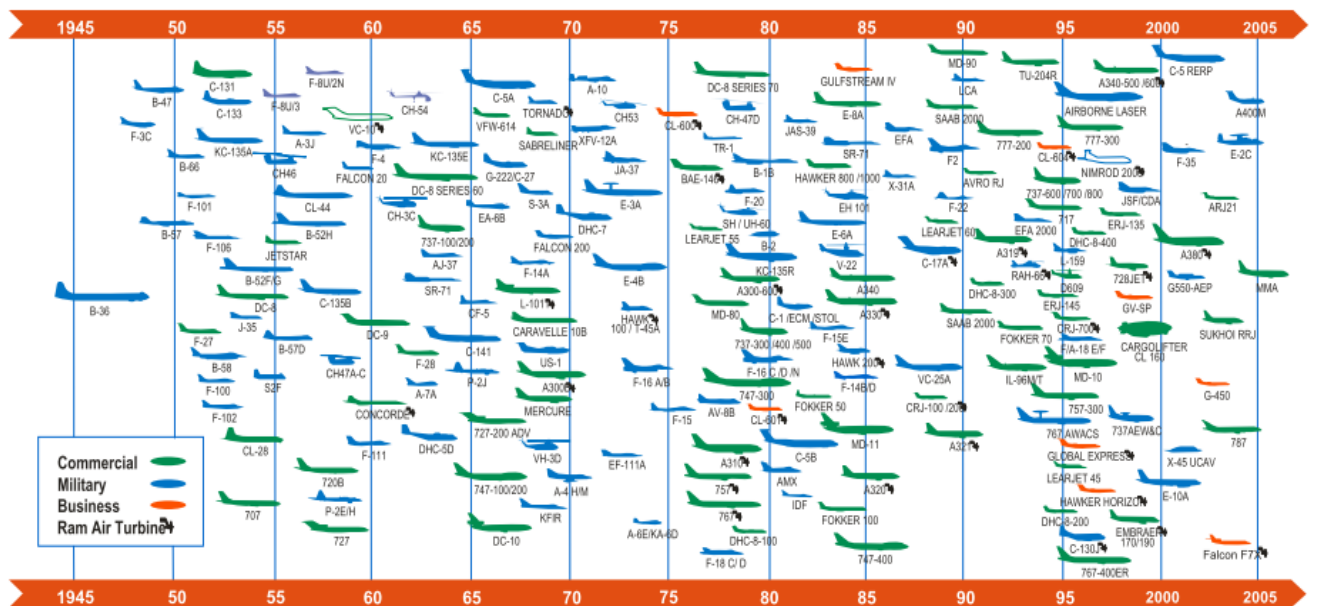


Рисунок 1.9 – Многообразие зарубежных воздушных судов с АВЭК

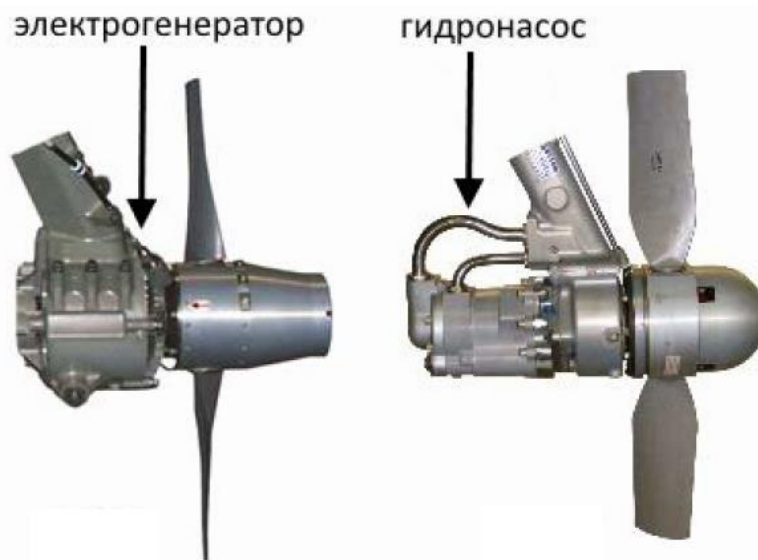


Рисунок 1.10 – Авиационные ветроэнергетические комплексы различного назначения

В данной диссертационной работе рассмотрены только АВЭК с электрогенератором. Для их обозначения за рубежом используют различные термины. Так, в США для АВЭК с электрогенератором и гидронасосом используется обобщающий термин – RAT («Ram Air Turbine» (англ.) – аварийная авиационная турбина). В Англии для обозначения АВЭК с электрогенератором используют термин ELRAT («Electric Ram Air Turbine» (англ.) – электрическая аварийная авиационная турбина), а с гидронасосом – HYRAT («Hydraulic Ram Air Turbine» (англ.) – гидравлическая аварийная авиационная турбина). На самолёте Boeing 777 источники энергии, входящие в состав аварийной авиационной турбины двойного назначения, называют «RAT Generator» (электрогенератор) и «RAT Pump» (гидронасос). Кроме того, за рубежом используется ещё один термин «Air Driven Generator» (ADG) (англ.) – генератор с воздушным приводом. Таким образом, термины «ААТ с электрогенератором», «ELRAT», «RAT Generator» и «ADG» обозначают один и тот же объект – электрогенератор с приводом от воздушной турбины, который и является авиационным ветроэнергетическим комплексом, или АВЭК [78, 80].

Проектированием и производством АВЭК за рубежом занимаются сразу несколько компаний, например Hamilton Sundstrand, Vickers, Aerojet и др. В связи с отсутствием отечественных современных образцов АВЭК на самолёте Sukhoi SuperJet-100 установлен импортный агрегат (производство компании Hamilton Sundstrand).

АВЭК используются также в качестве основных источников электроэнергии на подвесных контейнерах ВС военного назначения (рис. 1.11).



Рисунок 1.11 – Авиационный ветроэнергетический комплекс на подвесном контейнере ВС военного назначения

Оборудование, размещаемое в таких контейнерах, позволяет значительно расширить возможности ВС (например, для выполнения задач связи, радиоэлектронной разведки, радиоэлектронного противодействия и др.) без необходимости модернизации бортового оборудования. При этом АВЭК, установленный на контейнере, позволяет не увеличивать нагрузку на бортовую систему электроснабжения ВС [80].

1.3 Требования, предъявляемые к генератору авиационного ветроэнергетического комплекса в составе системы электроснабжения воздушного судна

На ВС генератор АВЭК может быть использован как основной источник электроэнергии (самолёты Илья Муромец, Me-163), или как аварийный. В любом случае он является частью системы генерирования электроэнергии в составе СЭС ВС.

В современных пассажирских ВС АВЭК используются только в качестве аварийного источника электроэнергии. Рассмотрим место АВЭК в составе СЭС самолёта Sukhoi SuperJet-100. СЭС предназначена для питания потребителей электроэнергией переменным трехфазным током напряжением 115/200 В с частотой 400 Гц и постоянным током с напряжением 28 В. СЭС переменного тока (рис. 1.12) является основной и состоит из двух независимых подсистем по правому и левому борту. Каждый двигатель приводит в действие свой привод-генератор, который обеспечивает штатную подачу электропитания переменного тока. Вспомогательная силовая установка (ВСУ) приводит в действие третий

генератор переменного тока, образуя вспомогательный источник электропитания. В систему электроснабжения переменным током также входит аварийная система электропитания, источником которой является генератор АВЭК и статический преобразователь (ИНВ), предназначенный для преобразования постоянного тока напряжением 27 В в переменный ток напряжением 115 В и частотой 400 Гц.

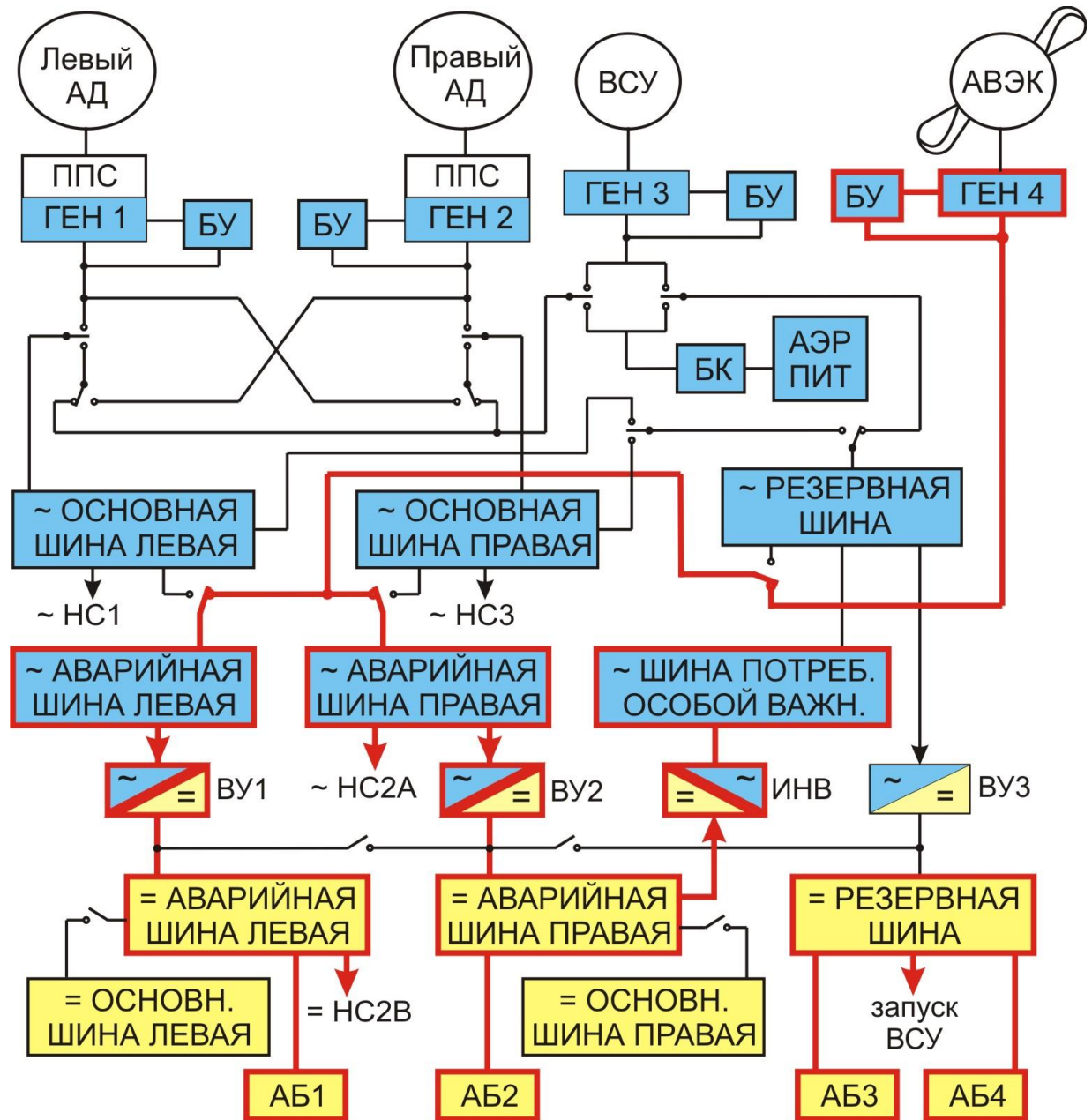


Рисунок 1.12 – Схема системы электроснабжения самолёта Sukhoi SuperJet-100

СЭС постоянного тока (рис. 1.12) является вторичной, основными источниками в ней являются выпрямительные устройства (ВУ) типа 28VS100Y-10B (27 В, 100А) (произ-

водитель – компания Champion Aerospace, США), преобразующие переменный ток в постоянный, аварийным источником являются аккумуляторные батареи ёмкостью 27Ач типа 274ch2 (производитель - компания SAFT, Франция). Во время нахождения самолёта на земле экипаж включает аккумуляторные батареи и/или наземный источник питания. После запуска двигателя или ВСУ, генераторы подключаются автоматически. В полёте электрическая система работает в автоматическом режиме.

Конструкция самолета используется как нормальный минус или нейтраль для цепей нагрузки. Характеристики основной системы электроснабжения переменного тока: 115/200 В, 400 Гц, трехфазная, тип соединения — «звезда». Нейтральная шина выведена на корпус самолёта.

Основная система электроснабжения включает в себя:

- привод-генераторы типа IDG 7554698 (2шт.) мощностью по 40 кВА (производитель - компания Hamilton Sundstrad, США), установленные на маршевых силовых установках;
- блоки управления генераторами;
- блоки трансформаторов тока, установленные на распределительных устройствах.

Вспомогательная система электроснабжения переменным током включает в себя:

- генератор ВСУ типа IDG 720845 мощностью 30 кВА (производитель - компания Hamilton Sundstrad, США), установленный на двигателе ВСУ;
- блок управления генератором ВСУ и наземным питанием;
- блок трансформаторов тока канала генератора ВСУ.

Аварийная система переменного тока, получая питание от генератора АВЭК типа ADG 1711405A (мощность 15 кВА, производитель - компания Hamilton Sundstrad, США), обеспечивает трехфазным напряжением 115/200 В, 400 Гц приёмники первой категории. До выхода генератора АВЭК на рабочий режим (в течение не более 10 секунд после выпуска), аварийным источником переменного тока является однофазный статический преобразователь - инвертор (ИНВ) типа 2D1200-1A-1011 (1,2 кВА, производитель – компания Avionic Instruments, США), преобразующий постоянный ток от аккумуляторных батарей в переменный. На рис. 1.12 красной линией обозначена часть системы электроснабжения, которая продолжает работу от генератора АВЭК при отказе двух основных генераторов и при отключенном генераторе ВСУ.

Система электроснабжения представляет собой многоуровневую систему с резервированием, включает в себя два распределительных устройства (левое и правое), работающих раздельно. В режиме нормальной эксплуатации генераторы работают раздельно – каждый для соответствующего канала переменного тока. При отказе одного генератора происходит автоматическая перекоммутация, и к шине отказавшего привод-генератора подключается работающий генератор. Для обеспечения питания электрооборудования первой и второй категории достаточно одного канала.

Генератор переменного тока ВСУ может подсоединяться к одному из каналов генерирования электроэнергии или одновременно к правому и левому каналам. После включения одного из основных генераторов на маршевой силовой установке, соответствующий канал электропитания подсоединяется к включённому генератору, а другой канал продолжает работать от генератора ВСУ или внешнего источника (до запуска основного генератора данного канала).

Количественное ограничение электрических потребителей питания от шин переменного тока имеет место при полёте с одним работающим генератором, при полёте на АВЭЖ и при полёте на аккумуляторных батареях. Стоит отметить, что одним из важнейших потребителей электроэнергии являются насосные станции переменного тока \sim НС1, \sim НС2А, \sim НС3 и насосная станция постоянного тока =НС2В (рис. 1.12), создающие давление в гидросистеме самолёта для обеспечения отклонения органов управления и поддержания управляемости самолета. В аварийном режиме работы СЭС подача электропитания осуществляется только к насосным станциям \sim НС2А и =НС2В, обеспечивающим гидропитание интерцепторов, элеронов, руля высоты, руля направления, аварийный выпуск шасси и управление поворотом колес передней опоры шасси [135].

Электроснабжение постоянного тока осуществляется от трёх выпрямительных устройств (ВУ) - левого, правого и резервного, вырабатывающих постоянный ток до 300 А, напряжением 28 В.

На самолёте установлены четыре никель-кадмиевые аккумуляторные батареи ёмкостью 27Ач и номинальным напряжением 24В. Зарядка батарей производится от шин постоянного тока. Переключатели управления батареями расположены в кабине экипажа. В штатных режимах работы СЭС аккумуляторы находятся в режиме зарядки, и их энергия не используется. При этом обеспечивается нормальное энергоснабжение всех бортовых потребителей электроэнергии. Каждый из аккумуляторов может быть отключен от шины

постоянного тока. Все аккумуляторы используются для электроснабжения систем самолёта в аварийном режиме работы при возникновении отказов или отключении источников питания основной системы постоянного тока и обеспечивают питанием в течение 30 минут наиболее необходимых для завершения полета приёмников.

Электропитание постоянного тока напряжением 28 В подаётся ко всем бортовым электронным системам от двух основных (левого и правого ВУ). Резервное ВУ находится в «горячем» резерве. При отказе одного из основных выпрямителей (левого или правого) резервное ВУ включается в работу вместо вышедшего из строя выпрямителя автоматически. При отказе любых двух выпрямителей ВУ линии питания постоянного тока перекоммутируются автоматически, при этом все потребители третьей категории отсоединяются. В этом случае все линии питания подключаются к работоспособному выпрямительному устройству. Аккумуляторы подключаются к выпрямительным устройствам параллельно [135].

Как видно из рис. 1.12, генератор АВЭЖ напрямую подключается к аварийным шинам переменного тока, поэтому требования к нему предъявляются точно такие же, как и к другим авиационным генераторам переменного тока согласно ГОСТ Р 54073-2010.

Электрические машины систем электроснабжения ВС должны удовлетворять определенным требованиям, важнейшими из которых являются: высокая надежность в работе при всех заданных условиях эксплуатации; малая масса и габариты; простота обслуживания; автономность работы; заданный срок службы; защита от радиопомех; низкая стоимость; производственные требования.

Кроме того, к специальным электрическим машинам предъявляется ряд дополнительных требований, обусловленных спецификой работы и определяемых техническими требованиями, нормами и ГОСТами. Например, важнейшими дополнительными требованиями для авиационных генераторов являются: синусоидальность кривой фазного и линейного напряжений, симметрия напряжений для трехфазных генераторов при несимметрии нагрузки, малый небаланс напряжений, высокая перегрузочная способность, малое время переходных процессов. Выполнение этих требований обеспечивается соответствующими значениями параметров генераторов, которые должны быть выдержаны в процессе проектирования и изготовления.

Требования к параметрам авиационных генераторов достаточно жесткие и выполнение их связано с рядом конструктивных и технологических трудностей. Требование си-

нусоидальности кривой напряжения достигается путем уменьшения обмоточных коэффициентов для высших гармоник (при этом уменьшается и обмоточный коэффициент основной гармоники и растут размеры генераторов); выбора профиля воздушного зазора, применения специальных обмоток, например, четырехслойных, что усложняет технологию и ухудшает использование. Длительная работа трехфазных генераторов при несимметричной нагрузке допускается, если токи в фазах не превышают номинального тока фазы, а их разность составляет не более 10—20%.

Особенности проектирования электрических машин переменного тока для СЭС ВС определяются рядом факторов: назначением, условиями применения, техническими требованиями, технологическими и экономическими факторами. Назначение и условия применения определяют выбор типа машин, конструкции и системы охлаждения.

Важнейшими задачами, тесно связанными между собой в области проектирования генераторов для СЭС ВС, являются: увеличение надежности при всех условиях эксплуатации, уменьшение массы машин и всего электрооборудования, увеличение срока службы. В целях увеличения надежности электрические машины, как правило, выполняются бесконтактными. Требования обеспечения заданного теплового режима генераторов и малой массы определяют выбор соответствующей системы охлаждения, конструкционных, магнитных и изоляционных материалов. Характерной особенностью проектирования является системный подход.

При оптимизации электрических машин рассматриваются характеристики системы в целом, а не одной машины. Так, например, при проектировании генераторов характеристики массы рассматриваются для всей генераторной установки в целом: генератора, регулятора и других элементов системы, в рассматриваемом случае – для всего АВЭК.

Для обеспечения характеристик системы электроснабжения, заданных техническими условиями, требуется, чтобы электрические генераторы имели определенные параметры. Так, например, заданная перегрузочная способность генераторов определяет выбор величины воздушного зазора, кратности тока короткого замыкания, электромагнитных нагрузок. Заданная величина пульсаций выпрямленного напряжения для вентильных генераторов определяет выбор числа фаз, схем выпрямления, числа полюсов индуктора, числа витков в фазе, демпферной клетки с определенными параметрами.

Согласно ГОСТ Р 54073-2010 первичные и вторичные источники переменного трёхфазного тока постоянной частоты 400 Гц должны удовлетворять следующим требованиям:

- фазное напряжение: от 108 до 118 В;
- небаланс напряжений: не более 3 В;
- модуляция напряжения: не более 2,5 В;
- сдвиг фазных напряжений: от 116° до 124°;
- коэффициент искажения для первичных источников питания при линейной симметричной нагрузке: не более 0,05;
- коэффициент искажения для первичных и вторичных источников питания при наличии нелинейной, несимметричной и импульсно-периодической нагрузке: не более 0,08;
- коэффициент амплитуды: от 1,31 до 1,51;
- составляющая напряжения постоянного тока: от +0,1 до -0,1;
- частота: от 380 до 420 Гц;
- модуляция частоты: 4 Гц.

Первичные и вторичные источники постоянного тока 27 В в нормальном режиме работы должны удовлетворять следующим требованиям:

- напряжение: от 24 до 29,4 В;
- амплитуда пульсаций напряжения: не более 0,2 В.

Для генераторов автономных систем электроснабжения характерным является разнообразие применяемых магнитных систем и конструкций, что объясняется разнообразием областей применения и технических требований. Каждая из магнитных систем и конструкций рассматриваемых машин требует индивидуального подхода к проектированию и соответствующих методик расчета [5, с. 20].

1.4 Критический анализ существующих конструкций авиационных ветроэнергетических комплексов. Обоснование конструкции перспективного авиационного ветроэнергетического комплекса

Рассмотренные устаревшие отечественные образцы АВЭК имеют схожую конструкцию – корпус в виде тонкостенного полого цилиндра, внутри которого соосно расположен электрогенератор с закрепленным на его валу ветроколесом. Эти АВЭК оснащены щёточными генераторами постоянного тока, которые, как известно, обладают рядом недостатком, свойственных контактными электрическим машинам: искрение щеток, переходящее в круговой огонь из-за неравномерного их износа, вибрация щеток, их

заклинивание и др. Более 40% отказов вращающихся контактных машин приходится на щеточно-коллекторный узел. Анализ этих конструкций показал, что они обладают низкими массогабаритными показателями, сравнительно небольшой мощностью и низкой надёжностью. Учитывая, что со времени выпуска представленных АВЭК (60-е - 70-е годы XX века) появились новые материалы, на основе которых возможно создать АВЭК с более высокими массогабаритными показателями, использование таких конструкций на современных ВС в неизменном виде нецелесообразно, поэтому они не могут быть рассмотрены в качестве прототипа для перспективного авиационного ветроэнергетического комплекса.

Из существующих АВЭК наибольший интерес представляют собой самые современные образцы, так как они воплощают в себе передовые разработки и построены с использованием современных материалов. Современные АВЭК представлены только зарубежными образцами, так как в России подобные устройства на сегодняшний день не выпускаются.

АВЭК, устанавливаемый на Boeing 777, имеет недостаточно высокие массогабаритные показатели в качестве источника электроэнергии из-за того, что кроме генератора, ветроколесо вращает ещё и гидронасос. Резервирование гидросистемы не относится к области исследований данной диссертационной работы, поэтому такой АВЭК здесь не рассматривается.

Из проведенного анализа современных образцов АВЭК наиболее распространенной моделью является модель ADG 1711405A и аналогичные ей, устанавливаемые на самолётах SuperJet-100, CRJ-100, CRJ-200, CRJ-900 и др. Поэтому именно этот АВЭК был выбран в качестве основы для проектирования нового агрегата. Он содержит двухлопастное ветроколесо пропеллерного типа и бесконтактный синхронный трёхфазный генератор переменного тока радиального (цилиндрического) исполнения мощностью 15 кВА номинальным напряжением 115/200 В частотой 400 Гц. Он выполнен с использованием современных материалов, обладает высокой надёжностью, более высокими массогабаритными показателями по сравнению с показателями щеточных генераторов.

Модель ADG 1711405A оснащена генераторной установкой, содержащей подвозбудитель с возбуждением от ПМ, возбудитель и основной генератор. Такая схема типична для генераторов, используемых в качестве основных источников электроэнергии в СЭС ВС. Однако, для аварийного источника электроэнергии, используемого крайне редко, это

нецелесообразно, так как массогабаритные показатели такой генераторной установки являются недостаточно высокими. Поэтому для перспективного АВЭК выбран генератор с возбуждением от ПМ. Использование одной ЭМ вместо трёх позволит снизить массу генератора для АВЭК.

При проектировании электрогенератора для АВЭК важное значение имеют не только мощность и массогабаритные характеристики, но и геометрическая форма, которая должна обеспечивать хорошую аэродинамику. В связи с этим, при заданных массе и габаритах, а также с учетом целесообразности создания АВЭК обтекаемой формы, преимущества генератора радиального исполнения не очевидны и зависят от выбранного критерия (масса, габариты, стоимость, сложность изготовления). При заданной мощности генератора, работающего в составе системы электроснабжения ВС масса и габариты являются наиболее приоритетными показателями, по сравнению со стоимостью и сложностью изготовления.

Исходя из разнообразия критериев оптимальности при оценке показателей электрогенераторов АВЭК, следует, что для системы электроснабжения ВС электрогенератор должен обладать параметрами, которые обеспечивали бы наилучшие массогабаритные показатели для АВЭК и требуемые энергетические показатели для аварийной системы электроснабжения ВС.

Таким образом, существующие образцы АВЭК имеют ряд недостатков, наличие которых препятствует их развитию. Поэтому необходимо искать новые технические решения, которые позволят устранить существующие недостатки и расширить область применения АВЭК на ВС.

Для выбора конструктивного исполнения перспективного АВЭК рассмотрим современный АВЭК, представленный на рис. 1.13 [134]. Он оснащен двухлопастным ветроколесом пропеллерного типа. Механическая система поворота лопастей поддерживает обороты ветроколеса в диапазоне от 4800 до 6500 об/мин. После выпуска такого АВЭК в набегающий воздушный поток, он уже не может быть убран под фюзеляж в полёте. Стоит отметить, что согласно инструкции по лётной эксплуатации самолёта Sukhoi SuperJet-100, после выпуска АВЭК в набегающий воздушный поток, экипаж должен строго выдерживать скорость полёта ВС в диапазоне от 214 км/ч до 230 км/ч, иначе параметры электроэнергии, вырабатываемой генератором АВЭК, могут выйти за допустимые пределы.



Рисунок 1.13 - Двухлопастный АВЭК пропеллерного типа

Конструктивное исполнение генератора во многом определяет форму и массогабаритные показатели всего АВЭК. Поэтому рассмотрим в осях x , y , z (рис. 1.14) габаритные размеры АВЭК с генераторами различного конструктивного исполнения – радиальным, коническим и аксиальным (рис. 1.15).

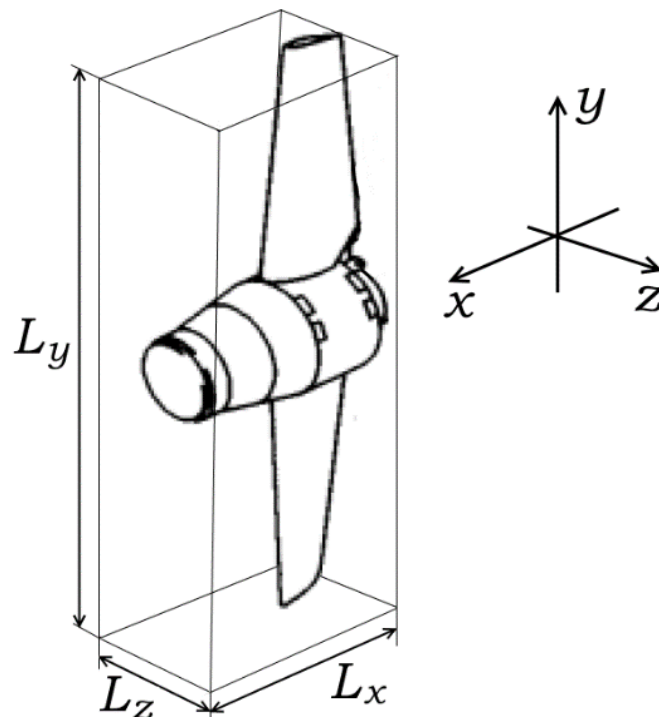


Рисунок 1.14 - АВЭК пропеллерного типа в трёхмерной системе координат

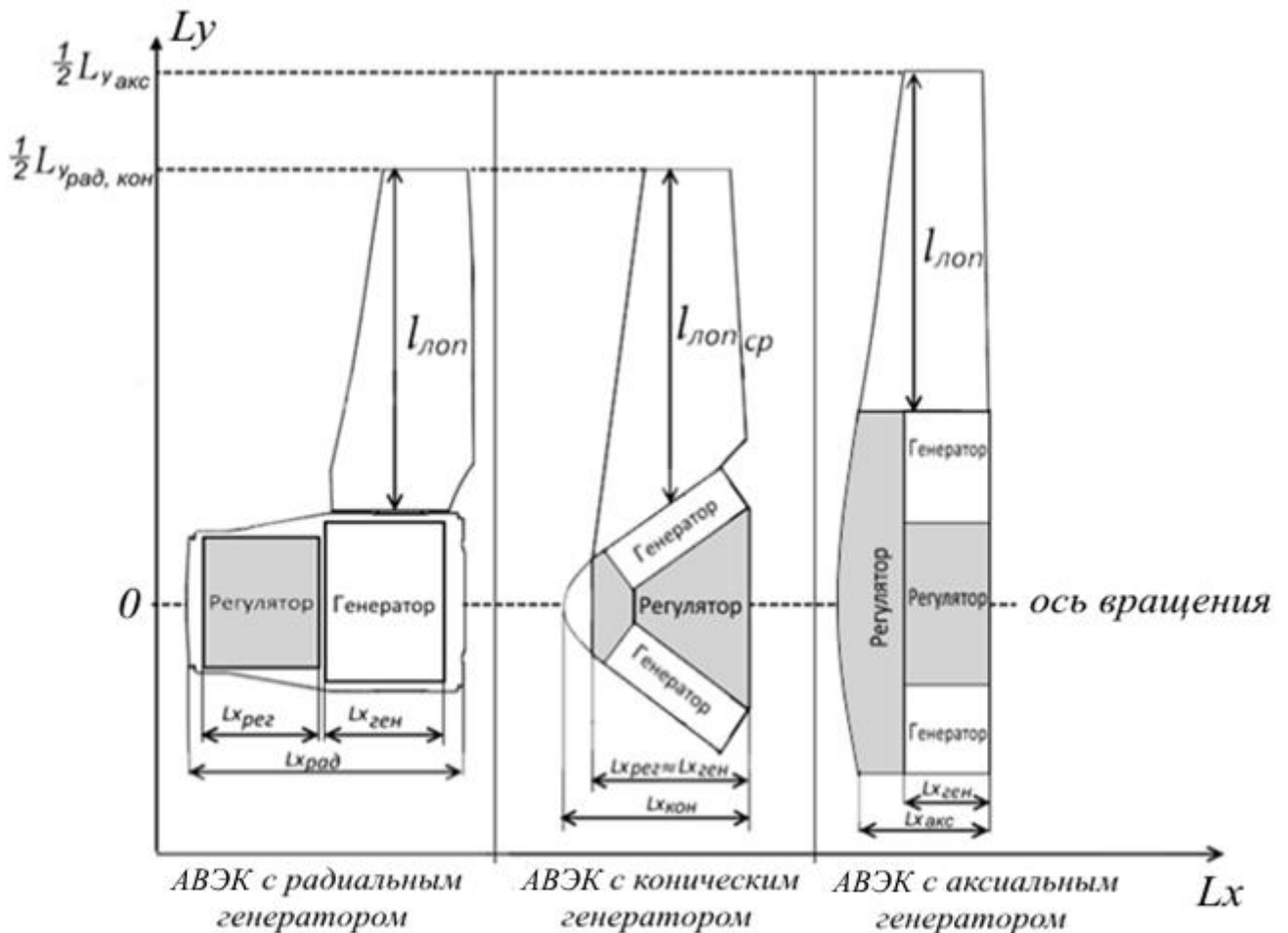


Рисунок 1.15 - Габаритные размеры L_y и L_x АВЭК с генераторами различного конструктивного исполнения – радиальным, коническим и аксиальным

При радиальной конструкции ЭМ регулятор располагается рядом с генератором, поэтому габаритный размер L_x складывается из габаритных размеров генератора и регулятора угла поворота лопастей:

$$L_x = L_{x_{ген}} + L_{x_{рег}} \quad (1.1)$$

По этой причине АВЭК с радиальным электрогенератором будет иметь наибольший габаритный размер L_x .

Габаритный размер L_y будет складываться из габаритного размера генератора и длины лопастей с обеих сторон:

$$L_y = L_{y_{ген}} + 2 \cdot l_{лоп} \quad (1.2)$$

Диаметр генератора $L_{y_{ген}}$ при радиальной конструкции будет наименьшим из всех возможных форм генератора определенной мощности.

Размер L_z всего АВЭК при радиальном исполнении генератора будет равен диаметру генератора, то есть:

$$L_z = L_{z_{ген}} = L_{y_{ген}} \quad (1.3)$$

Из вышесказанного следует, что радиальная форма по сравнению с другими формами имеет наибольший размер L_x за счёт расположения регулятора угла поворота лопастей и самого генератора рядом, на одной оси.

При аксиальной конструкции габаритный размер всего АВЭК L_y так же будет складываться из диаметра генератора и размеров лопастей:

$$L_y = L_{y_{ген}} + 2 \cdot l_{лон} \quad (1.4)$$

Габаритный размер L_x будет зависеть от расположения регулятора угла поворота лопастей и размеров корпуса, в котором будет размещаться регулятор.

Габаритный размер L_z всего АВЭК при аксиальном исполнении генератора будет равен диаметру генератора, то есть

$$L_z = L_{y_{ген}}. \quad (1.5)$$

Из вышесказанного следует, что аксиальная конструкция генератора при заданной мощности имеет наибольший размер $L_{y_{ген}}$, поэтому размер L_y всего АВЭК с генератором будет иметь наибольший размер.

При коническом исполнении ЭМ лопасти можно разместить прямо на внешней поверхности внешнего ротора, поэтому габаритный размер L_y будет определяться в основном лишь размером лопастей:

$$L_y = 2 \cdot l_{лон} \quad (1.6)$$

Ещё одним преимуществом конической формы является наличие свободного пространства внутри статора, которое позволяет разместить регулятор поворота лопастей без увеличения габаритных размеров всего устройства. Поэтому габаритный размер L_x будет определяться только размером генератора:

$$L_x = L_{x_{ген}} \quad (1.7)$$

Габаритный размер L_z будет определяться диаметром генератора:

$$L_z = L_{z_{ген}} = L_{y_{ген}} \quad (1.8)$$

Если сравнивать габаритные размеры различных форм исполнения – радиальной, аксиальной и конической, то получаем следующие результаты:

$$L_{x_{акс}} \approx L_{x_{кон}} < L_{x_{рад}} \quad (1.9)$$

$$L_{y_{рад}} \approx L_{y_{кон}} < L_{y_{акс}} \quad (1.10)$$

$$L_{z_{рад}} < L_{z_{кон}} < L_{z_{акс}} \quad (1.11)$$

Как видно, при одинаковой мощности коническая форма имеет средние показатели по всем габаритным размерам. Поэтому по совокупности габаритных размеров эта конструкция является наиболее оптимальной.

Таким образом, габаритные размеры представленных на рис. 1.15 АВЭК соотносятся следующим образом:

- габаритный размер Lx :

$$Lx_{рад} > Lx_{кон} > Lx_{акс} \quad (1.12)$$

- габаритный размер Ly :

$$Ly_{рад} = Ly_{кон} < Ly_{акс} \quad (1.13)$$

Для АВЭК с коническим генератором возможно совмещение конического обтекателя со ступицей, на которой закреплены лопасти. Для АВЭК с радиальным и аксиальным генератором обтекатель должен располагаться рядом с генератором, при этом габаритный размер Lx будет увеличен.

Таким образом, для сравнения массогабаритных показателей АВЭК с генераторами различной формы необходимо исследовать все представленные на рис. 1.15 конструкции.

1.5 Постановка задачи исследования

Учитывая вышесказанное, определим рамки исследования:

1. Параметры электроэнергии, вырабатываемой генератором проектируемого АВЭК, должны удовлетворять требованиям ГОСТ Р 54073-2010. Работа всей аварийной системы электроснабжения в данной работе не рассматривается;
2. Генератор переменного тока для АВЭК должен иметь мощность 15 кВА;
3. В качестве генератора для АВЭК в данной работе рассматривается только бесконтактный генератор с возбуждением от постоянных магнитов;
4. Переходные процессы в АВЭК в данной работе не рассматриваются;
5. Проектирование АВЭК в данной работе не затрагивает расчёта регулятора угла установки лопастей, узлов и деталей (вала, подшипников и т.д.).

Исходя из цели работы, а также изложенных выше рамок исследования, определим следующие задачи исследования данной работы:

1. Разработать конструкцию перспективного АВЭК;
2. Разработать методику проектирования АВЭК с генераторами различной формы;
4. Разработать методику массогабаритной оптимизации АВЭК;
5. Провести сравнительный анализ массогабаритных показателей проектируемого АВЭК и существующих аналогов.

ГЛАВА 2 РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ ПЕРСПЕКТИВНОГО АВИАЦИОННОГО ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

2.1 Анализ структурной схемы аварийной системы электроснабжения и особенностей конструкции авиационного ветроэнергетического комплекса

Для реализации программы импортозамещения СЭС самолёта Sukhoi SuperJet-100 необходимо использовать отечественные агрегаты, которые по своим характеристикам не уступают импортным аналогам. В результате проведенного обзора и анализа предлагается выполнить импортозамещение агрегатов СЭС в соответствии с табл. 2.1.

Таблица 2.1 - Отечественные агрегаты, подходящие для импортозамещения зарубежных агрегатов СЭС самолёта Sukhoi SuperJet-100

№ п/п	Название агрегата	Тип импортного агрегата	Параметры импортного агрегата	Тип отечественного агрегата	Параметры отечественного агрегата
1	Основной генератор	IDG 7554698 series	40 кВА, 12000 об/мин	ГП-25	60 кВА, 12000 об/мин
				ГТ40ПЧ8Б	40 кВА, 8000 об/мин
2	Генератор ВСУ	IDG 720845 series	30 кВА, 12000 об/мин	ГТ30ПЧ12	30 кВА, 12000 об/мин
3	Аккумуляторная батарея	274ch2	27 А·ч, 25,4 кг	20НКБН25	25 А·ч, 25,0 кг
				20НКБН28	28 А·ч, 29,5 кг
4	Выпрямительное устройство	28VS100Y-10B	27В, 100А	ВУ-7,5	27В, 300А
5	Инвертор	2D1200-1A-1011	1,2 кВА	ПТС-800БМВ	0,8 кВА
6	АВЭК	ADG 1711405A	15 кВА	---	---

Как видно из табл. 2.1, для некоторых импортных агрегатов нет отечественных аналогов с полностью идентичными параметрами, поэтому необходимо выбирать агрегаты из существующих образцов или проектировать новые. Так, например, в качестве основных целесообразно использовать привод-генераторы большей мощности на 60 кВА, так как существующие отечественные привод-генераторы на 40 кВА рассчитаны на меньшую частоту вращения (8000 об/мин). Это позволит повысить мощность бортовой сети, что будет способствовать дальнейшему развитию и модернизации бортового оборудования.

Замена выпрямительного устройства 28VS100Y-10В на отечественное ВУ-7,5 (производимое в «Уфимском агрегатном производственном объединении» («УАПО»), г. УФА, входящем в состав холдинга «Технодинамика»), обладающего втрое большей мощностью, позволит повысить мощность СЭС постоянного тока и обеспечить более надежную работу аварийной СЭС с учетом предложенной замены насосной станции переменного тока на насосную станцию постоянного тока. При этом, учитывая повышенную мощность, вместо трех возможно использовать два ВУ, так как даже в этом случае общая мощность СЭС постоянного тока будет выше в два раза (27 В, 600 А), чем в настоящее время (27 В, 300 А). При этом схема СЭС может иметь вид, представленный на рис. 2.1.

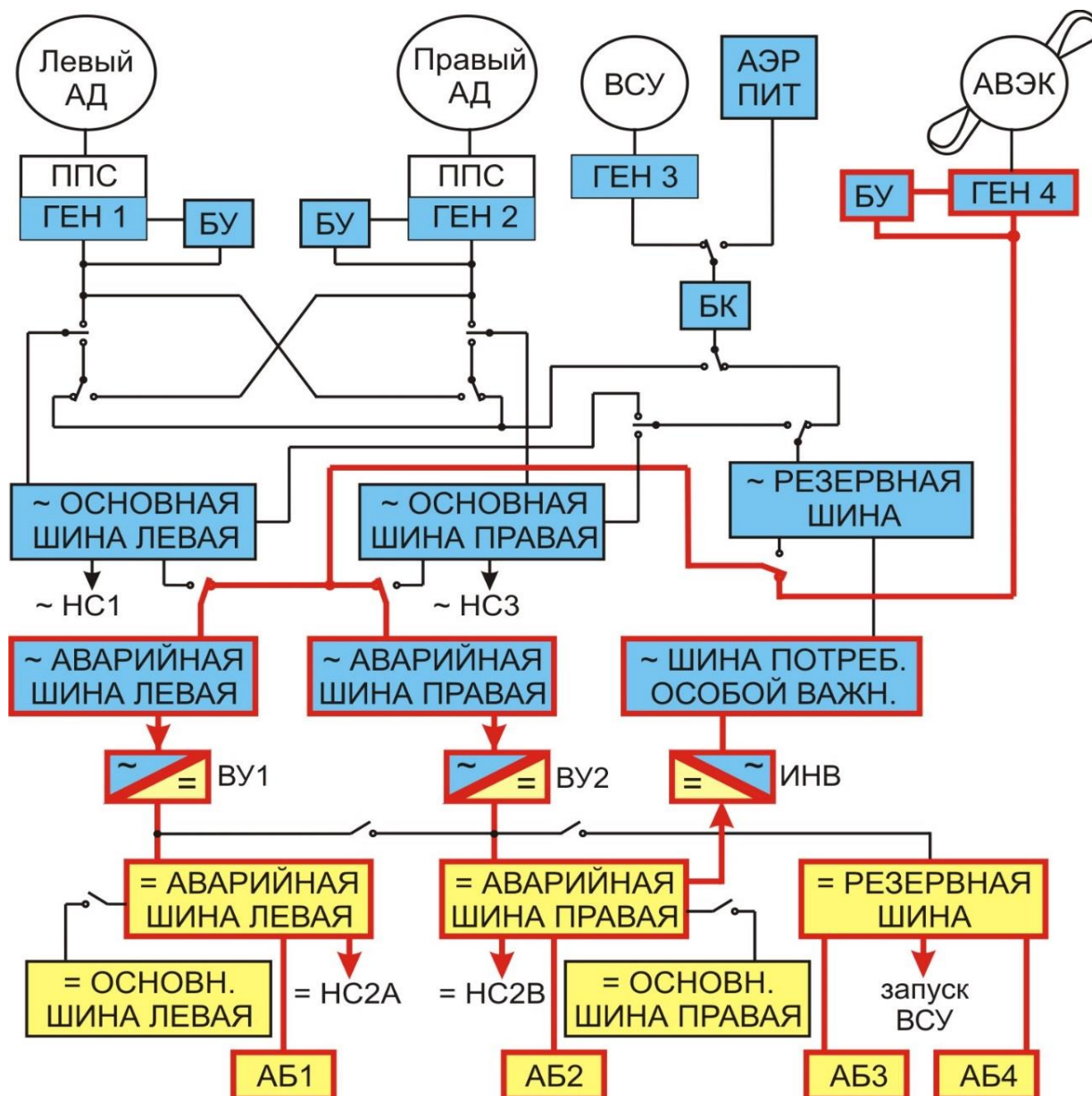


Рисунок 2.1 – Схема СЭС с двумя выпрямительными устройствами

Мощность указанного отечественного инвертора ПТС-800БМВ (0,8 кВА) («УАПО», «Технодинамика») меньше, чем у импортного аналога типа 2D1200-1A-1011 (1,2 кВА). Однако, стоит отметить, что в инверторе ПТС-800БМВ использован принцип двойного преобразования, позволяющий заметно улучшить массогабаритные показатели изделия и поднять КПД. За счёт этого современный инвертор ПТС-800БМВ в два раза превосходит по массе устаревший отечественный аналог ПТС-800БМ той же мощности (7 кг вместо 15 кг). Поэтому, при необходимости возможно разработать новый отечественный инвертор большей мощности при небольшом увеличении массы.

Из табл. 2.1 также видно, что нет отечественного аналога для АВЭК, поэтому его импортозамещение возможно только путем проектирования и производства нового агрегата.

В АВЭК привод генератора осуществляется от ветроколеса, вращающегося под воздействием набегающего воздушного потока, и не требует сжигания топлива или расходования каких-либо ресурсов (самолёт может лететь (планировать) с выключенными (отказавшими) двигателями и АВЭК при этом будет работать [124]).

Для создания перспективного АВЭК необходимо выделить основные конструктивные элементы и продумать компоновку таким образом, чтобы их взаимное расположение было наиболее оптимальным с точки зрения занимаемого пространства. Конструкция АВЭК должна быть достаточно простой, надёжной и, вместе с тем, должна обеспечивать улучшение массогабаритных показателей.

АВЭК, установленный на самолёте Sukhoi SuperJet-100, содержит следующие основные части:

- ветроколесо с лопастями;
- электрогенератор;
- регулятор угла установки лопастей (для регулирования частоты вращения ротора генератора);
- крепежное устройство (штанга или рама).

Ветроколесо с лопастями является неотъемлемой частью АВЭК, обеспечивающей первичное преобразование энергии – кинетической энергии набегающего воздушного потока во вращательную энергию ротора. В настоящее время на АВЭК используется ветроколесо пропеллерного типа. Однако, форма ветроколеса может быть различной. Учиты-

вая, что её выбор необходимо производить на основе результатов аэродинамических исследований, которые выходят за рамки данного диссертационного исследования, для определенности выберем в качестве прототипа ветроколесо пропеллерного типа с двумя лопастями, как и в современных зарубежных аналогах.

Необходимо так же отметить тот факт, что генератор АВЭК непрерывно работает в переходном режиме, так как во время полёта ВС на лопасти АВЭК непрерывно воздействует возмущенный воздушный поток, вследствие чего частота вращения ротора не является постоянной величиной, а непрерывно изменяется (колеблется). Регулятор угла поворота лопастей в силу недостаточного быстродействия не способен стабилизировать частоту вращения ротора, а способен лишь ограничить диапазон её изменения. Необходимость стабилизации частоты переменного тока в генераторе АВЭК накладывает жесткие ограничения на пилотирование ВС с выпущенным АВЭК. Эти требования достаточно сложно соблюдать, учитывая, что АВЭК применяется при возникновении на борту чрезвычайной ситуации. Для устранения этого недостатка целесообразно устранить зависимость потребителей первой категории от величины частоты переменного тока.

Для отказа от необходимости стабилизации частоты переменного тока в генераторе АВЭК и устранения недостатка, связанного с ограничением скорости полета ВС в узком диапазоне, необходимо заменить наиболее мощные аварийные потребители переменного трёхфазного тока, на аналогичные агрегаты с питанием от постоянного тока (если это возможно). При этом отпадает необходимость в точной стабилизации частоты вращения ротора, однако, при этом возникает необходимость в наличии выпрямителя с силовыми вентилями. При мощности генератора 15 кВА в каждой из трёх фаз при напряжении 27 В выпрямители должны коммутировать около 150 А нагрузки. При этом они могут иметь значительную массу, что может привести к ухудшению массогабаритных показателей предлагаемой аварийной СЭС.

Во избежание этих негативных последствий целесообразно использовать выпрямительные устройства, уже имеющиеся в составе СЭС самолёта (рис. 1.12). Необходимо отметить, что потребители первой категории (например, радиостанция, навигационная система, бортовой самописец и др.) согласно их паспортных данных, сохраняют работоспособность при падении напряжения постоянного тока вплоть до 18,5 В, поэтому в аварийном режиме работы СЭС диапазон допустимых значений напряжения постоянного тока составляет от 18,5 до 29,4 В. Это позволяет снизить требования к точности стабилизации

частоты электроэнергии переменного тока, вырабатываемой генератором АВЭК, и перейти к точному регулированию только одного показателя - уровня напряжения, что, в свою очередь, позволяет расширить диапазон допустимой частоты вращения ротора АВЭК и, тем самым, облегчить условия пилотирования самолёта в аварийной ситуации (расширить диапазон требуемой скорости полёта).

Электрогенераторы существующих АВЭК имеют радиальную конструкцию с внутренним ротором, то есть когда ротор расположен внутри статора [17, 102, 103, 142, 147, 152, 157, 159, 162]. При этом статор необходимо закреплять в корпусе, способном выдерживать вес всего АВЭК. Это приводит к увеличению полной массы АВЭК.

В то же время, некоторые электрогенераторы существующих ветроэнергетических комплексов наземного использования имеют аксиальную конструкцию [16, 19, 24, 27, 28, 30, 33, 45, 57, 58, 60, 67, 69, 71, 102, 104, 115]. Однако, аксиальные ЭМ имеют недостатки, связанные с перекосом диска ротора при его вращении вследствие возникновения сил тяжения между ротором и статором, а также вследствие износа упорных подшипников. Для исключения этого фактора возможно увеличить воздушный зазор, однако, это приведет к ухудшению массогабаритных показателей генератора и всего АВЭК. Поэтому использовать аксиальную ЭМ в качестве аварийного генератора системы электроснабжения ВС нецелесообразно.

Конические ЭМ также подвержены влиянию сил тяжения между ротором и статором, однако, это влияние проявляется меньше, чем в аксиальных ЭМ. Кроме того, по сравнению с генератором с внутренним ротором, генератор с внешним ротором позволяет отказаться от использования внешнего корпуса для крепления статора. Таким образом, совмещение конической ступицы с коническим ротором позволит с одной стороны, максимально эффективно использовать внутреннее пространство АВЭК, а с другой стороны, улучшить массогабаритные показатели АВЭК за счёт снижения веса крепежного устройства.

Таким образом, улучшение массогабаритных показателей существующих АВЭК предлагается достичь следующим образом:

1. Ветроколесо должно иметь коническую ступицу;
2. В качестве электрогенератора АВЭК необходимо использовать вентильный генератор с возбуждением от постоянных магнитов;
3. Электрогенератор должен иметь магнитную систему конической формы;
4. Электрогенератор должен иметь внешний ротор.

2.2 Разработка и описание конструкции перспективного авиационного ветроэнергетического комплекса

АВЭЖ относится к электромеханическим преобразователям энергии, и может быть использован в качестве преобразователя кинетической энергии воздушного потока в электрическую энергию.

Известен аварийный генератор с воздушным приводом Air-Driven Generator (модель ADG 1711405A), устанавливаемый на самолёте Sukhoi SuperJet-100, и содержащий штангу, автоматический регулятор частоты вращения, двухлопастное ветроколесо диаметром 24-дюйма, которое приводит в действие трехфазный бесщеточный генератор переменного тока мощностью 15 кВА, напряжением 115 В с частотой 400 Гц [134]. Однако, этот генератор имеет недостаточно высокие массогабаритные показатели из-за того, что входящие в его состав регулятор угла установки лопастей и электрогенератор радиальной конструкции расположены на одной оси рядом друг с другом.

Задачей разработки нового устройства является расширение области применения авиационного ветроэнергетического комплекса за счет улучшения его массогабаритных показателей.

Технический результат разработки нового устройства – улучшение массогабаритных показателей, повышение жесткости конструкции и надёжности работы.

Технический результат достигается тем, что разрабатываемый перспективный АВЭЖ содержит внутренний неподвижный статор и наружный вращающийся ротор с постоянными магнитами, обтекатель, ступицу, лопасти, регулятор напряжения. Основание внутреннего статора выполняется в форме неподвижной платформы, жестко закрепленной на штанге-держателе, а боковая поверхность внутреннего статора образуется наружной стороной магнитопровода якоря с пазами, в которые уложена многофазная обмотка якоря. Магнитопровод якоря одной торцевой стороной жестко закрепляется на неподвижной платформе, на которой установлен регулятор напряжения. На противоположной торцевой стороне магнитопровода якоря устанавливается передний подшипник, во внутреннее кольцо которого устанавливается шайба, жестко связанная с валом. Обтекатель устанавливается в передней части ступицы, в которой выполнены вентиляционные отверстия, расположенные вокруг обтекателя по окружности с центром на оси симметрии ротора. Магнитопровод индуктора с постоянными магнитами жестко закрепляется на внутренней

поверхности ступицы. Наружный ротор жестко закрепляется на вращающейся оси, устанавливаемой в переднем и заднем подшипниках, задний подшипник устанавливается в центре неподвижной платформы и закрепляется от перемещения в осевом направлении упорной шайбой [70].

Улучшение массогабаритных показателей достигается путем уменьшения массы, а также осевых и диаметральных размеров АВЭК за счет выполнения статора, магнитопровода якоря и ротора в форме усеченного конуса, выполнением боковой поверхности ротора с лопастями, имеющими винтообразную форму, жестким закреплением постоянных магнитов индуктора на внутренней поверхности ротора.

Выполнение статора, магнитопровода якоря и ротора в форме усеченного конуса, выполнение боковой поверхности ротора с лопастями, имеющими винтообразную форму, позволяет не устанавливать ветроколесо (или напорную турбину) в виде отдельного агрегата для приведения ротора во вращение. В связи с этим, осевые и диаметральные размеры всего АВЭК в целом уменьшаются, что приводит к улучшению его массогабаритных показателей.

Повышение коэффициента полезного действия (КПД) АВЭК достигается путем снижения потерь энергии при преобразовании механической энергии (например, энергии набегающего воздушного потока или энергии ветра) в электрическую энергию переменного тока за счет выполнения статора, магнитопровода якоря и ротора в форме усеченного конуса, выполнения боковой поверхности ротора с лопастями, имеющими винтообразную форму, выполнения передней части ротора с обтекателем и вентиляционными отверстиями, расположенными вокруг обтекателя по окружности с центром на оси симметрии ротора. Вследствие выполнения ротора в форме усеченного конуса, а передней части ротора – с обтекателем и вентиляционными отверстиями, лобовое сопротивление ротора набегающему воздушному потоку уменьшается. Вентиляционные отверстия препятствуют перегреву электрогенератора, что повышает его КПД [70].

Повышение КПД АВЭК достигается также путем повышения его чувствительности к скорости набегающего воздушного потока (уменьшение минимально необходимой скорости набегающего воздушного потока для генерирования напряжения необходимого уровня) за счет выполнения внешней поверхности ротора с лопастями, имеющими винтообразную форму, а передней части ротора – с обтекателем и вентиляционными отверстиями.

Упрощение конструкции АВЭК достигается выполнением основания статора в форме неподвижной платформы, жестко закрепленной на штанге-держателе, жестким закреплением на неподвижной платформе регулятора напряжения и магнитопровода якоря, в пазы которого уложена многофазная обмотка якоря, закреплением магнитопровода якоря одной торцевой стороной на неподвижной платформе, выполнением ротора в форме усеченного конуса, выполнением боковой поверхности ротора с лопастями, имеющими винтообразную форму. Описанная конструкция обеспечивает возможность жесткого закрепления всех элементов ротора на оси вне корпуса (статора). Собранный таким образом вне корпуса (статора) ротор целиком устанавливается в корпус (статор) и закрепляется в нем, при этом исключается необходимость сборки ротора (закрепления на нем постоянных магнитов индуктора) внутри корпуса (статора), что существенно упрощает процесс сборки АВЭК, упрощая технологию её изготовления.

Повышение надежности конструкции достигается за счет повышения ее жесткости путем выполнения ротора, ступицы и лопастей ветроколеса единым агрегатом: выполнением боковой поверхности ротора с лопастями винтообразной формы, а передней части ротора – с обтекателем, жестким закреплением ротора на вращающейся оси, устанавливаемой в переднем и заднем подшипниковых узлах. Кроме того, повышение жесткости конструкции достигается за счет выполнения механического соединения всех элементов ротора (постоянных магнитов индуктора, корпуса ротора с лопастями и обтекателем) между собой.

Повышение надежности достигается также закреплением заднего подшипникового узла, установленного в платформе, с помощью упорной шайбы, предотвращающей его перемещение в осевом направлении.

Общий вид разработанного вышеописанным способом перспективного АВЭК представлен на рис. 2.2 [70], электрическая схема АВЭК представлена на рис. 2.3 [70], электрическая схема преобразователя напряжения представлена на рис. 2.4 [95].

Перспективный АВЭК (рис. 2.2) содержит: ступицу 1, лопасти 2, магнитопровод 3 индуктора, постоянный многополюсный магнит 4 индуктора, вентиляционные отверстия 5, обтекатель 6, вал 7, шайбу 8, подшипники 9 и 13, трёхфазную обмотку якоря 10, магнитопровод якоря 11, преобразователь напряжения 12, шайбу 14, неподвижную платформу 15, штангу-держатель 16, регулятор угла установки лопастей 17 [70].

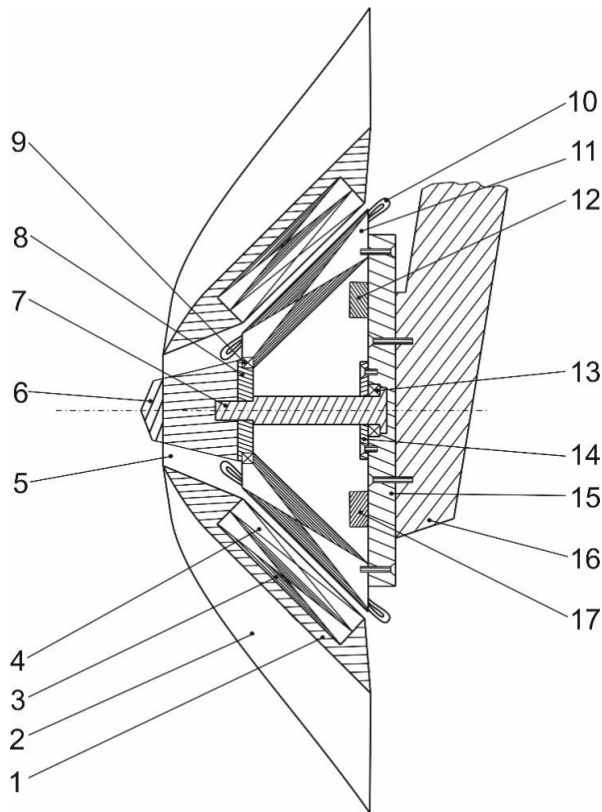


Рисунок 2.2 – Общий вид перспективного АВЭК

Ступица 1 имеет коническую форму. Лопасты 2 имеют винтообразную форму и закрепляются на ступице 1. Магнитопровод 3 индуктора, постоянные магниты 4 и магнитопровод 11 якоря выполняются коническими.

Штанга-держатель 16 жестко устанавливается на ВС. Неподвижная платформа 15 жестко устанавливается на штанге-держателе 16 таким образом, чтобы она лежала в плоскости, перпендикулярной направлению движения ВС. На неподвижной платформе устанавливаются конический магнитопровод якоря 11, преобразователь напряжения 12, подшипник 13, шайба 14. Вал 7 закрепляется в подшипнике 13 и может свободно вращаться. От перемещений подшипник 13 и вал 7 удерживаются шайбой 14. В пазы магнитопровода 11 якоря укладывается трёхфазная обмотка якоря 10. Магнитопровод 11 якоря прилегает к неподвижной платформе 15 одной торцевой стороной, а с противоположной торцевой стороны в нем устанавливается подшипник 9. В подшипнике 9 закрепляется шайба 8, которая может свободно вращаться. Шайба 8 жестко связывается с валом 7, на ней жестко закрепляется коническая ступица 1. На внутренней поверхности ступицы 1 жестко устанавливаются магнитопровод индуктора 3 с постоянными магнитами 4. На острие конической ступицы 1 устанавливается обтекатель 6, вокруг которого в ступице 1 продельва-

ются вентиляционные отверстия 5, через которые набегающий воздушный поток попадает во внутреннюю полость генератора и охлаждает его. Во внутреннем пространстве конического генератора размещается регулятор угла установки лопастей, который во время работы АВЭК изменяет угол установки лопастей таким образом, чтобы обеспечить постоянство частоты вращения ротора АВЭК при изменении высоты и скорости полёта ВС.

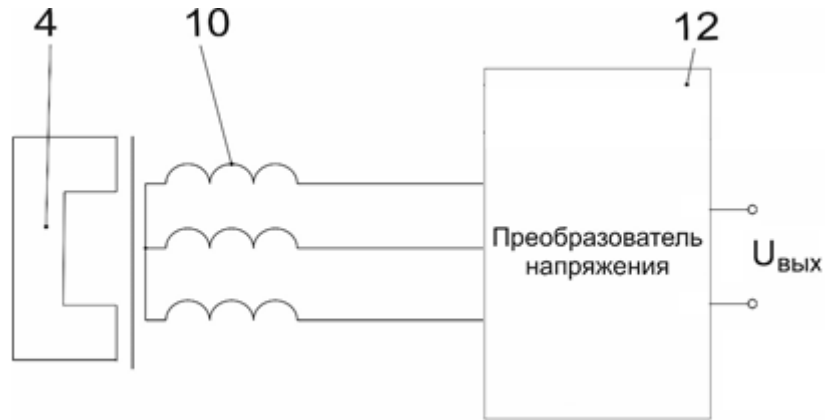


Рисунок 2.3 - Электрическая схема перспективного АВЭК

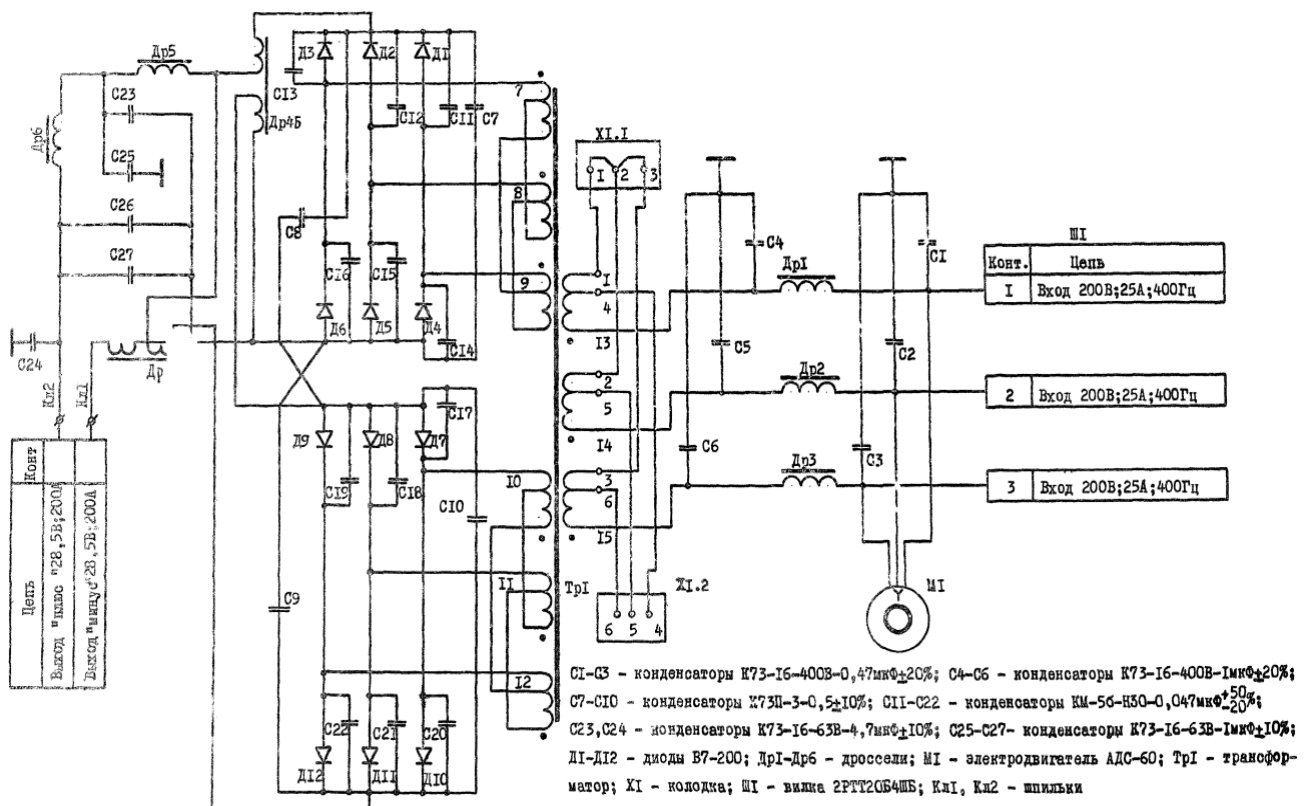


Рисунок 2.4 – Схема преобразователя напряжения АВЭК

Перспективный АВЭК работает следующим образом. При движении ВС набегающий поток воздуха разделяется на два контура. Воздушный поток первого контура воздействует на лопасти и приводит ротор во вращение, а второго контура – поступает во внутреннюю полость АВЭК и охлаждает генератор.

Набегающий воздушный поток первого контура обтекает внешнюю поверхность ступицы 1 и взаимодействует с закрепленными на ней лопастями 2, в результате чего ротор с закрепленными на нем коническим магнитопроводом 3 индуктора с постоянными магнитами 4 индуктора приводится во вращение. Постоянные магниты 4 индуктора создают магнитный поток, который при вращении ротора взаимодействуют с трёхфазной обмоткой якоря 10, уложенной в пазы конического магнитопровода 11 якоря генератора. В результате этого взаимодействия в трёхфазной обмотке 10 якоря возбуждителя наводится трёхфазная система ЭДС, которая подается в регулятор напряжения 12.

Вход преобразователя напряжения 12 подключается к выходу трёхфазной обмотки 10 якоря генератора, а к выходу преобразователя напряжения 12 подключаются потребители электроэнергии.

В соответствии с приказом Министерства промышленности и торговли РФ №663 от 31 марта 2015 года «Об утверждении плана мероприятий по импортозамещению в отрасли гражданского авиастроения Российской Федерации», а именно: «Система генерирования постоянного и переменного тока на самолёте Sukhoi SuperJet 100» в качестве преобразователя напряжения переменного тока в постоянный напряжением бортовой сети 28,5В целесообразно использовать отечественный агрегат - выпрямительное устройство ВУ-7,5, рассчитанное на нагрузку 300А при напряжении 28,5 В (мощность 8,1 кВт) [140]. Два выпрямительных устройства ВУ-7,5 позволят обеспечить преобразование напряжения переменного трёхфазного тока 115/200 В от генератора АВЭК мощностью 15 кВА в напряжение постоянного тока 28,5 В (рис. 2.4).

В случае, если напряжение на выходе генератора АВЭК будет меньше номинального (например, при полёте на большой высоте, где воздух разрежен, вследствие чего невозможно обеспечить вращение ротора АВЭК на номинальной частоте) выпрямленное напряжение постоянного тока также будет меньше номинального (меньше 28,5 В). Следует отметить, что потребители постоянного тока первой категории рассчитаны на работу от аккумуляторных батарей с учётом их разрядки, поэтому такие потребители сохраняют работоспособность при напряжении от 18 В до 31 В. При изменении входного фазного напряжения переменного тока от 119/206 В до 113/196 В напряжение постоянного тока

на выходе ВУ-7,5 меняется от 29,7 до 25,4 В. При линейной зависимости выходное напряжение постоянного тока 18 В будет обеспечиваться при входном напряжении переменного тока, равном 104/180 В. В связи с этим, требования к напряжению переменного тока на выходе генератора АВЭК в достаточной степени снижаются, что, в свою очередь, позволяет смягчить ограничения на пилотирование ВС в аварийной ситуации, а именно - расширить диапазон допустимой скорости полёта – от 200 до 240 км/ч (вместо от 214 км/ч до 230 км/ч). Кроме того, при сильной просадке напряжения в генераторе АВЭК работоспособность аварийных шин постоянного тока будет обеспечиваться аккумуляторными батареями, которые во время работы АВЭК постоянно будут находиться в «горячем» резерве.

При работе АВЭК набегающий воздушный поток второго контура поступает во внутреннюю полость генератора через входные вентиляционные отверстия 5 и, проходя через воздушный зазор, отбирает часть тепла, охлаждая генератор. Благодаря конической форме магнитопроводов индуктора 3 и якоря 11 при вращении ротора под действием центробежных сил возникает ускорение движения воздушного потока через воздушный зазор в окружающую атмосферу, что способствует более эффективному охлаждению генератора.

2.3 Анализ особенностей конструктивного исполнения и изготовления генератора с постоянными магнитами для перспективного авиационного ветроэнергетического комплекса

Для АВЭК на этапе проектирования можно выбрать радиальную, коническую или аксиальную электрическую машину. Однако, необходимо понимать, что каждое из вышеперечисленных конструктивных исполнений требует применения соответствующего способа и технологии изготовления.

Способ изготовления радиальных шихтованных магнитопроводов является наиболее распространенным и хорошо отработанным, причём большинство авиационных генераторов имеют именно радиальную форму [5, 6, 8, 14, 16, 17, 28, 42, 50].

Изготовление конического магнитопровода является наиболее сложной задачей (рис. 2.5). Такое конструктивное исполнение является нетипичным для генераторов (в том числе с постоянными магнитами), поэтому оно требует анализа и выявления особенностей, которые необходимо учитывать при изготовлении конического магнитопровода.

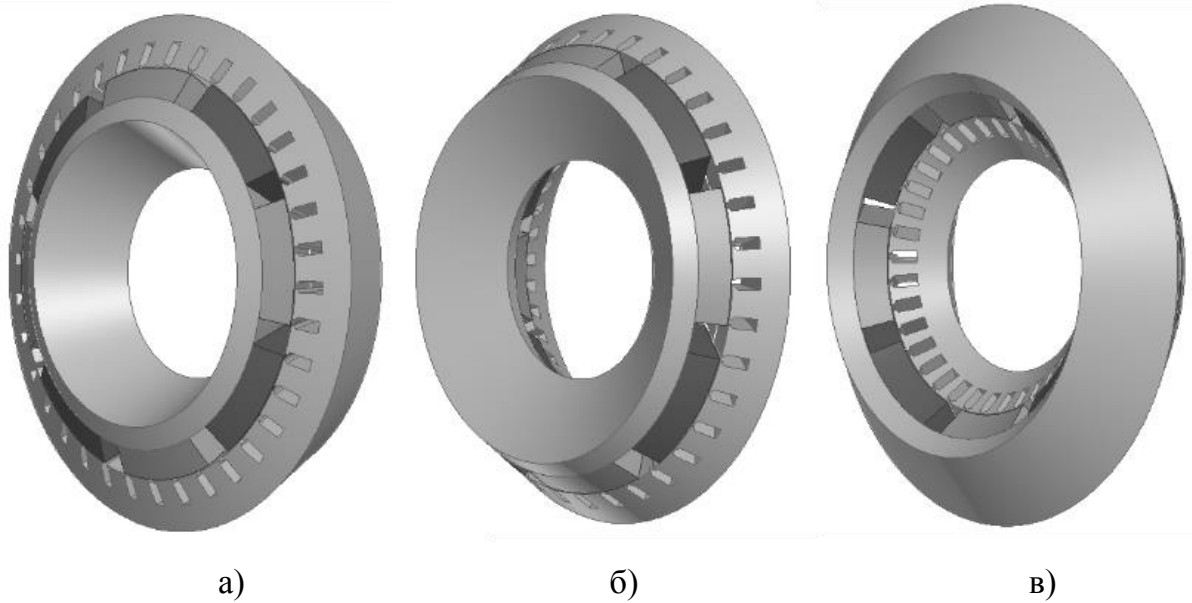


Рисунок 2.5 – Конические электрические машины с постоянными магнитами

В генераторах стационарного использования применение конических генераторов может быть неоправданным из-за сложности их изготовления при невысоких требованиях к их массогабаритным показателям. Но для перспективного АВЭЖ, устанавливаемого на ВС, улучшение массогабаритных показателей может оправдать все трудности, стоящие на пути достижения этой цели. Однако, это невозможно сделать без использования новых технических решений, нестандартных подходов и выполнения необходимых расчётов, порой требующих больших вычислительных ресурсов.

Поиски новых конструктивных решений, применение вычислительных машин, обобщение опыта проектирования позволяют создавать ЭМ с лучшими энергетическими и массогабаритными показателями [101, с. 12-15].

В отличие от радиальных ЭМ, у конических ЭМ ширина зубцов магнитопровода якоря неравномерна вдоль активной длины – на внутреннем диаметре меньше, на внешнем – больше (рис. 2.6). Причем, с увеличением угла раствора конуса, боковая поверхность которого проходит через середину воздушного зазора, а вершина лежит на оси вращения ротора, на внутреннем диаметре активной поверхности ширина зубца магнитопровода якоря уменьшается, а на внешнем – увеличивается, то есть их разница увеличивается и достигает максимума у аксиальных ЭМ, при этом для ЭМ различного конструктивного исполнения одинаковой мощности выполняются условия:

$$b_{z_MIN} < b_z < b_{z_MAX} \quad (2.1)$$

$$b_z = \frac{b_{z_MIN} + b_{z_MAX}}{2} = b_{z_CP} \quad (2.2)$$

где b_z – ширина зубца магнитопровода якоря в радиальной ЭМ, b_{z_MIN} и b_{z_MAX} – соответственно ширина зубца магнитопровода якоря на внутреннем и наружном диаметрах активной поверхности в конических и аксиальных ЭМ, b_{z_CP} – ширина зубца магнитопровода якоря на среднем диаметре магнитопровода якоря (на середине активной длины) в радиальных, конических и аксиальных ЭМ.

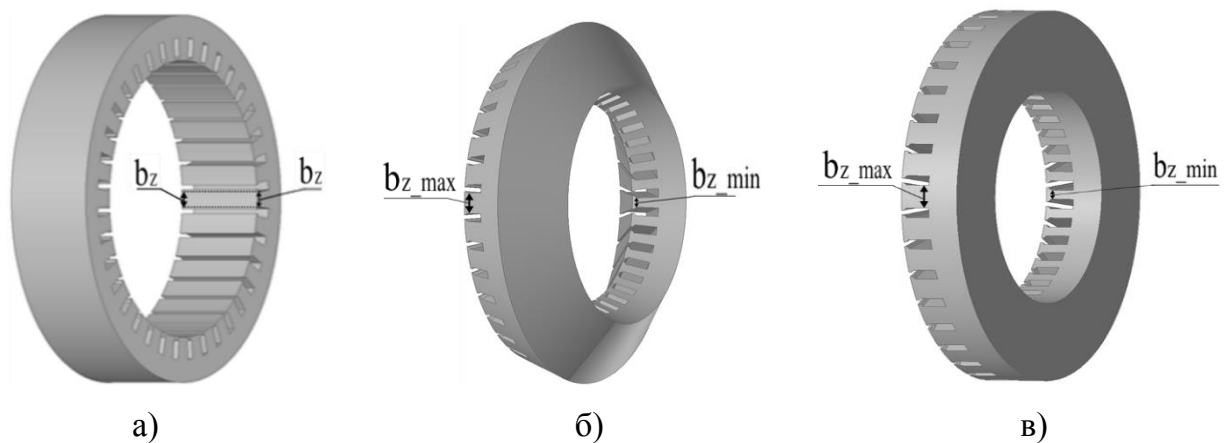


Рисунок 2.6 - Ширина зубцов магнитопроводов якоря ЭМ радиального (а), конического (б) и аксиального (в) конструктивного исполнения

В общем случае возможно спроектировать множество ЭМ заданной мощности разной формы. Однако, в некоторых случаях при заданных габаритах и при выбранном числе пазов в магнитопроводе якоря угол раствора конуса, боковая поверхность которого проходит через середину воздушного зазора, а вершина лежит на оси вращения ротора, не может превысить определенной величины. Это объясняется следующим образом.

В радиальной ЭМ ширина зубца магнитопровода якоря b_z с обеих сторон активной поверхности одинакова. С увеличением угла раствора конуса, боковая поверхность которого проходит через середину воздушного зазора, а вершина лежит на оси вращения ротора, на внутреннем диаметре активной поверхности ширина зубца магнитопровода якоря уменьшается $b_{z_MIN} < b_z$. В случае, если эта величина достигает минимально допустимого значения $b_{z_MIN} = b_{z_MIN_ДОП}$ (исходя из соображений прочности и степени насыщения зубца), то угол раствора конуса, боковая поверхность которого проходит через середину воздушного зазора, а вершина лежит на оси вращения ротора, при котором достигается это равенство, называют критическим и дальнейшее его увеличение невозможно.

Магнитопровод ярма индуктора конической формы не имеет пазов, поэтому изменение его формы не имеет критических ограничений. Наибольший интерес с точки зрения изменения геометрии в индукторе представляют постоянные магниты (рис. 2.7).

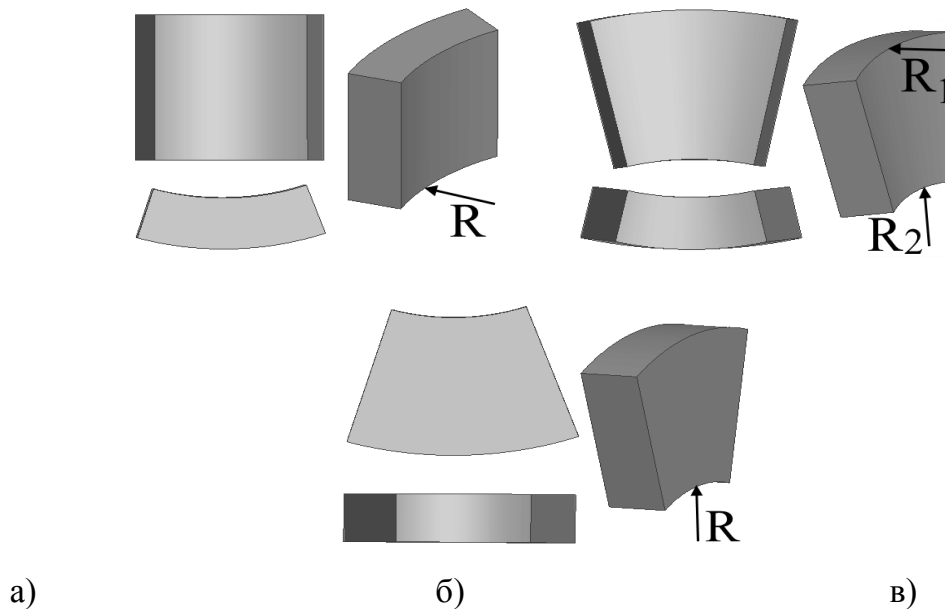


Рисунок 2.7 - Постоянные магниты радиальной (а), конической (б) и аксиальной (в) ЭМ

В радиальных ЭМ каждый магнит (рис. 2.7а) имеет цилиндрическую форму, две плоскости симметрии в прямоугольной трёхмерной системе координат, имеющей начало в центре масс магнита, и один радиус кривизны R относительно оси вращения.

В конических ЭМ каждый магнит (рис. 2.7б) имеет коническую форму, одну плоскость симметрии в прямоугольной трёхмерной системе координат, имеющей начало в центре масс магнита, и два радиуса кривизны - R_1 относительно оси вращения и R_2 относительно вершины конуса, боковая поверхность которого проходит через середину воздушного зазора, а вершина лежит на оси вращения ротора. Постоянные магниты в конических ЭМ имеют более сложную форму по сравнению с магнитами радиальных и аксиальных ЭМ.

В аксиальных ЭМ [24, 27, 28, 57, 59, 65, 67, 69, 71] каждый магнит (рис. 2.7в) имеет сегментную форму (другие формы магнитов в данной работе не рассматриваются), две плоскости симметрии в прямоугольной трёхмерной системе координат, имеющей начало в центре масс магнита, и радиус кривизны R относительно оси вращения.

Если рассматривать ЭМ одинаковой мощности, но разной формы, то при изменении угла раствора конуса, боковая поверхность которого проходит через середину воздушного зазора, а вершина лежит на оси вращения ротора, происходит существенное изменение формы ЭМ, которое может иметь предельные ограничения. При этом, исходя из геометрической формы деталей, изготовление ЭМ радиальной и аксиальной формы должно вызывать меньше трудностей, чем изготовление конических. Однако, технологии не стоят на месте и, как показывает практика, использование трёхмерного компьютерного проектирования позволяет с одинаковой степенью сложности изготавливать детали как простой, так и сложной формы, что открывает большие перспективы в создании магнитных систем (в том числе магнитопроводов ЭМ) различной формы.

При выборе формы ЭМ на этапе проектирования необходимо учитывать, что радиальные ЭМ нечувствительны к небольшим перемещениям ротора вдоль оси вращения, в то время, как аксиальные ЭМ наиболее чувствительны к ним, так как при этом изменяется величина воздушного зазора и, как следствие, изменяется результат электромеханического преобразования энергии. Конические ЭМ, в общем случае, являются промежуточным звеном между радиальными и аксиальными ЭМ, поэтому в зависимости от величины угла раствора конуса, проходящего через воздушный зазор, они могут быть более чувствительны к осевым перемещениям ротора, или менее чувствительны, то есть некоторые их свойства могут быть приближены к свойствам радиальных или аксиальных ЭМ.

При изменении угла раствора конуса, боковая поверхность которого проходит через середину воздушного зазора, а вершина лежит на оси вращения ротора, изменяется расположение магнитов в пространстве, при этом необходимо обеспечивать надёжность их крепления к ярму статора. Эта проблема характерна для всех ЭМ с ПМ, так как постоянные магниты достаточно хрупкие. Необходимо одновременно обеспечить надёжность их крепления и не допускать приложения к магнитам разрушающих усилий [6, 7, 33, 49, 59, 115, 132].

При разном расположении постоянных магнитов способ их крепления может отличаться. Это характеризует не только различия в способе изготовления ЭМ с ПМ различного конструктивного исполнения, но может также отражаться на характеристиках ЭМ. Например, при радиальной конструкции с внутренним ротором магниты располагаются на наружной стороне ротора (рис. 2.8а), а при радиальной конструкции с наружным ротором магниты располагаются на его внутренней стороне (рис. 2.8б).

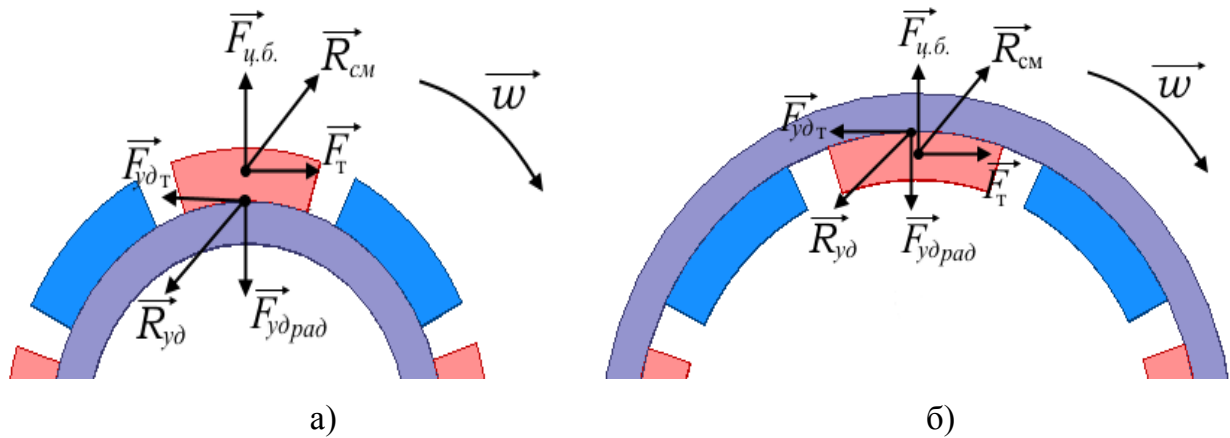


Рисунок 2.8 - Силы, действующие на постоянные магниты при разном конструктивном исполнении ЭМ с ПМ

В ЭМ с ПМ, как правило, ротором является индуктор, а статором, соответственно, якорь. При вращении ротора на каждый магнит них воздействует сила, стремящаяся сместить магнит – равнодействующая сил смещения $\vec{R}_{см}$, которая может быть разложена на тангенциальную силу \vec{F}_T , стремящуюся сдвинуть магнит по касательной к внешней поверхности ротора, и центробежную силу $\vec{F}_{ц.б.}$, стремящуюся оторвать магнит от ярма индуктора. В этом случае необходимо скомпенсировать их равнодействующей силой удержания магнита $\vec{R}_{уд}$, которая может быть разложена на тангенциальную составляющую $\vec{F}_{удт}$ и радиальную $\vec{F}_{удрад}$. Это может быть обеспечено путём наложения рубашки из немагнитного материала (нержавеющая сталь, бандажная нить). При этом в ЭМ появляется дополнительный зазор между статором и ротором, что негативно сказывается на энергетических показателях ЭМ.

При радиальной конструкции с наружным ротором магниты располагаются на внутренней стороне ротора (рис. 2.8б). При этом тангенциальная сила \vec{F}_T смещения также стремится сдвинуть магниты по касательной к внутренней поверхности ротора, а центробежная сила смещения $\vec{F}_{ц.б.}$ стремится прижать магниты к ярму индуктора. Компенсация этой силы осуществляется радиальной составляющей удерживающей силы $\vec{F}_{удрад}$, которая является силой реакции опоры, т.е. ярма индуктора, и не требует принятия повышенных мер для крепления магнита. В этом случае необходимо скомпенсировать только тангенциальную составляющую силы смещения \vec{F}_T . Эта задача может быть решена без применения рубашки из немагнитного материала, поэтому при таком

конструктивном исполнении воздушный зазор может быть минимальным и характеристики магнита используются более эффективно. При аксиальном конструктивном исполнении магниты могут быть закреплены без применения немагнитного экрана с активной стороны.

Можно с достаточной уверенностью предполагать, что в конических ЭМ, у которых ротор является внутренним, требуется особенно прочное закрепление магнитов, для компенсации центробежной составляющей силы смещения, стремящейся оторвать магниты от ротора. Для такого исполнения, скорее всего, потребуется применение рубашки из немагнитного материала, например, нержавеющей стали, или ниточного бандажа (рис. 2.9), что приведёт к увеличению воздушного зазора и, как следствие, снижению эффективности использования характеристик магнита и ухудшению энергетических характеристик ЭМ.

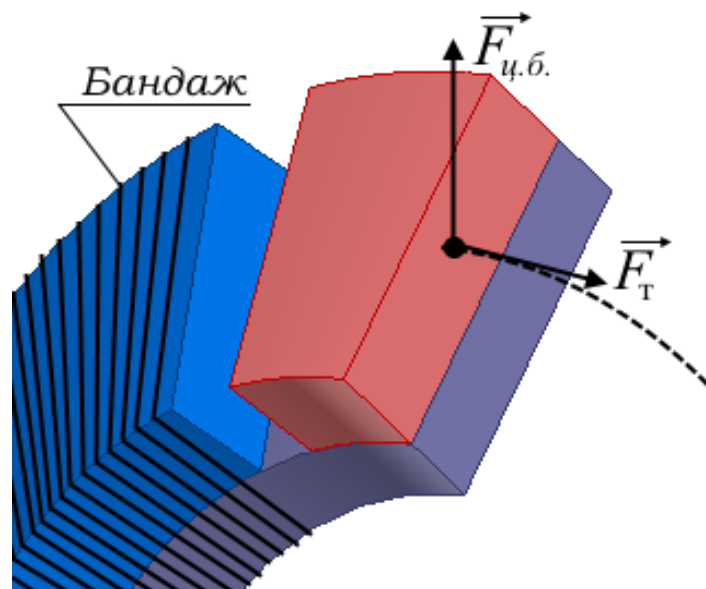


Рисунок 2.9 – Электрическая машина с постоянными магнитами при $0^\circ < \alpha < 90^\circ$

В конических ЭМ, у которых ротор является внешним (рис. 2.10а) центробежную силу $\vec{F}_{ц.б.}$ можно разложить на две составляющие – прижимную силу $\vec{F}_{пр}$, стремящуюся прижать магнит к поверхности индуктора и силу скольжения $\vec{F}_{ск}$, стремящуюся сдвинуть магнит вдоль поверхности ярма индуктора.

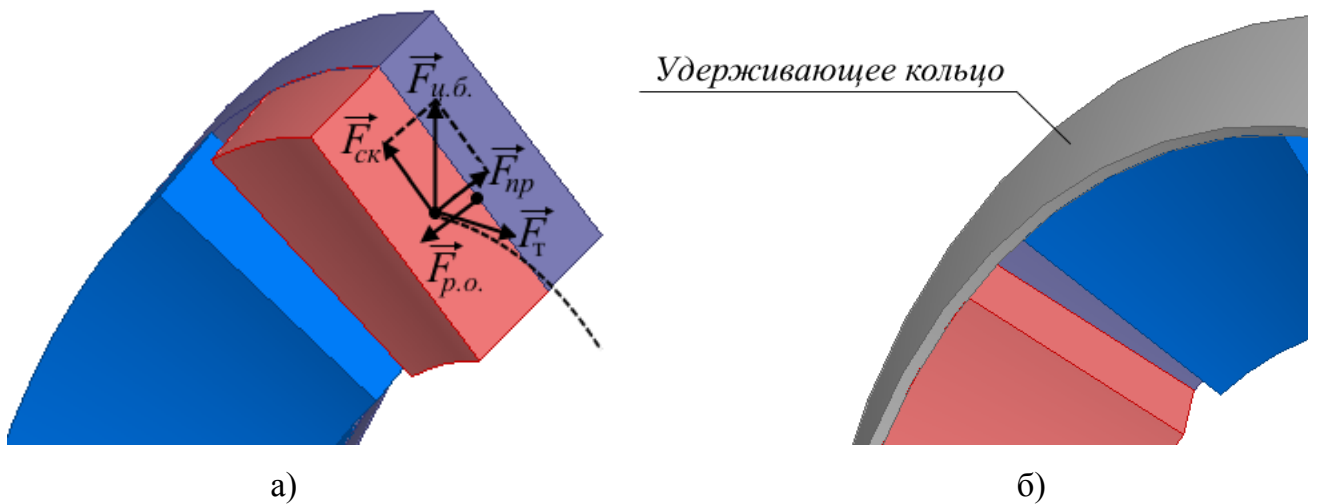


Рисунок 2.10 - Электрическая машина с постоянными магнитами при $90^\circ < \alpha < 180^\circ$

Компенсация прижимной силы \vec{F}_{np} осуществляется силой реакции опоры $\vec{F}_{p.o.}$, а сила скольжения \vec{F}_{ck} частично компенсируется силой трения (на рис. 2.10 не показана). Силу трения нельзя увеличить настолько, чтобы она смогла удержать магнит, поэтому необходимо установить опору, например, удерживающее кольцо, сила реакции которого позволит удержать магнит, оставив активную поверхность открытой (рис. 2.10б).

Таким образом, конические ЭМ сочетают в себе свойства радиальных и аксиальных ЭМ и при необходимости они могут быть изменены в ту или иную сторону. Применение конических ЭМ, несомненно, может оправдать себя только в таких условиях, при которых их преимущества будут более весомы, чем сложности при их проектировании, изготовлении и эксплуатации.

Коническое конструктивное исполнение может обеспечить повышенные показатели ЭМ, такие как удельная мощность, удельный вес, улучшенные условия вентиляции и охлаждения и др., особенно важные для автомобильной, космической, авиационной и морской техники [154, с. 211-213].

Препятствия, стоящие на пути создания конических ЭМ, могут быть преодолены с применением современных технологий [4, 45, 144], тем самым, открыв путь к поиску новых конструктивных решений и повышению энергетических показателей ЭМ.

Изготовление магнитопроводов для электрических машин с магнитной системой конической формы требует особого подхода. По сравнению с изготовлением радиальных и аксиальных магнитопроводов создание конического магнитопровода якоря с пазами яв-

ляется задачей повышенной трудности. Известны самотормозящиеся электрические машины с коническим ротором, используемые в качестве тяговых двигателей [128]. Такие магнитопроводы (рис. 2.11) могут быть набраны из листовой электротехнической стали.

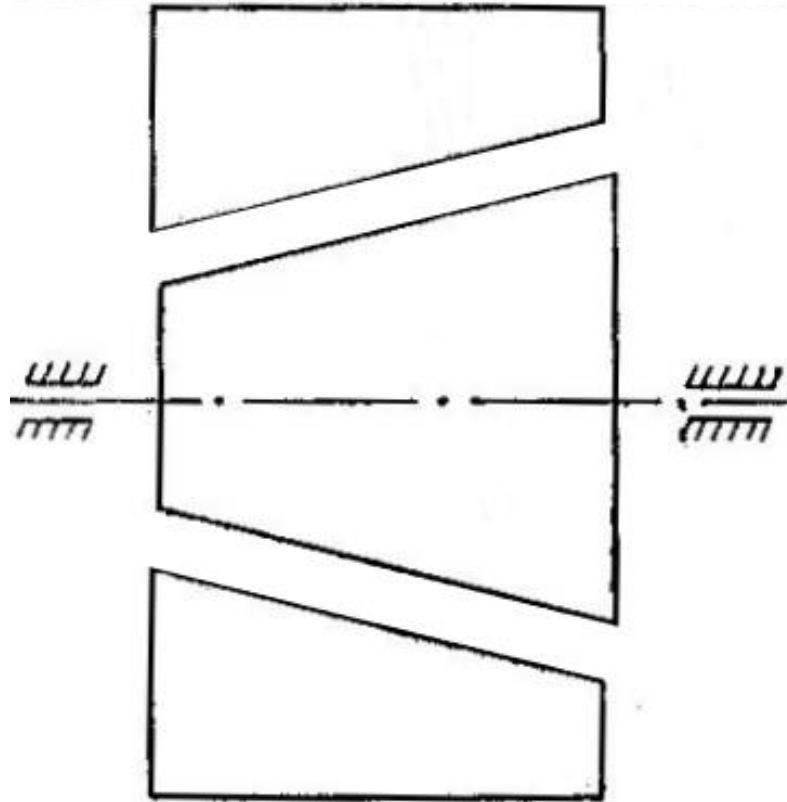


Рисунок 2.11 – Магнитопровод электрической машины с коническим ротором

Для изготовления представленных на рис. 2.11 магнитопроводов статора и ротора можно использовать два способа. Первый способ состоит в том, что листы, из которых набирается шихтованный магнитопровод, штампуются на специальных прессах с делительным приспособлением, обеспечивающим постепенное изменение размеров листа, что позволяет выдержать заданную конусность. При этом соответствующие листы ротора и статора выбиваются из одного листа [128]. После сборки статора и ротора их конусные поверхности обрабатываются на шлифовальных станках. Второй способ отличается тем, что вместо штампов используется лазерная резка, при этом листы статора и ротора также получают из одного листа электротехнической стали [126]. Лазерная резка металлов активно развивается в настоящее время, что влечёт за собой увеличение количества лазерных станков и снижение их стоимости. Эти станки оснащаются компьютерным управлением, что упрощает настройку и управление процессом изготовления магнитопровода, и

в то же время избавляет от необходимости использования специальных прессов с делительным устройством, являющихся сложными и дорогими устройствами.

В данной работе далее представлены конические ЭМ, у которых прилегающие поверхности перпендикулярны друг другу (рис. 2.12). Изготовить такие магнитопроводы из листовой стали практически невозможно, однако, современные технологии позволяют решить проблему их изготовления.

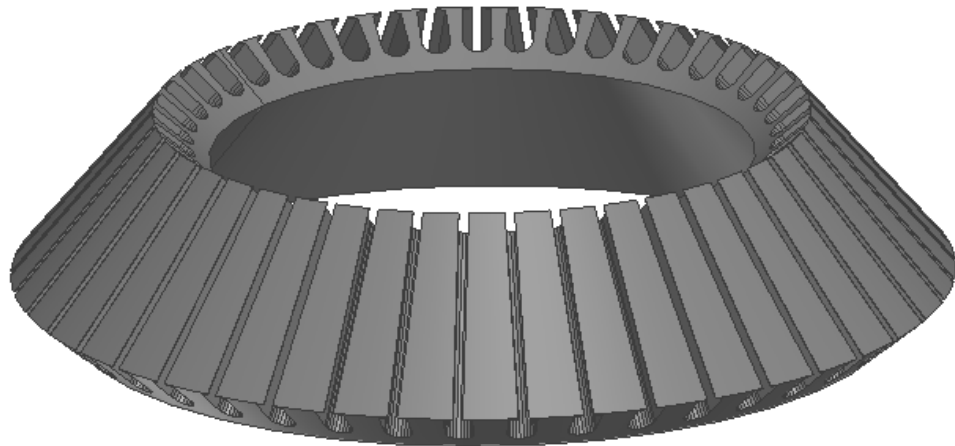


Рисунок 2.12 - Модель якоря конической электрической машины

Для изготовления конического магнитопровода якоря целесообразно использовать метод прессования порошкового материала. Для этого необходимо с помощью одной из компьютерных программ 3D CAD (Компас-3D, SolidWorks, Ansys, Autodesk Inventor и др.) создать трёхмерную компьютерную модель (рис. 2.12).

Из компьютерной модели при помощи 3D принтера осуществляется послойное формирование её твердотельной модели (неметаллической). После этого из полученной физической модели изготавливается литая пресс-форма для последующего изготовления необходимой детали методом прессовки порошкового материала под высоким давлением. В качестве материала для создания магнитопровода ЭМ можно использовать порошковую сталь Somaloy-500, Somaloy-700 или Somaloy-1000 (от фирмы Hognas AB, Швеция). Эта сталь обладает более худшими магнитными свойствами (магнитная проницаемость, допустимая индукция) по сравнению с известными марками листовой электротехнической стали. Однако, стоит отметить, что материал Somaloy по своей структуре состоит из мелких гранул, каждая из которых покрыта тонкой изолирующей неорганиче-

ской пленкой. Это позволяет создавать магнитные системы различных сложных конструкций, которые могут быть выполнены методом прессования как единое целое без необходимости шихтовки, что является преимуществом такой технологии по сравнению с технологией изготовления магнитопроводов ЭМ из листовой электротехнической стали.

Описанный способ производства магнитопроводов обеспечивает безотходную технологию, существенное снижение трудоемкости и стоимости производства электрических машин, автоматизацию и повышение культуры производства, поэтому данное направление является перспективным в области производства электротехнических устройств.

Для изготовления аксиальных магнитопроводов возможно применение двух различных способов. Первый способ состоит в изготовлении шихтованного аксиального магнитопровода из листовой стали, заключающийся в том, что рулонную холоднокатаную электротехническую сталь в движении протяжкой разрезают одновременно на расчетное количество полос расчетной ширины и количества. До сборки осуществляют в полосах вырубку пазов и отжиг, затем наматывают каждую полосу на свое внутреннее ферромагнитное кольцо расчетного диаметра с последующей напрессовкой соответствующего количества наружных ферромагнитных колец соответствующих диаметров на стальной пакет расчетного наружного диаметра. При этом на расчетных расстояниях от начала полосы электротехнической стали между ее витками закрепляют полоски расчетной длины из диамагнитного материала, образующие коаксиальные цилиндрические поверхности и обеспечивающие магнитную изоляцию полученных таким образом модулей аксиальных магнитопроводов друг от друга. Длина полос из диамагнитного материала и радиус полученных коаксиальных цилиндрических поверхностей рассчитывают таким образом, чтобы обеспечить одинаковую площадь торцевых частей модулей аксиальных магнитопроводов [29].

Другим известным способом изготовления аксиальных магнитопроводов является вышеописанный способ прессования порошковой стали, применимый, в общем случае, для изготовления магнитопроводов любой формы (радиальной, конической, аксиальной).

Изготовление металлических агрегатов (не относящихся к электротехническим устройствам) путем прессования порошковых металлов уже внедрено и активно используется при изготовлении автомобильной, авиационной и космической техники. В электротехнической отрасли эта технология является перспективной и при создании новых

порошковых материалов с улучшенными магнитными свойствами позволит создавать ЭМ с высокими энергетическими и массогабаритными показателями.

2.4 Выводы по главе

Во второй главе решены следующие задачи:

1. Разработана структурная схема аварийной СЭС ВС с учётом характеристик существующих отечественных агрегатов и особенностей работы АВЭК, отличающаяся тем, что она содержит всего два выпрямительных устройства;

2. Выполнен анализ особенностей конструкции АВЭК, в результате которого определены основные его необходимые элементы;

3. Разработана конструкция перспективного АВЭК, работающего в составе аварийной СЭС ВС, отличающаяся от известных конструкций тем, что магнитная система генератора имеет коническую форму и позволяющая добиться улучшения массогабаритных показателей всего АВЭК;

4. Проведен анализ особенностей различного конструктивного исполнения генератора с ПМ для перспективного АВЭК, который показал, что коническое и аксиальное конструктивные исполнения имеют ряд особенностей и ограничений, которые следует учитывать при проектировании таких ЭМ.

ГЛАВА 3 РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОГО АППАРАТА ДЛЯ РАСЧЁТА ГЕНЕРАТОРА ПЕРСПЕКТИВНОГО АВИАЦИОННОГО ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

Исходя из накопленного опыта в проектировании ветроэнергетических комплексов, будем полагать, что расчёт лопастей и других узлов и деталей может быть выполнен с использованием существующих методик [102, 103, 122, 142, 145, 147, 148]. В рамках специальности 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы» при определении параметров АВЭК наибольший интерес, и в тоже время, наибольшую сложность представляет расчёт генератора конической конструкции с ПМ. В связи с этим, в данной диссертационной работе из всех расчётов, выполняемых при проектировании перспективного АВЭК, наиболее приоритетным является расчёт параметров генератора с ПМ. Расчёт других основных элементов и узлов рассматриваться не будет.

В связи с отсутствием подходящих методик, пригодных одновременно для расчёта параметров генератора с постоянными магнитами радиального, конического и аксиального конструктивного исполнения, требуется создание нового математического аппарата, позволяющего решить поставленную задачу.

3.1 Вывод формул для определения габаритных размеров генератора с постоянными магнитами для перспективного авиационного ветроэнергетического комплекса

Рассматривая объекты, подобные друг другу, мы можем сравнивать их по величине параметров, отражающих их свойства. В каждом рассматриваемом случае нас может интересовать тот или иной набор параметров объекта в зависимости от критерия, по которому мы выполняем сравнение.

Сравнение нескольких ЭМ можно производить по различным параметрам, к которым относятся: номинальная мощность, номинальное напряжение, номинальная частота вращения, электрические сопротивления обмоток, индуктивности обмоток, масса, габаритные размеры и т.д.

В зависимости от того, какие из параметров нас интересуют, значения других параметров могут варьироваться в определенных пределах таким образом, чтобы интересу-

ющие нас параметры оставались неизменными. Например, несколько генераторов с одинаковыми номинальными значениями мощности и выходного напряжения могут иметь разную номинальную частоту вращения, массу, габариты и т.д. Другие генераторы с одинаковыми габаритными размерами и массой могут иметь различные значения номинальной мощности и напряжения.

В случае, если для сравниваемых объектов заданный набор параметров имеет одинаковые соответствующие значения, мы можем утверждать, что с точки зрения интересующих нас свойств объекты имеют одинаковые характеристики. При этом, для того, чтобы значения выбранных параметров ЭМ оставались неизменными, другие параметры могут изменяться, но не как угодно, а по определенным математическим законам.

В качестве объекта наблюдения рассмотрим ЭМ с ПМ, а в качестве критерия сравнения определим энергетические показатели: мощность, фазное напряжение, частоту вращения. Кроме того, достижение этих показателей будем сравнивать при следующих неизменных параметрах: число фаз, количество пазов якоря, размеры паза, количество пар полюсов, число проводников в пазу, число витков в обмотке якоря, активная длина ЭМ, высота магнитопровода якоря, высота магнитопровода индуктора, высота постоянных магнитов, максимально допустимая индукция в магнитопроводе якоря (в зубцах, в ярме), максимально допустимая индукция в ярме индуктора, свойства активных материалов, величина воздушного зазора, расстояние от середины воздушного зазора до оси вращения ротора. При этом постоянство заданной совокупности энергетических показателей ЭМ с ПМ может быть обеспечено при различном конструктивном исполнении ЭМ.

Для доказательства этого утверждения рассмотрим закон электромагнитной индукции на примере плоской рамки, вращающейся в магнитном поле (рис. 3.1).

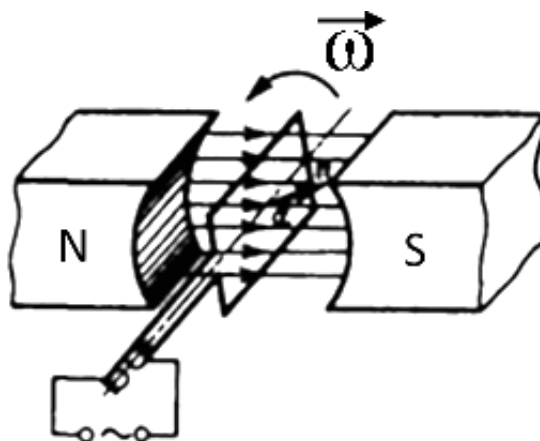


Рисунок 3.1 - Вращение рамки в однородном магнитном поле

Предположим, что рамка вращается в однородном магнитном поле ($B=const$) равномерно с угловой скоростью $\omega=const$. Магнитный поток, сцепленный с рамкой площадью S , в любой момент времени t , равен:

$$\Phi=B_n S=BS \cos(\alpha), \quad (3.1)$$

где $B_n=B\cos(\alpha)$ – проекция вектора B на нормаль n к плоскости рамки, $\alpha=\omega t$ — угол поворота рамки в момент времени t . При вращении рамки в ней будет возникать переменная электродвижущая сила (ЭДС) индукции:

$$e=-\frac{d\Phi}{dt}=BS\omega \sin(\alpha) \quad (3.2)$$

Зависимость ЭДС от линейной (окружной) скорости v движения проводника длиной l в однородном магнитном поле с индукцией B выражается формулой:

$$e=vBl \sin(\alpha) \quad (3.3)$$

Известно, что линейная скорость точки, движущейся по окружности, равна:

$$v=\omega R, \quad (3.4)$$

где R -радиус окружности, по которой движется проводник.

Возьмём прямой проводник, состоящий из трёх участков, каждый из которых имеет бесконечно малую длину l , и будем вращать его в однородном магнитном поле по окружности радиусом R_0 .

Если проводник расположен параллельно оси вращения, то ЭДС в проводнике будет равна:

$$e=e_1+e_2+e_3=v_0Bl \sin(\alpha)+v_0Bl \sin(\alpha)+v_0Bl \sin(\alpha)=3v_0Bl \sin(\alpha)=3\omega R_0Bl \sin(\alpha) \quad (3.5)$$

где v_0 – линейная скорость движения проводника по окружности радиусом R_0

Если же наклонить проводник относительно его центра к оси вращения, то средний участок будет находиться от оси вращения на том же расстоянии R_0 , участок, расположенный ближе к оси вращения, будет находиться от неё на расстоянии $R_0-\Delta R$, участок, расположенный дальше от оси вращения, будет находиться от неё на расстоянии $R_0+\Delta R$. В этом случае ЭДС в проводнике будет равна:

$$\begin{aligned} e=e_1+e_2+e_3 &=v_1Bl \sin(\alpha)+v_0Bl \sin(\alpha)+v_2Bl \sin(\alpha)=\omega(R_0-\Delta R)Bl \sin(\alpha)+ \\ &+\omega R_0Bl \sin(\alpha)+\omega(R_0+\Delta R)Bl \sin(\alpha)=\omega R_0Bl \sin(\alpha)-\omega\Delta RBl \sin(\alpha)+\omega R_0Bl \sin(\alpha)+ \\ &+\omega R_0Bl \sin(\alpha)+\omega\Delta RBl \sin(\alpha)=3\omega R_0Bl \sin(\alpha) \end{aligned} \quad (3.6)$$

Как видно, результаты выражений (3.5) и (3.6) совпадают. Получается, что если развернуть проводник относительно его центра под некоторым углом к оси вращения и

вращать его с той же угловой скоростью в том же магнитном поле, то ЭДС, наводимая в проводнике, не изменится. При этом расстояние от оси вращения до центра проводника должно оставаться постоянным при наклоне проводника относительно оси вращения.

Если же рассмотреть не отдельный проводник, а всю ЭМ, то условия электромеханического преобразования энергии не изменятся, если «разворот» всех проводников будет выполнен относительно окружности, проходящей через середину воздушного зазора. Если зафиксировать величину активной длины, то радиус этой окружности будет определять линейную скорость каждой точки на роторе, независимо от конструкции ЭМ – будь она радиальной, аксиальной или конической. При этом «разворот» относительно указанной окружности не приведет к изменению мощности ЭМ в установившемся режиме работы. Эта окружность является своего рода невидимой осью, относительно которой формируется вся ЭМ с её размерами, и параметрами под некоторым углом наклона к оси вращения ротора. При этом множество параметров ЭМ определяются в зависимости от диаметра этой окружности. Поэтому указанная окружность является своего рода «эталоном», относительно которого можно построить бесконечное количество ЭМ одинаковой мощности, но разной формы.

Рассмотрим ЭМ с коническим ротором (рис. 3.2). Проведем прямую, проходящую через середину воздушного зазора и пересекающую ось вращения ротора под некоторым углом α . Назовем угол α *углом наклона воздушного зазора к оси вращения ротора ЭМ*. Тогда при $\alpha=0^\circ$ получится радиальная, а при $\alpha=90^\circ$ - аксиальная ЭМ. То есть все радиальные и аксиальные ЭМ можно рассматривать как частный случай ЭМ с коническим ротором [93].

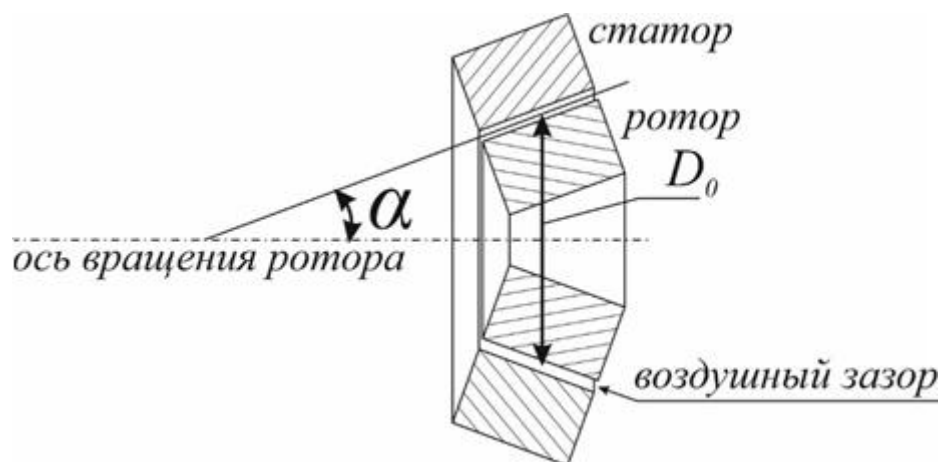


Рисунок 3.2 - Сечение ЭМ с коническим ротором

В общем случае возможно спроектировать множество ЭМ различного конструктивного исполнения, которые будут удовлетворять заданным требованиям (техническому заданию). При переходе от одного варианта конструктивного исполнения ЭМ к другому форма и размеры магнитопроводов статора и ротора должны изменяться (преобразовываться) в соответствии с определенными закономерностями, чтобы выбранные энергетические показатели ЭМ оставались постоянными. Процесс изменения формы и размеров магнитопроводов статора и ротора при проектировании ЭМ назовём *преобразованием ЭМ*.

Для определения параметров проектируемого генератора будем использовать преобразование ЭМ, при котором углы между всеми соприкасающимися поверхностями магнитопровода ЭМ не изменяются.

Для любой ЭМ с известными параметрами, у которой значение угла наклона воздушного зазора к оси вращения ротора равно α_1 , можно определить такую ЭМ со значением угла наклона воздушного зазора α_2 , у которой результат электромагнитного преобразования энергии будет идентичным, или эквивалентным. Тогда электрическую машину с углом наклона воздушного зазора к оси вращения ротора α_1 и известными параметрами назовём *исходной*, а ЭМ с углом наклона воздушного зазора к оси вращения ротора α_2 назовём *эквивалентной* [89].

Для любой ЭМ с известными параметрами, у которой значение угла наклона воздушного зазора к оси вращения ротора равно α_1 , можно определить такую ЭМ со значением угла наклона воздушного зазора α_2 , у которой результат электромеханического преобразования энергии будет идентичным, или эквивалентным (рис. 3.3).

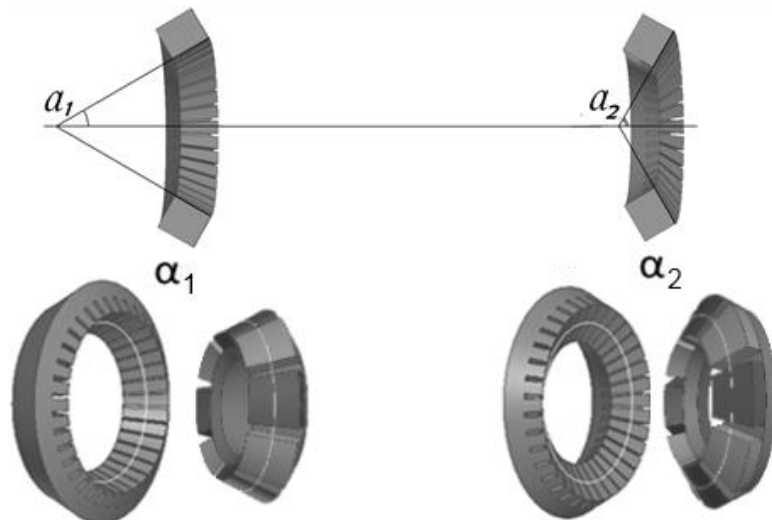


Рисунок 3.3 - К пояснению определения эквивалентных ЭМ

Процесс нахождения эквивалентной ЭМ для исходной назовем *эквивалентным преобразованием ЭМ*. В частности, эквивалентные генераторы имеют одинаковую мощность и выходное напряжение на установившихся режимах работы при одинаковой частоте вращения ротора.

Эталонная окружность проходит через середину воздушного зазора и лежит в плоскости, перпендикулярной оси вращения ротора (на рис. 3.3 эталонная окружность окрашена в белый цвет). Для радиальных ЭМ диаметр эталонной окружности определяется как разница между диаметром расточки якоря и величиной воздушного зазора [93].

$$D_0 = D - \delta \quad (3.7)$$

где D_0 – диаметр эталонной окружности, D – диаметр расточки якоря в радиальных ЭМ, δ – величина воздушного зазора.

У эквивалентных ЭМ с различным углом наклона воздушного зазора к оси вращения ротора, например, от 0° до 90° , положение сечения магнитопровода якоря, будет соответствовать одному из видов, представленных на рис. 3.4.

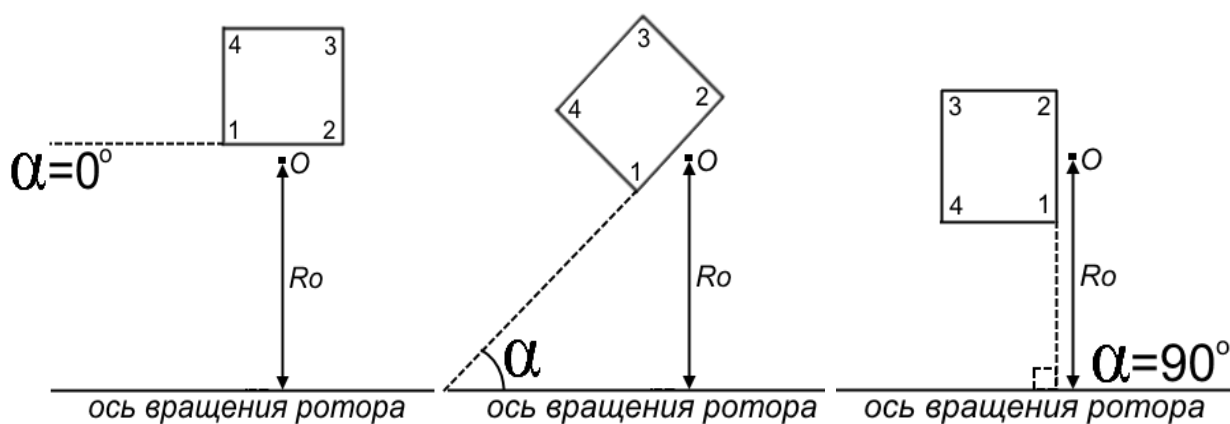


Рисунок 3.4 - Сечения магнитопровода эквивалентных ЭМ с разным углом наклона воздушного зазора

Для эквивалентных ЭМ основными постоянными величинами являются [79]:

- диаметр эталонной окружности $D_0 = 2R_0 = const$;
- активная длина $l = const$;
- высота магнитопровода $h = const$ (для индуктора $h = h_{инд}$ и для якоря $h = h_{як}$ вычисления производятся отдельно);
- величина воздушного зазора δ .

Учитывая, что на рис. 3.4 точка O (середина воздушного зазора на рассматриваемом сечении) неподвижна, а отрезок 1-2 всегда лежит на активной поверхности магнитопровода, то при известных значениях вышеперечисленных параметров (D_0 , l , $h_{\text{инд}}$, $h_{\text{як}}$, δ), вычислив расстояние от оси вращения до каждой вершины рассматриваемого сечения, можно однозначным образом определить форму магнитопровода и его положение в пространстве. Для определения этих расстояний рассмотрим рисунок 3.5 [62].

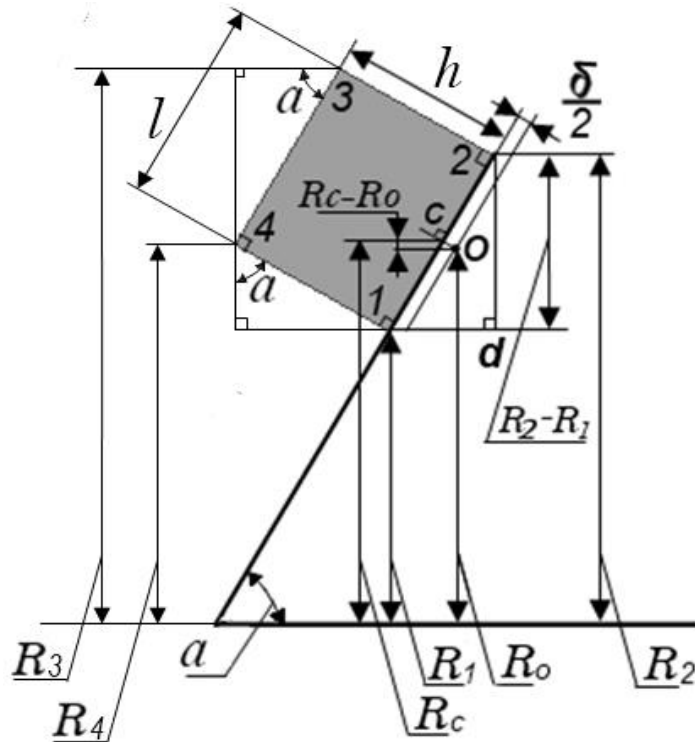


Рисунок 3.5 - К пояснению формул эквивалентного преобразования ЭМ

Для эквивалентных ЭМ расстояние от оси вращения ротора до каждой из вершин рассматриваемого сечения магнитопровода при любом угле наклона воздушного зазора к оси вращения ротора можно определить по формулам эквивалентного преобразования, представленным выражениями (3.8-3.11):

$$R_1 = R_0 + \frac{\delta}{2} \cos(\alpha) - \frac{l}{2} \sin(\alpha) \quad (3.8)$$

$$R_2 = R_0 + \frac{\delta}{2} \cos(\alpha) + \frac{l}{2} \sin(\alpha) \quad (3.9)$$

$$R_3 = R_0 + (h + \frac{\delta}{2}) \cos(\alpha) + \frac{l}{2} \sin(\alpha) \quad (3.10)$$

$$R_4 = R_0 + (h + \frac{\delta}{2}) \cos(\alpha) - \frac{l}{2} \sin(\alpha) \quad (3.11)$$

Для одной и той же ЭМ каждый магнитопровод (якоря и индуктора) имеет свои размеры R_1 , R_2 , R_3 и R_4 , а угол α для магнитопровода статора и ротора отличается на 180° (рис. 3.6).

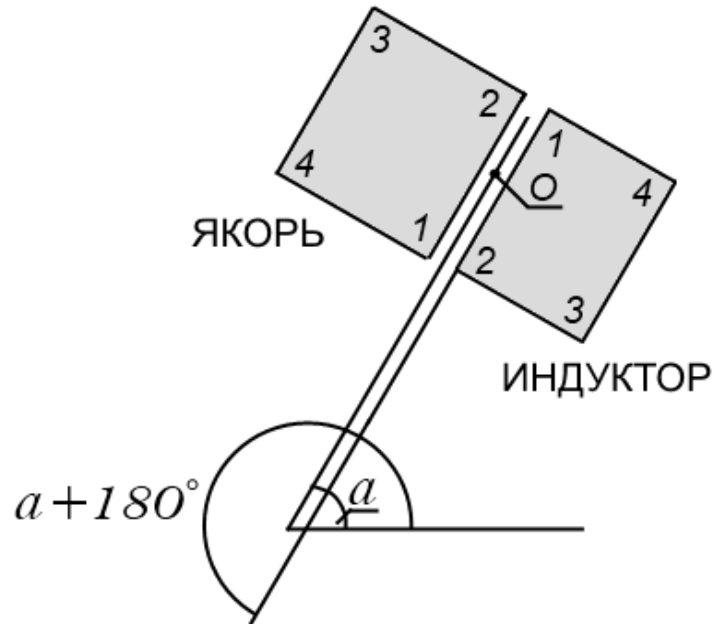


Рисунок 3.6 - К определению соответствующих точек на магнитопроводах статора и ротора при решении формул эквивалентного преобразования

Для магнитопровода якоря формулы эквивалентного преобразования будут иметь вид:

$$R_{1\text{як}} = R_0 + \frac{\delta}{2} \cos(\alpha) - \frac{l}{2} \sin(\alpha) \quad (3.12)$$

$$R_{2\text{як}} = R_0 + \frac{\delta}{2} \cos(\alpha) + \frac{l}{2} \sin(\alpha) \quad (3.13)$$

$$R_{3\text{як}} = R_0 + (h_{\text{як}} + \frac{\delta}{2}) \cos(\alpha) + \frac{l}{2} \sin(\alpha) \quad (3.14)$$

$$R_{4\text{як}} = R_0 + (h_{\text{як}} + \frac{\delta}{2}) \cos(\alpha) - \frac{l}{2} \sin(\alpha) \quad (3.15)$$

Для магнитопровода индуктора формулы эквивалентного преобразования будут иметь вид:

$$R_{1\text{инд}} = R_0 + \frac{\delta}{2} \cos(\alpha + 180^\circ) - \frac{l}{2} \sin(\alpha + 180^\circ) \quad (3.16)$$

$$R_{2\text{инд}} = R_0 + \frac{\delta}{2} \cos(\alpha + 180^\circ) + \frac{l}{2} \sin(\alpha + 180^\circ) \quad (3.17)$$

$$R_{\text{зинд}} = R_0 + (h_{\text{инд}} + \frac{\delta}{2})\cos(\alpha + 180^\circ) + \frac{l}{2}\sin(\alpha + 180^\circ) \quad (3.18)$$

$$R_{\text{4инд}} = R_0 + (h_{\text{инд}} + \frac{\delta}{2})\cos(\alpha + 180^\circ) - \frac{l}{2}\sin(\alpha + 180^\circ) \quad (3.19)$$

Эквивалентность ЭМ позволяет проектировать аксиальные и конические ЭМ с использованием отработанного математического аппарата для радиальных ЭМ [93].

В настоящее время положения теории подобия ЭМ используются при проектировании серий машин [41, 61, 101], то есть позволяют рассчитывать ЭМ одинакового конструктивного исполнения, но разной мощности. В отличие от известных формул, выведенные формулы эквивалентного преобразования ЭМ являются основой для проектирования эквивалентных ЭМ одинаковой мощности, но разного конструктивного исполнения. Причем это относится к ЭМ не только с ПМ, но и к синхронным, асинхронным, индукторным и др.

Исходя из вышесказанного, выведенные формулы эквивалентного преобразования ЭМ, являющиеся развитием теории подобия ЭМ, позволяют определять геометрические размеры эквивалентных ЭМ с разным углом наклона воздушного зазора к оси вращения ротора, что позволяет использовать их при расчёте параметров конического генератора с ПМ для перспективного АВЭК.

3.2 Исследование эквивалентных генераторов с постоянными магнитами для авиационного ветроэнергетического комплекса

Эквивалентность электрических машин дает возможность использовать некоторые положения из методики расчёта радиальных ЭМ с ПМ для расчёта конического генератора перспективного АВЭК. Для подтверждения выдвинутого предположения о возможности создания эквивалентных ЭМ различного конструктивного исполнения были созданы трёхмерные компьютерные модели радиального и аксиального генераторов с ПМ. Размеры и форма исследованных моделей были определены по формулам эквивалентного преобразования (3.8-3.11).

Исследования проводились методом компьютерного имитационного моделирования в программе «Ansys Maxwell 16», позволяющей производить анализ различных электромагнитных устройств, в том числе электрических машин. Внешний вид исследованных моделей представлен на рисунках 3.7 и 3.8.

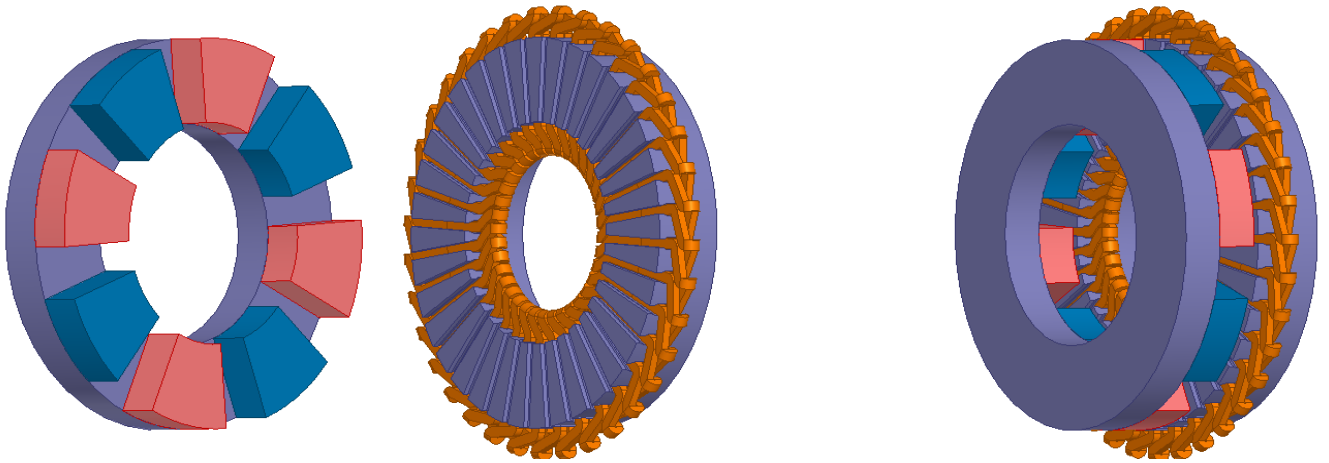


Рисунок 3.7 - Модель аксиальной электрической машины

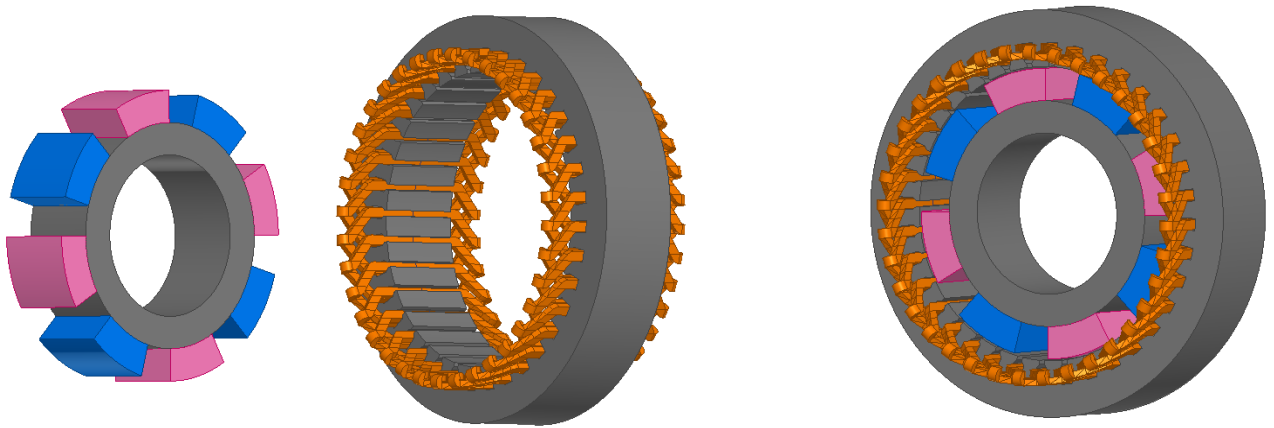


Рисунок 3.8 - Модель радиальной электрической машины

Исследованные модели генераторов подключались к одной и той же внешней проверочной цепи (разработанной с использованием встроенного модуля «Maxwell Circuit» из состава программы «Ansys Maxwell 16»), электрическая схема которой представлена на рис. 3.9 [73].

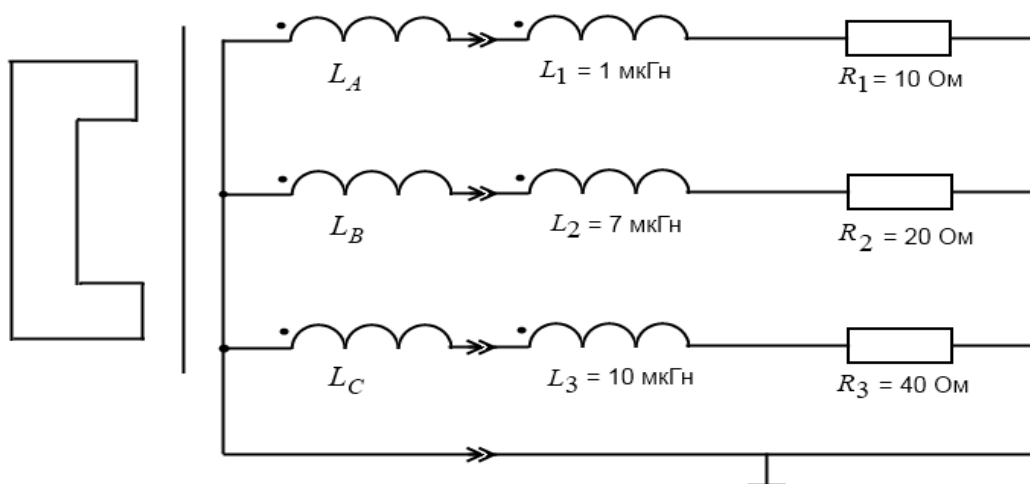


Рисунок 3.9 Электрическая схема исследуемых электрических машин и внешней цепи

Исследования проводились на разных частотах вращения. Полученные результаты представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 - Результаты исследований эквивалентных ЭМ

№	n, об/мин	I _ф , А						U _ф , В		Разница результатов, %
		акс. ЭМ			рад. ЭМ			акс. ЭМ	рад. ЭМ	
		I _A	I _B	I _C	I _A	I _B	I _C			
1	1500	1,4	0,7	0,3	1,4	0,7	0,3	14,1	14,0	0,7
2	3000	2,8	1,4	0,7	2,8	1,4	0,7	28,4	28,1	1,1
3	6000	5,4	2,7	1,4	5,3	2,6	1,4	54,0	53,3	1,3
4	12000	10,8	5,3	2,7	10,6	5,2	2,7	107,5	105,9	1,5

На рисунках 3.10 - 3.13 представлены осциллограммы токов и напряжений, полученные при проведении исследований.

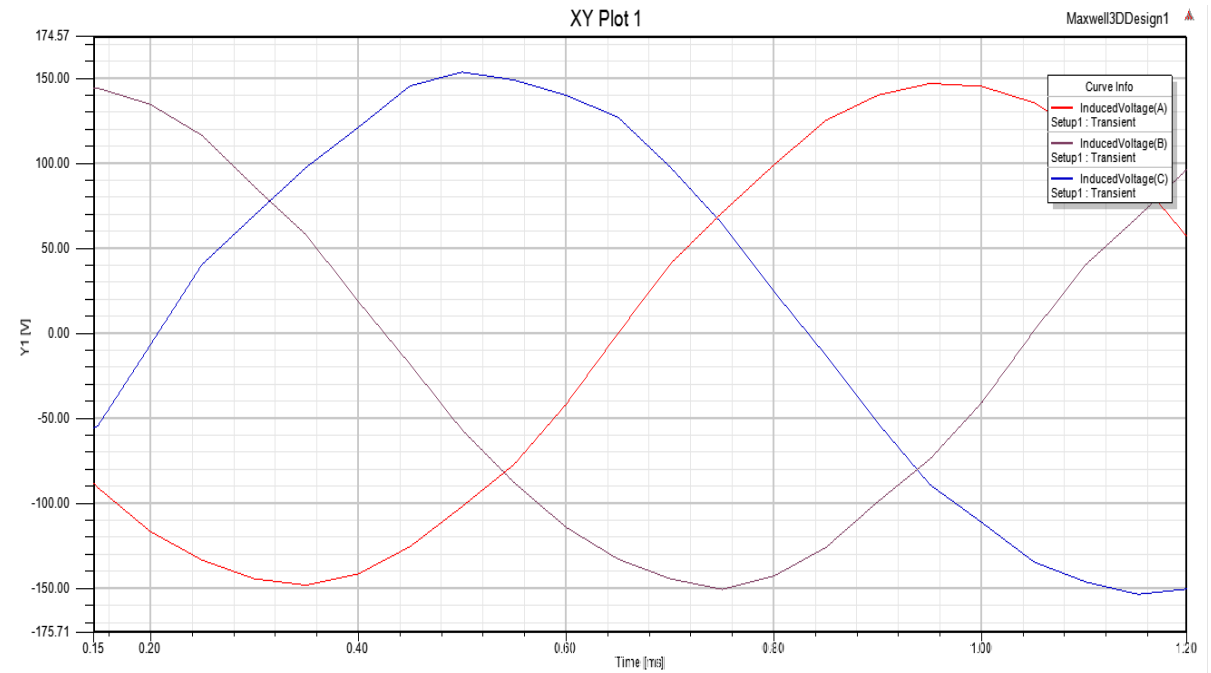


Рисунок 3.10 - Осциллограммы фазных напряжений для модели аксиальной электрической машины при частоте вращения 12000 об/мин

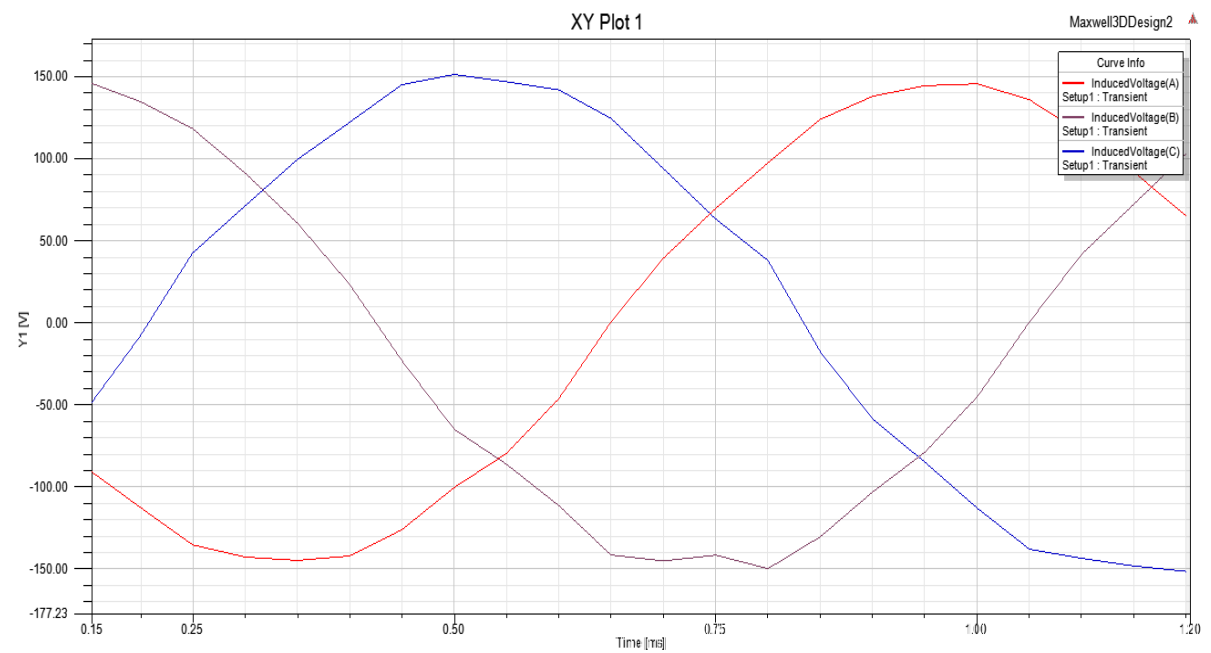


Рисунок 3.11 - Осциллограммы фазных напряжений для модели радиальной электрической машины при частоте вращения 12000 об/мин

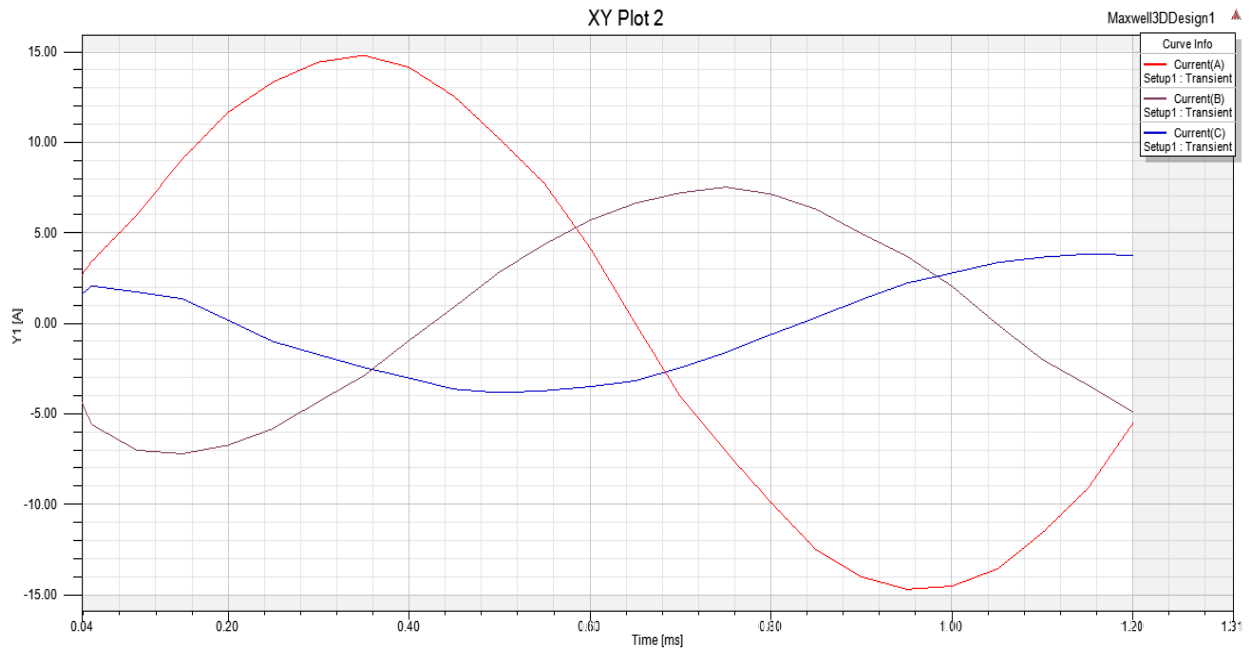


Рисунок 3.12 - Осциллограммы фазных токов для модели аксиальной электрической машины при частоте вращения 12000 об/мин

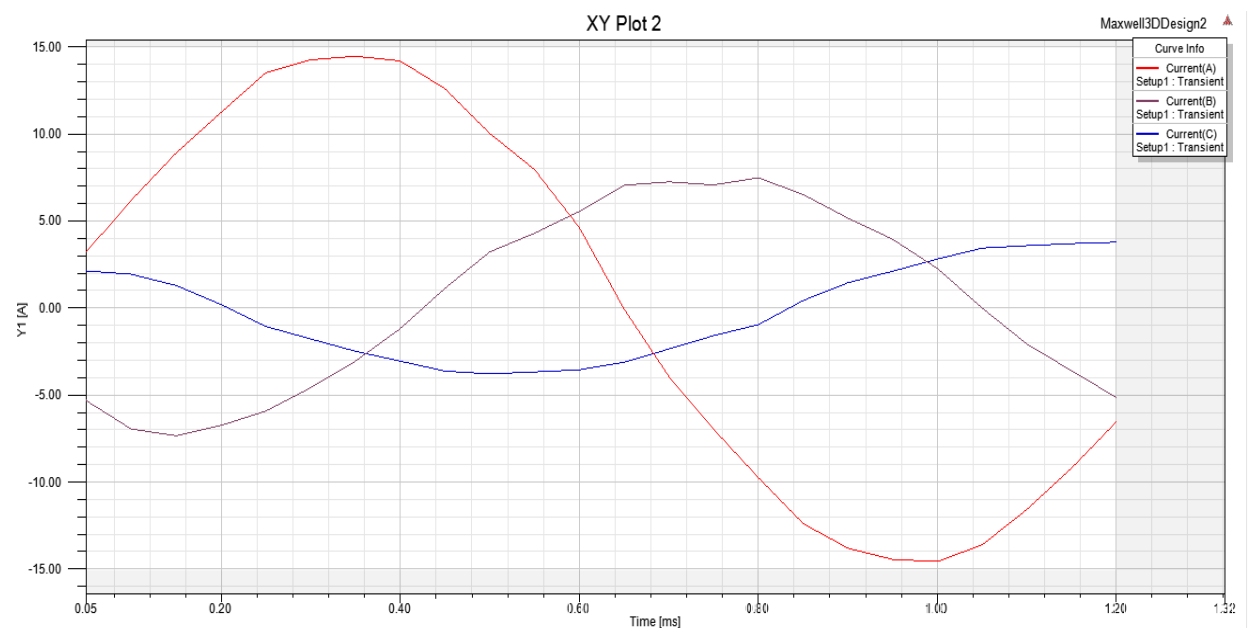


Рисунок 3.13 - Осциллограммы фазных токов для модели радиальной электрической машины при частоте вращения 12000 об/мин

Как видно из рисунков 3.10-3.13, исследованные модели трёхфазных генераторов с постоянными магнитами аксиальной и радиальной конструкции имеют почти одинаковые характеристики (разница результатов не превысила 1,5 %), что говорит о справедливости утверждения об эквивалентности результатов электромагнитного преобразования ЭМ

разной формы, размеры которых находятся в соответствии с формулами эквивалентного преобразования ЭМ [73].

На рис. 3.14 представлены картины распределения магнитной индукции в воздушном зазоре и магнитопроводах исследованных моделей при частоте вращения 12000 об/мин.

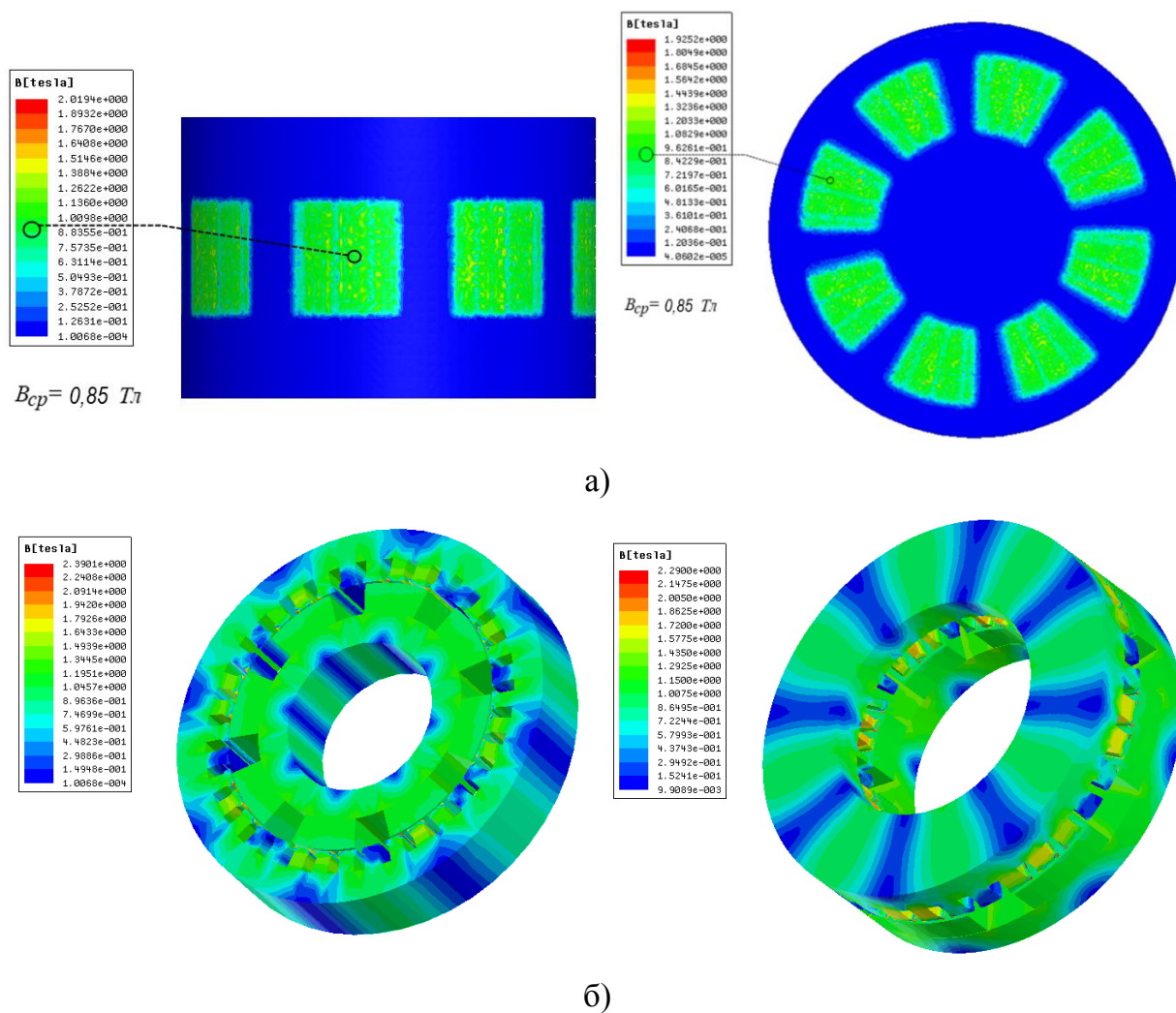


Рисунок 3.14 - Картины распределения магнитной индукции в воздушном зазоре (а) и в магнитопроводах (б) исследованных моделей

В воздушном зазоре модели радиальной ЭМ магнитная индукция вдоль активной длины распределена равномерно. В зубцах якоря вдоль активной длины распределение магнитной индукции равномерное. Средняя индукция на средней глубине зубца якоря составила 1,3 Тл (рис. 3.15).

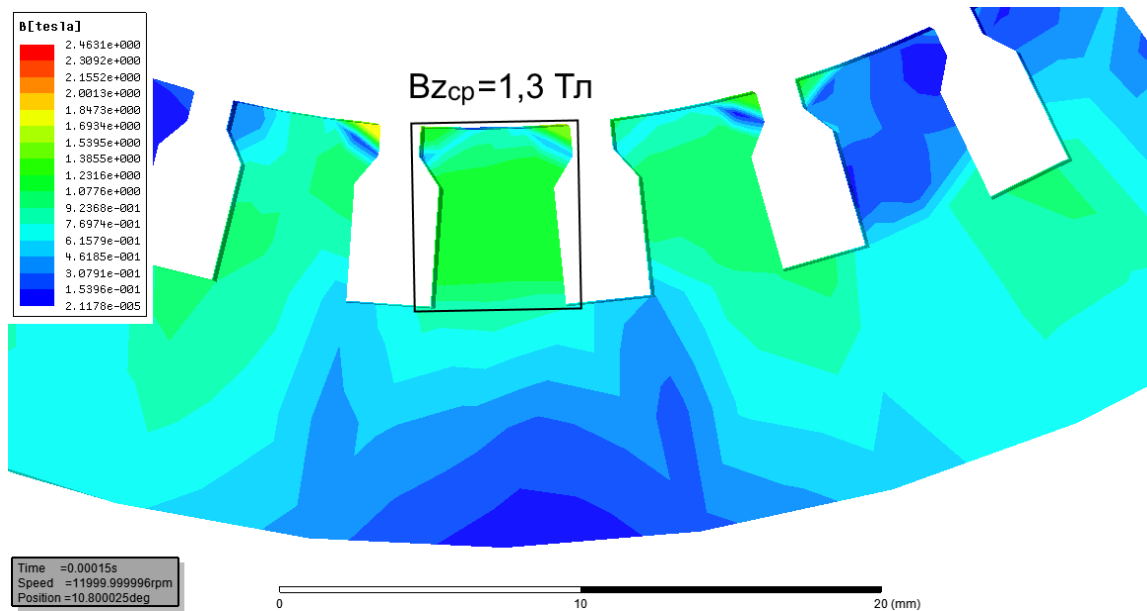


Рисунок 3.15 – Картина распределения магнитной индукции в зубцах якоря радиальной ЭМ

В воздушном зазоре модели аксиальной ЭМ магнитная индукция вдоль активной длины распределена практически равномерно. Однако, в зубцах якоря на внутреннем и наружном диаметрах магнитная индукция отличается из-за неравномерной ширины зубца. На внутреннем диаметре средняя величина магнитной индукции составила 1,75 Тл, а на наружном диаметре 1,5 Тл (рис. 3.16). Это означает, что аксиальные ЭМ на внутреннем диаметре насыщаются быстрее, чем на наружном. Однако, известно, что ЭМ с ПМ обладают высокой стойкостью к размагничиванию внешним магнитным полем, поэтому они не очень чувствительны к действию реакции якоря [16, 115]. При проектировании ЭМ этот факт необходимо учитывать и рассчитывать параметры ЭМ исходя из индукции в зубце на внутреннем диаметре, равной индукции насыщения, а в некоторых случаях даже перенасыщения, так как насыщенный (перенасыщенный) участок будет небольшим. При этом средняя часть активной поверхности зубцов будет иметь индукцию, близкую к насыщению, а внешний участок будет ненасыщенным.

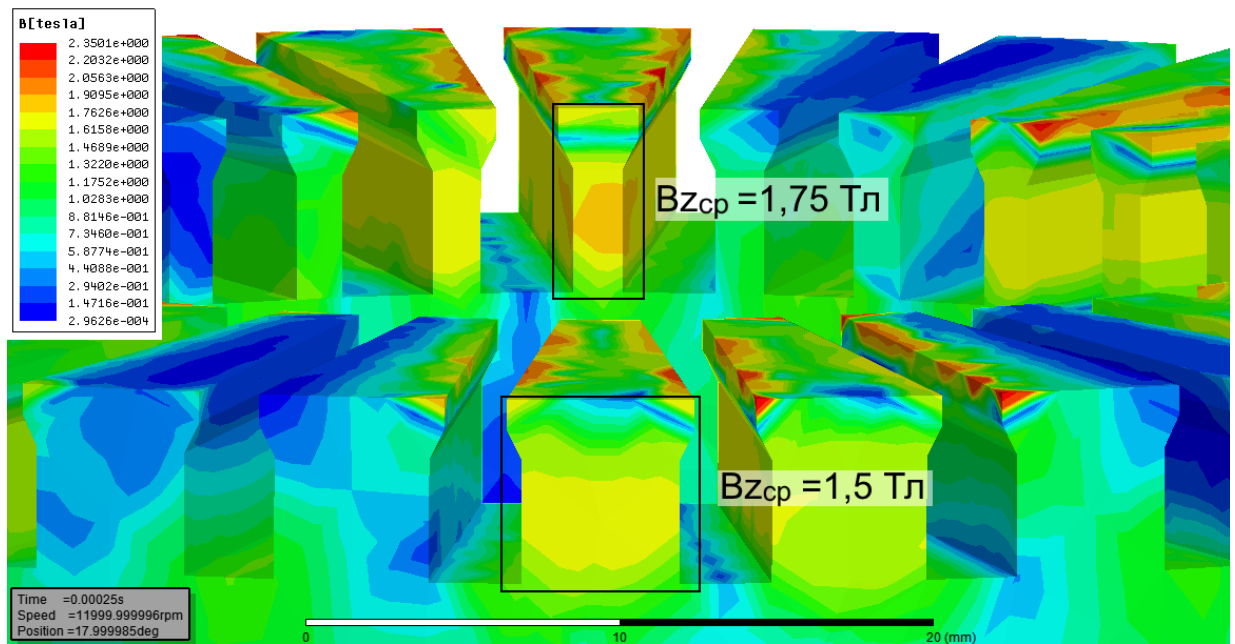


Рисунок 3.16 - Картина распределения магнитной индукции в зубцах якоря аксиальной ЭМ

Площадь воздушного зазора у эквивалентных ЭМ одинакова. Но при этом объём стали магнитопровода якоря у эквивалентных ЭМ с разным углом наклона воздушного зазора отличается достаточно значительно. У радиальной ЭМ (при $\alpha=0^\circ$) объём стали якоря больше, чем у аксиальной ($\alpha=90^\circ$), значит, при одном и том же значении магнитной индукции в воздушном зазоре аксиальная ЭМ более насыщена, что и подтверждается рисунками 3.15 и 3.16. Как видно, максимальное значение индукции в спинке якоря в радиальной ЭМ составляет 0,8 Тл, а в аксиальной ЭМ – 0,9 Тл. Это означает, что при увеличении угла наклона воздушного зазора уменьшается объём стали в магнитопроводе якоря и ЭМ насыщается быстрее. Необходимо учитывать эти факты при проектировании ЭМ и соответствующим образом выбирать вариант конструктивного исполнения.

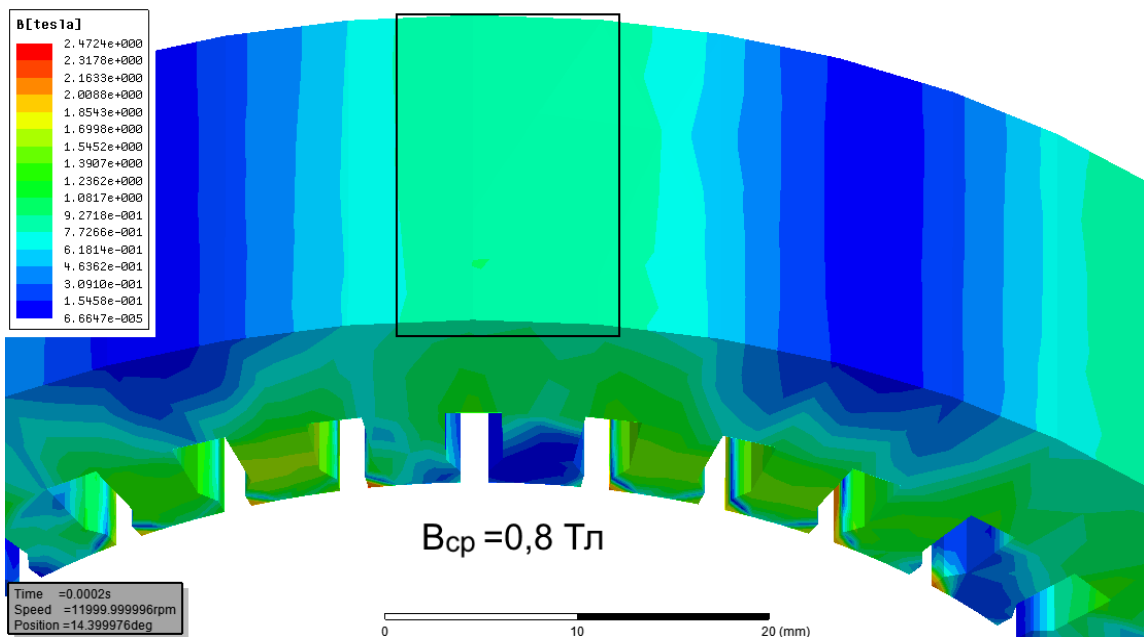


Рисунок 3.17 - Картина распределения магнитной индукции в спинке якоря радиальной ЭМ

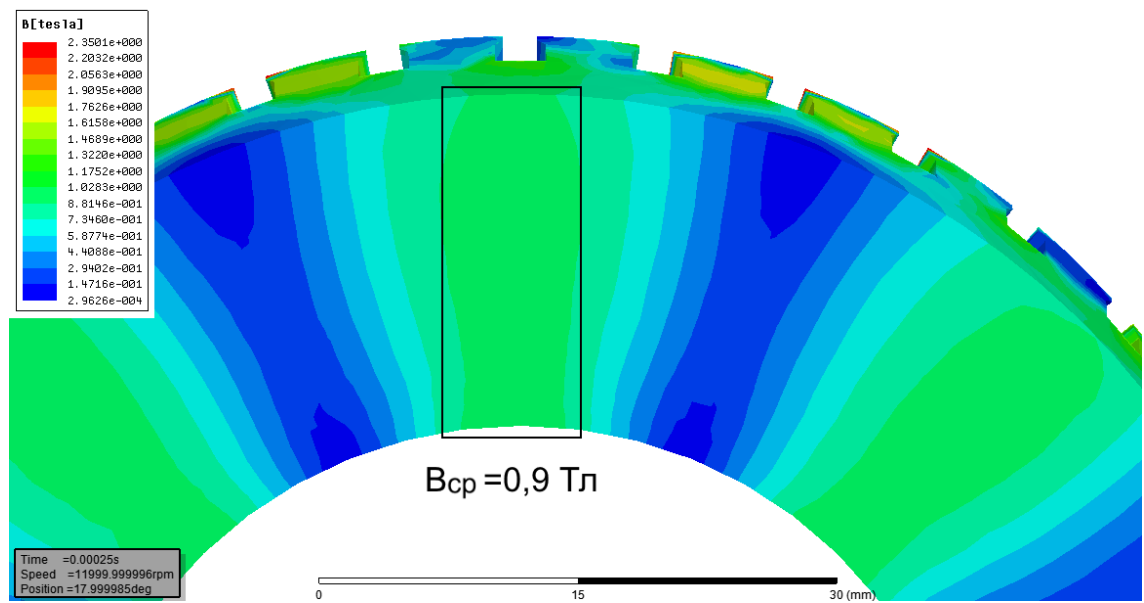


Рисунок 3.18 - Картина распределения магнитной индукции в спинке якоря аксиальной ЭМ

На среднем диаметре магнитная индукция в воздушном зазоре модели аксиальной ЭМ равна величине магнитной индукции в воздушном зазоре модели радиальной ЭМ. При этом, в направлении от среднего к внутреннему диаметру модели аксиальной ЭМ магнитная индукция в воздушном зазоре уменьшается, в направлении от среднего к наружному диаметру модели аксиальной ЭМ магнитная индукция в воздушном зазоре увеличивается, причем изменение величины магнитной индукции по всей длине активной

зоны модели аксиальной ЭМ происходит таким образом, что вдоль длины активной зоны среднее значение магнитной индукции в воздушном зазоре эквивалентных моделей аксиальной и радиальной ЭМ практически одинаково.

При переходе от радиального конструктивного исполнения эквивалентных ЭМ к аксиальному изменение угла наклона воздушного зазора к оси вращения ротора сопровождается изменением ширины зубцов в магнитопроводе якоря. В связи с этим, следует учитывать ограничения, накладываемые на конструкцию ЭМ исходя из прочности и максимально допустимой электромагнитной нагрузки. Ширина зубца радиальной ЭМ равна ширине зубца эквивалентной аксиальной только на среднем диаметре аксиальной ЭМ, при этом на внешнем диаметре ширина зубца больше, а на внутреннем диаметре – меньше. В случае, если ширина зубца исходной радиальной ЭМ составляет минимально возможную величину, то у эквивалентной аксиальной ЭМ ширина зубца на внутреннем диаметре будет меньше минимально возможной величины, что недопустимо. Поэтому для радиальной ЭМ не всегда можно найти эквивалентную аксиальную, но для любой аксиальной ЭМ всегда можно найти эквивалентную радиальную. Исходя из этого можно с уверенностью утверждать, что математический аппарат для проектирования радиальных ЭМ можно использовать при расчёте такой радиальной ЭМ, для которой гарантированно можно определить проектируемую эквивалентную аксиальную (или коническую) ЭМ с такими же энергетическими показателями.

Проведенные исследования подтвердили, что характеристики эквивалентных ЭМ с ПМ различного конструктивного исполнения одинаковы при условии их работы в ненасыщенном режиме. При насыщении стали хотя бы в одной из ЭМ эквивалентность перестает соблюдаться.

При переходе от радиальной к эквивалентной аксиальной ЭМ изменяется масса ротора и расстояние от оси вращения до центра масс ротора, а значит, изменяется момент инерции ротора. Поэтому переходные процессы, например, в эквивалентных радиальной и аксиальной ЭМ, будут протекать с разной скоростью. Наибольшее быстродействие будет иметь радиальная ЭМ, у которой ротор расположен внутри статора (внутренний ротор), наименьшее быстродействие будет иметь радиальная ЭМ, у которой статор расположен внутри ротора (внешний ротор), средним быстродействием будет обладать аксиальная ЭМ, у которой статор и ротор расположены рядом.

Стоит отметить, что эквивалентность ЭМ с разным углом наклона воздушного зазора к оси вращения ротора соблюдается тем лучше, чем больше диаметр эталонной

окружности и число полюсов, и меньше активная длина. Для ЭМ небольших размеров соблюдение эквивалентности затруднено из-за значительного изменения объёма стали и потоков рассеяния в относительных единицах при эквивалентных преобразованиях. Это необходимо учитывать при использовании формул эквивалентного преобразования.

Следует понимать, что сравнение параметров двух эквивалентных ЭМ даёт хорошие результаты при расчётах, однако, его практическое применение (при построении двух эквивалентных ЭМ) зависит от множества факторов, включая технологию изготовления. Поэтому, несмотря на хорошие результаты компьютерного моделирования, на практике достижение эквивалентности двух ЭМ разного конструктивного исполнения является весьма непростой задачей.

3.3 Анализ зависимости оптимального соотношения главных размеров генератора авиационного ветроэнергетического комплекса от его формы

Для определения размеров конического генератора с ПМ для перспективного АВЭК необходимо установить оптимальную величину его главных размеров. Для определения этого соотношения для конических ЭМ, необходимо проанализировать аналогичные соотношения для радиальных и аксиальных ЭМ и выявить общие закономерности.

Для радиальных ЭМ, пренебрегая величиной воздушного зазора, можно утверждать, что в соотношении $\frac{l_i}{D}$ диаметр D определяет расстояние от оси вращения ротора до середины воздушного зазора. Тогда при эквивалентных преобразованиях этот диаметр будет являться диаметром эталонной окружности, относительно которой будет происходить эквивалентное преобразование исходной ЭМ, т.е.

$$D \approx D_0 = 2R_0 \quad (3.20)$$

Из опыта проектирования радиальных ЭМ известно, что важное значение имеют величины λ_i или λ'_i :

$$\lambda_i = \frac{l_i}{D} = \frac{l_i}{D_0} \quad (3.21)$$

$$\lambda'_i = \frac{\tau}{D} \quad (3.22)$$

где τ – полюсное деление.

Учитывая, что при эквивалентных преобразованиях значения активной длины l_i магнитопроводов и диаметр эталонной окружности D_0 не меняются, то для эквивалентных ЭМ будут справедливы следующее равенства:

$$\lambda_i = const \quad (3.23)$$

$$\lambda'_i = const \quad (3.24)$$

Это означает, что независимо от величины угла наклона воздушного зазора к оси вращения ротора для всех ЭМ, эквивалентных для исходной радиальной, будут справедливы зависимости величины λ_i от числа пар полюсов p , полученные для радиальных ЭМ на основе опыта их эксплуатации (рис. 3.19) [5, с.32].

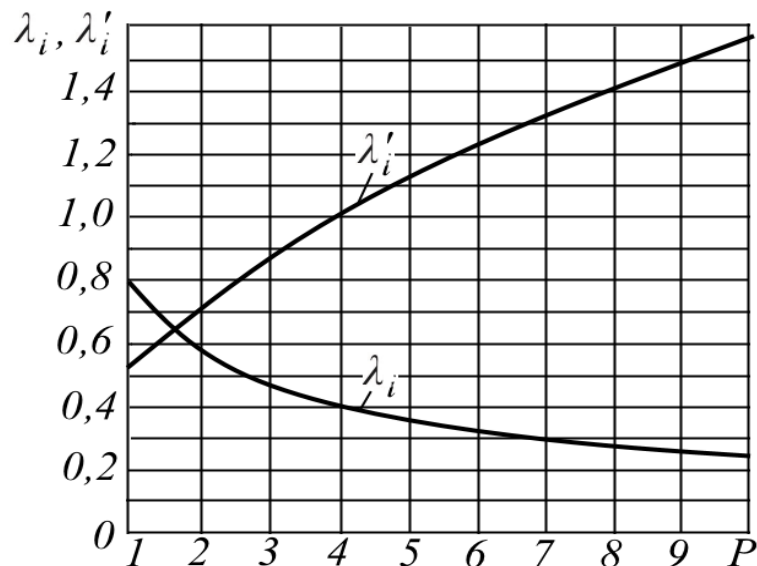


Рисунок 3.19 - Оптимальное отношение расчётной длины магнитопровода якоря к диаметру эталонной окружности или к полюсному делению в радиальных ЭМ

Из опыта проектирования ЭМ общего назначения известно, что исходя из величины λ_i проектируемая ЭМ может быть «короткой» ($\lambda_i < 0,4$), «длинной» ($\lambda_i > 1,4$) и «средней». Необходимо знать достоинства «длинных» и «коротких» ЭМ, а именно - в «длинных» ЭМ использование активных материалов более эффективно, т.е. при одинаковой частоте вращения и мощности «длинные» ЭМ требуют при изготовлении меньше активных материалов, чем «короткие». У длинных ЭМ лучше динамические свойства (меньше время разгона и торможения), но они хуже охлаждаются (а, следовательно, имеют более высокие рабочие температуры), у них больше прогиб вала [61, с. 45].

Представленные на рис. 3.19 графики дают ориентировочные значения при выборе величин λ_i и λ'_i . Оптимальная величина λ_i при выбранном числе пар полюсов зависит также от формы магнитов (круглая, сегментная, призматическая), мощности ЭМ, номинальной частоты вращения генератора. При увеличении диаметра эталонной окружности величина λ_i снижается. Это нарушение законов геометрического подобия вызывается необходимостью учёта условий охлаждения и тем, что оптимум отношения λ_i уменьшается с увеличением мощности.

Величина λ'_i одинакова для всех эквивалентных ЭМ при условии, что величина полюсного деления τ рассматривается на среднем диаметре $D_{cp} \approx D_0$ эквивалентной ЭМ, как показано на рис. 3.20.

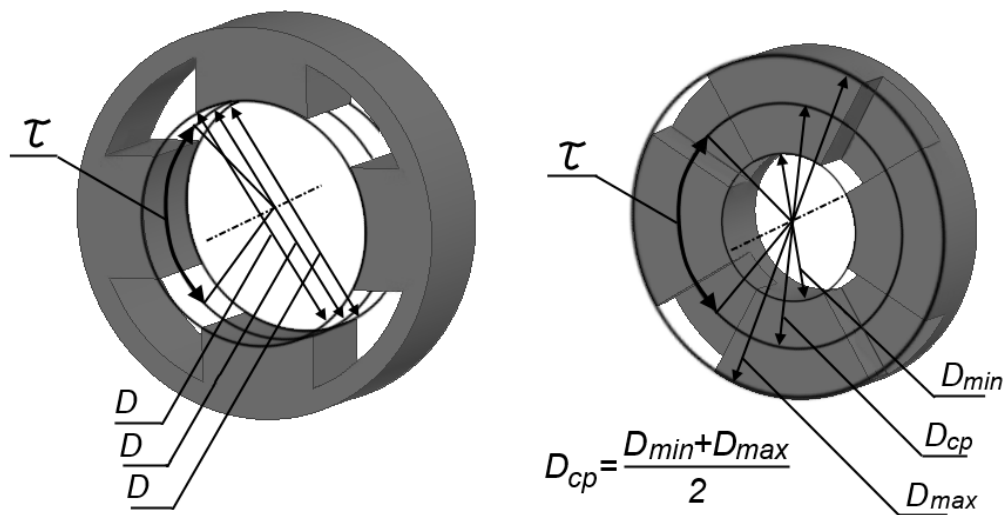


Рисунок 3.20 - К определению полюсного деления у эквивалентных ЭМ

Для генераторов автономных систем электроснабжения нет четких закономерностей при выборе отношения λ_i . Практика проектирования радиальных ЭМ показывает, что отклонение в пределах $\pm 20\%$ от оптимальной величины не вызывает заметного ухудшения характеристик ЭМ. Для определения соответствия размеров радиальных и аксиальных ЭМ на рис. 3.21 изображены магнитопроводы якоря и индуктора генераторов с ПМ (в разрезе) [62, 79].

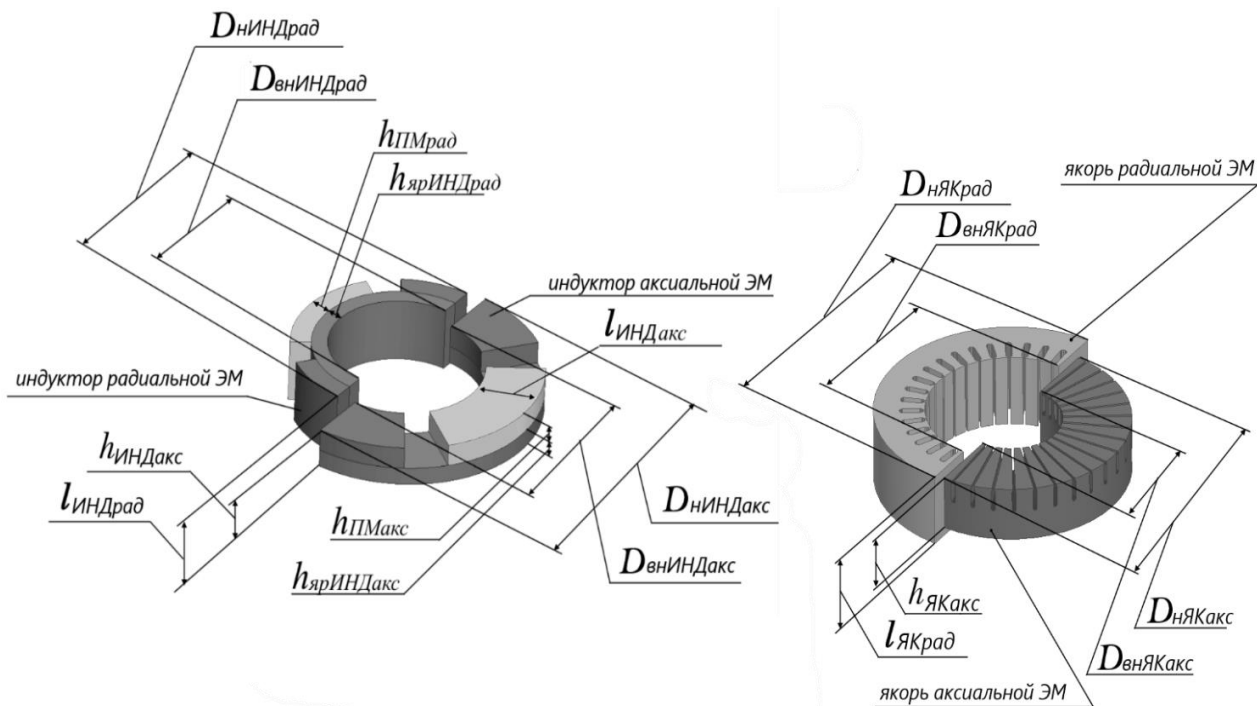


Рисунок 3.21 - К определению основных размеров эквивалентных аксиальных и радиальных ЭМ с ПМ

При преобразовании исходной радиальной в эквивалентную аксиальную ЭМ необходимо учитывать соотношение внутреннего и наружного диаметров получаемой аксиальной ЭМ. В [33] приведена методика расчёта аксиальных ЭМ с постоянными магнитами различной формы. В [30] приведены подробные расчёты и получены значения оптимального соотношения внутреннего и наружного диаметров магнитопроводов аксиальных ЭМ, исходя из показателей электромагнитной мощности.

Для постоянных магнитов призматической формы (рис. 3.22, а)

$$D_{вн} = 0,667 \cdot D_{н} \quad (3.25)$$

Для постоянных магнитов сегментной формы (рис. 3.22, б):

$$D_{вн} = 0,578 \cdot D_{н} \quad (3.26)$$

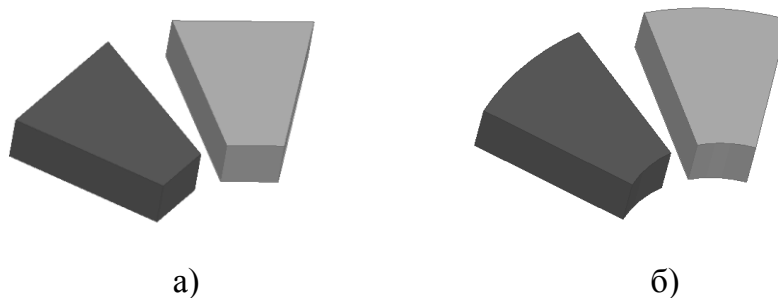


Рисунок 3.22- Постоянные магниты призматической (а) и сегментной (б) формы

В [30, с.64] показано, что оптимальное соотношение внутреннего и наружного диаметров аксиальных ЭМ, исходя из показателей электромагнитной мощности, находится по соотношению:

$$D_{\text{ВН}} = 0,33 \cdot D_{\text{Н}} \quad (3.27)$$

Если же кроме показателя электромагнитной мощности учесть показатель экономической эффективности, то согласно [30, с.66] оптимальное соотношение внутреннего и наружного диаметров аксиальных ЭМ находится в пределах:

$$0,5 < \frac{D_{\text{ВН}}}{D_{\text{Н}}} < 0,625 \quad (3.28)$$

Расчётная активная длина l_i магнитопровода аксиальной ЭМ равна:

$$l_i = \frac{D_{\text{Н}} - D_{\text{ВН}}}{2} \quad (3.29)$$

В аксиальных ЭМ средний диаметр равен диаметру эталонной окружности:

$$D_{\text{СР}} = \frac{D_{\text{Н}} + D_{\text{ВН}}}{2} = D_0 = 2R_0 \quad (3.30)$$

Тогда выражение (3.21) для аксиальных ЭМ будет иметь вид:

$$\lambda_i = \frac{l_i}{D_0} = \frac{D_{\text{Н}} - D_{\text{ВН}}}{D_{\text{Н}} + D_{\text{ВН}}} \quad (3.31)$$

Выражение (3.31) для аксиальных ЭМ является аналогом отношения $\frac{l_i}{D}$, известного из опыта проектирования радиальных ЭМ.

Выражения (3.25)-(3.28) можно обобщить, утверждая, что внутренний и наружный диаметр аксиальной ЭМ связаны следующим соотношением:

$$D_{\text{ВН}} = k_{\text{Дакс}} \cdot D_{\text{Н}}, \quad (3.32)$$

где $k_{\text{Дакс}}$ – коэффициент пропорциональности наружного и внутреннего диаметров, причём $k_{\text{Дакс}} < 1$.

Тогда выражение (3.21) можно преобразовать к следующему виду:

$$\lambda_i = \frac{1 - k_{\text{Дакс}}}{1 + k_{\text{Дакс}}} \quad (3.33)$$

Произведем обратное вычисление – найдем величину λ_i для оптимальных значений $k_{\text{Дакс}}$.

Для выражения (3.25):

$$\text{при } k_{\text{Дакс}}=0,667 \text{ получим: } \lambda_i=0,2 \quad (3.34)$$

Для выражения (3.26):

$$\text{при } k_{\text{Дакс}}=0,578 \text{ получим: } \lambda_i=0,27 \quad (3.35)$$

Для выражения (3.27):

$$\text{при } k_{\text{Дакс}}=0,33 \text{ получим: } \lambda_i=0,5 \quad (3.36)$$

Для выражения (3.28):

$$\text{при } 0,5 < k_{\text{Дакс}} < 0,625 \text{ получим: } 0,23 < \lambda_i < 0,33 \quad (3.37)$$

Исходя из выражений (3.34)-(3.37) и данных, представленных на рис. 3.19, следует, что при соотношении наружного и внутреннего диаметров, оптимальном для генераторов аксиального исполнения, величина λ_i будет находиться на границе или за пределами области оптимальных значений для генераторов радиального исполнения.

Поэтому график зависимости оптимальных значений $\lambda_i(p)$ для аксиальных ЭМ должен располагаться ниже графика, представленного для радиальных ЭМ, как показано на рисунках 3.23 и 3.24. График, изображенный на рис. 3.23 для $\alpha=90^\circ$ приведен только исходя из выражений (3.34)-(3.37) и с учётом того, что отклонение в пределах $\pm 20\%$ от оптимальной величины не вызывает заметного ухудшения характеристик ЭМ, он может быть использован при проектировании аксиальных ЭМ для предварительных расчётов.

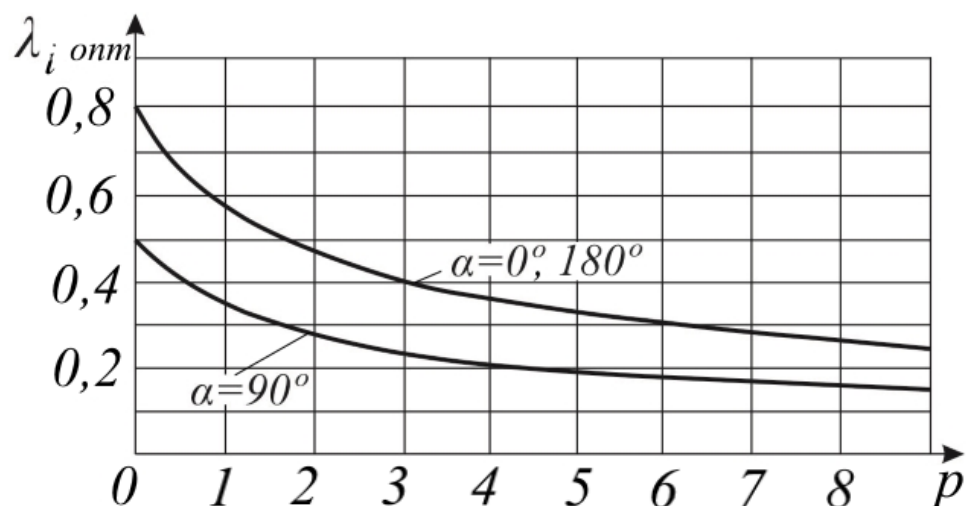


Рисунок 3.23 - Оптимальное отношение расчётной длины активной зоны магнитопровода к диаметру эталонной окружности для радиальных и аксиальных ЭМ

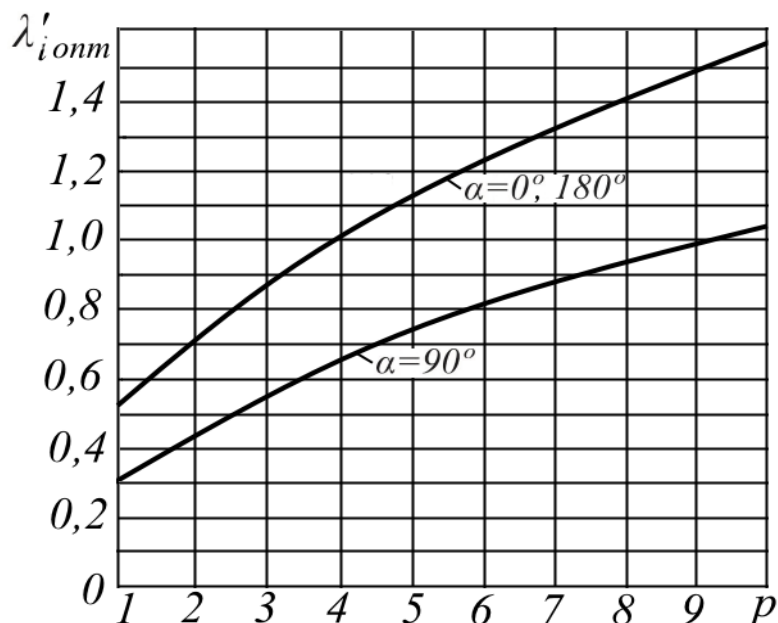


Рисунок 3.24 - Оптимальное отношение расчётной длины активной зоны магнитопровода к полюсному делению для радиальных и аксиальных ЭМ

Исходя из графиков, представленных на рисунках 3.23 и 3.24, следует, что для каждого значения угла наклона воздушного зазора к оси вращения ротора существует своя область оптимальных значений λ_i . При эквивалентных преобразованиях ЭМ необходимо учитывать этот факт и выбирать угол наклона воздушного зазора к оси вращения ротора для эквивалентной ЭМ таким образом, чтобы параметры проектируемой ЭМ оставались в области значений $\lambda_i(p)$, оптимальных для выбранного угла наклона воздушного зазора к оси вращения ротора. Это, в свою очередь, означает, что существует предельный угол наклона воздушного зазора к оси вращения ротора, превышение которого приведет к выходу величины отношения основных размеров проектируемой эквивалентной ЭМ за пределы зоны оптимальных значений, что крайне нежелательно.

Кроме того, из графиков, представленных на рисунках 3.23 и 3.24, следует, что для одинакового числа пар полюсов p при фиксированном диаметре эталонной окружности оптимальное значение λ_i в аксиальных ЭМ достигается при меньшей расчётной длине l_i магнитопровода якоря, чем в радиальных. Это является отличительной особенностью ЭМ аксиального конструктивного исполнения, которую следует учитывать на начальном этапе проектирования ЭМ при выборе её конструктивного исполнения.

Из выражения (3.33) определим зависимость $k_{\text{Дакс}}(\lambda_i)$:

$$k_{\text{Дакс}} = \frac{1 - \lambda_i}{1 + \lambda_i} \quad (3.38)$$

На рис. 3.25 изображен график зависимости $k_{D_{акс}}(p)$, построенный на основе данных, представленных на рис. 3.24.

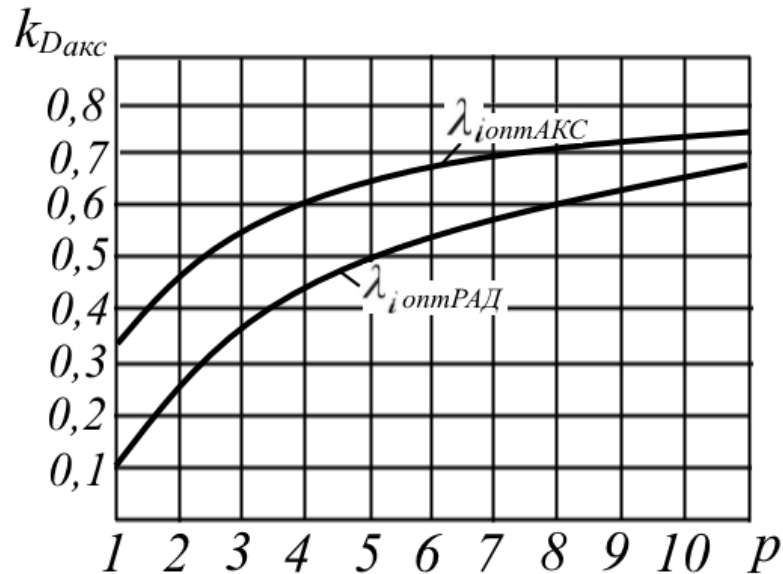


Рисунок 3.25 - Зависимость коэффициента наружного диаметра аксиальных ЭМ от числа пар полюсов

Из данных, представленных на рис. 3.25 следует, что для сохранения оптимальности соотношения основных размеров для аксиальных ЭМ с увеличением числа пар полюсов p внутренний диаметр $D_{вн}$ должен приближаться к наружному $D_{н}$, то есть активная длина l_i магнитопровода должна уменьшаться.

Таким образом, каждое из выражений (3.25)-(3.28) является наиболее оптимальным только при определенных условиях (при определенном числе пар полюсов, форме полюсов, мощности ЭМ, номинальной частоте вращения и др.).

Для определения соотношения главных размеров конического генератора обратимся к формуле, полученной эмпирическим путем [5, с. 32]:

$$\lambda = \frac{0,8}{\sqrt{p}} \quad (3.39)$$

Исходя из выражений (3.34)-(3.37), а также из данных, представленных на рисунках 3.23-3.25, формула (3.39) преобразована к виду (рис. 3.26):

$$\lambda_{опт} = \frac{0,8 - 0,3 \cdot \sin(\alpha)}{\sqrt{p}} \quad (3.40)$$

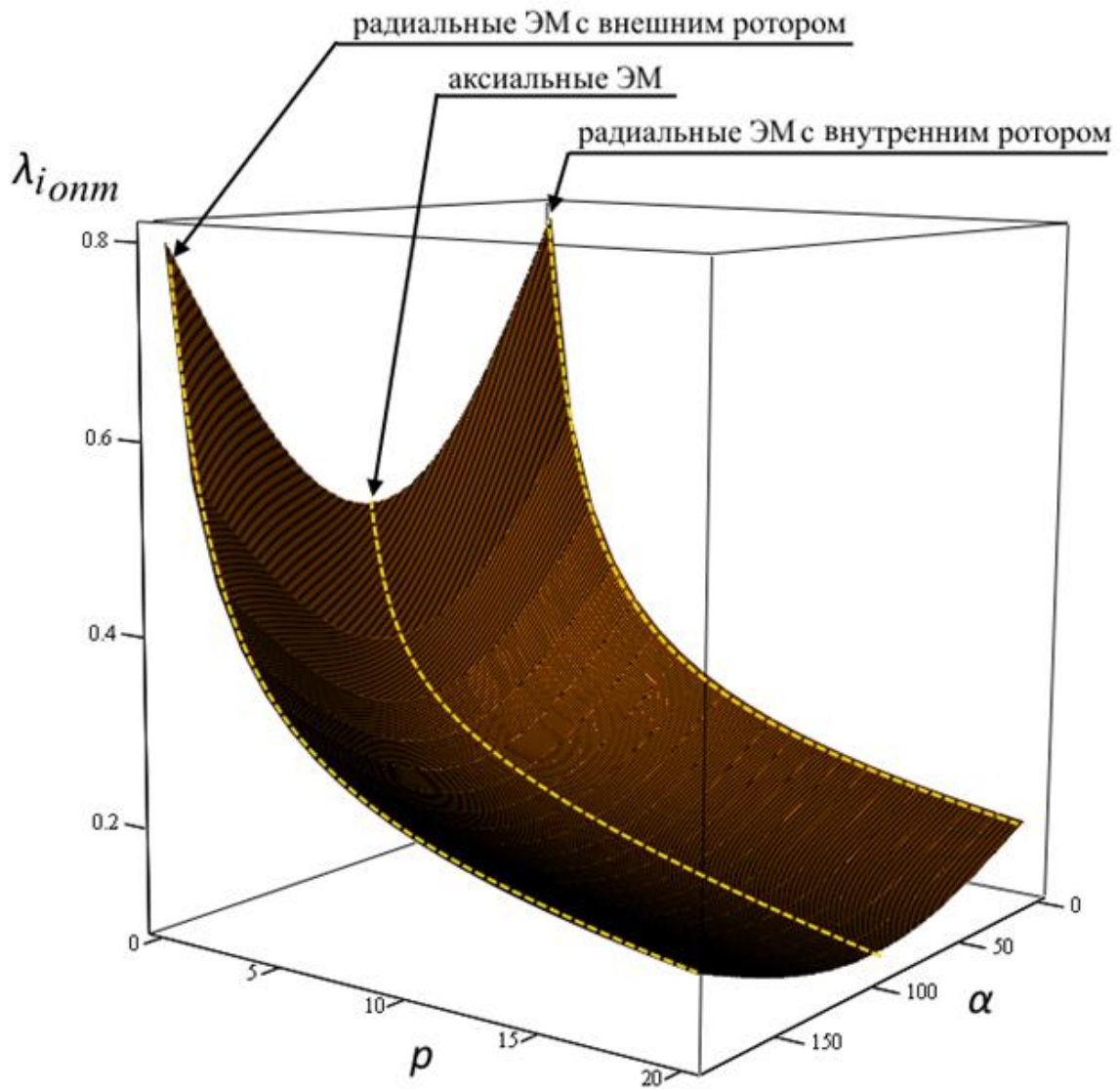


Рисунок 3.26 - Оптимальное отношение расчётной активной длины магнитопровода к диаметру эталонной окружности эквивалентных ЭМ

Анализ выражения (3.40) и монограмм, приведенных в [35] показывает, что с увеличением числа пар полюсов p оптимальное значение λ уменьшается, причем это характерно и для радиальных, и для аксиальных ЭМ, а значит, и для конических. Однако, при одном и том же числе пар полюсов радиальные и аксиальные ЭМ имеют разное значение λ , что вызвано уменьшением ширины зубцов на внутреннем диаметре в аксиальных ЭМ по сравнению с шириной зубцов в эквивалентных радиальных ЭМ. Это различие может быть представлено зависимостью от угла α наклона воздушного зазора к оси вращения ротора, определяющего форму ЭМ, так как при его изменении ширина зубцов в магнитопроводе якоря меняется в функции синуса этого угла. Таким образом, использование такого параметра как угол наклона воздушного зазора к оси вращения

ротора, определяющего форму ЭМ, позволило вывести выражение (3.40) для определения оптимального соотношения главных размеров в ЭМ различного конструктивного исполнения, применимое, в том числе, для конического генератора перспективного АВЭК [79].

3.4 Выводы по главе

В третьей главе решены следующие задачи:

1. Выдвинуто и доказано предположение о возможности создания эквивалентных ЭМ с ПМ различного конструктивного исполнения, обладающих одинаковыми энергетическими показателями;
2. Выведены формулы эквивалентного преобразования ЭМ, представляющие собой развитие теории подобия ЭМ;
3. Выполнен анализ зависимости соотношения главных размеров ЭМ с ПМ от выбора их конструктивного исполнения, позволивший определить оптимальные (с точки зрения энергетической мощности и использования активных материалов) главные размеры ЭМ с ПМ при разных значениях угла наклона воздушного зазора к оси вращения ротора.

ГЛАВА 4 РАСЧЁТ, ОПТИМИЗАЦИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРСПЕКТИВНОГО АВИАЦИОННОГО ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

4.1 Разработка методики проектирования авиационного ветроэнергетического комплекса

4.1.1 Методика проектирования ветроколеса для авиационного ветроэнергетического комплекса

В современных АВЭЖ используют лопасти, имеющие специальный аэродинамический профиль, обеспечивающий высокий коэффициент использования энергии воздушного потока. Принцип работы ветроколеса поясняет план скоростей воздушного потока, набегающего на элемент лопасти, и действующих сил (рис. 4.1).

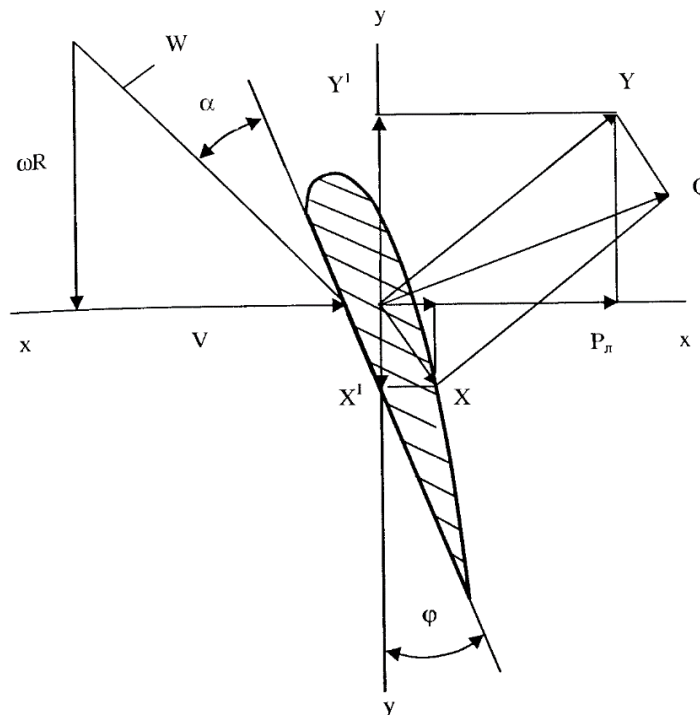


Рисунок 4.1 - План скоростей и сил, действующих на элемент лопасти АВЭЖ

Воздушный поток подходит к лопасти со скоростью V . Вследствие вращения ветроколеса в плоскости y - y элемент лопасти встречает воздушный поток со скоростью ωR . Скорости V и ωR , слагаясь геометрически, дают результирующую скорость W , с которой

воздушный поток набегает на элемент лопасти под углом атаки α относительно хорды лопасти. Скорость W , называемая относительной, вызывает силу Q , которую можно разложить на подъёмную силу Y и силу сопротивления X , которая увеличивает лобовое давление $P_{л}$ и создаёт составляющую сопротивления вращению X' . Составляющая силы Y' , действующая по оси y - y , обеспечивает вращение ветроколеса. Угол между хордой лопасти и осью y - y в плоскости вращения называют углом заклинения φ .

Из результатов продувок моделей ветроколес в аэродинамических трубах известно, что подъёмная сила лопасти имеет наибольшую величину при малых углах атаки α , равных 2° - 8° . Прямая лопасть, имеющая постоянный угол заклинения φ вследствие разных значений окружной скорости, имеет угол атаки α , изменяющийся по длине лопасти в широких пределах (рис. 4.2).

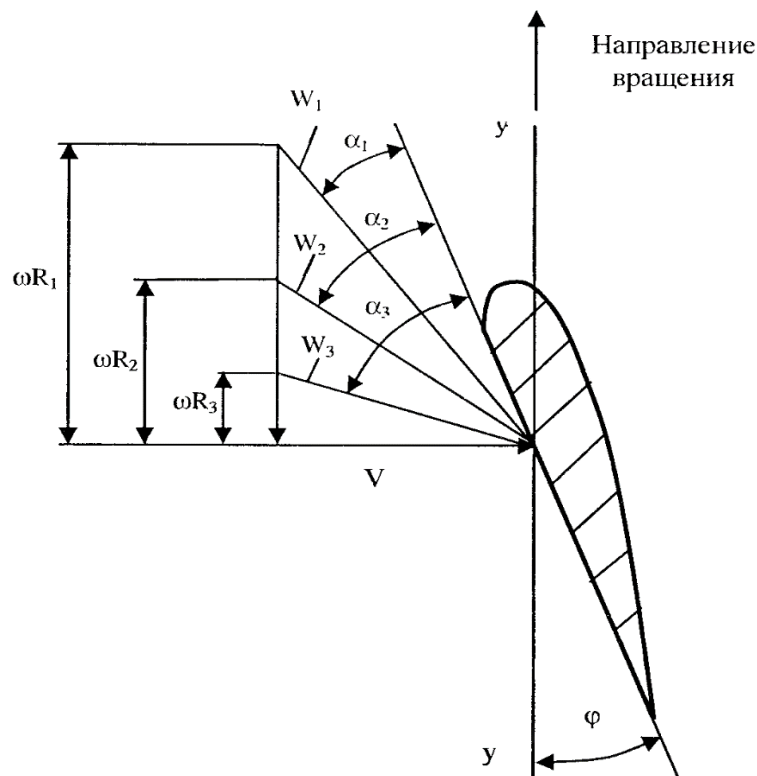


Рисунок 4.2 - План скоростей воздушного потока, набегающего на прямую лопасть

Для того, чтобы иметь угол атаки на заданном уровне по всей длине лопасти, необходимо увеличивать угол заклинения φ каждого сечения по мере приближения к оси вращения ветроколеса (рис. 4.2). В этом случае можно добиться того, что воздушный поток будет набегать на лопасть по всей её длине с постоянным, наиболее выгодным углом атаки α . Лопасть, выполненная таким образом, будет иметь переменный по длине лопасти

угол заклинения φ и винтообразную форму, которая является аэродинамически наиболее совершенной. В качестве примера приведен типовой расчёт лопастей ветроколеса, однако, форма и размеры лопастей должны быть уточнены после продувок в аэродинамической трубе. Эта проблема выходит за рамки данного диссертационного исследования и требует отдельного рассмотрения.

Зависимость величины развиваемого момента ветроколеса в функции быстроходности Z , определяемой как отношение величины окружной скорости конца лопасти радиусом R к действующему значению скорости воздушного потока V , определяет аэродинамическую характеристику ветроколеса АВЭЖ (рис. 4.3).

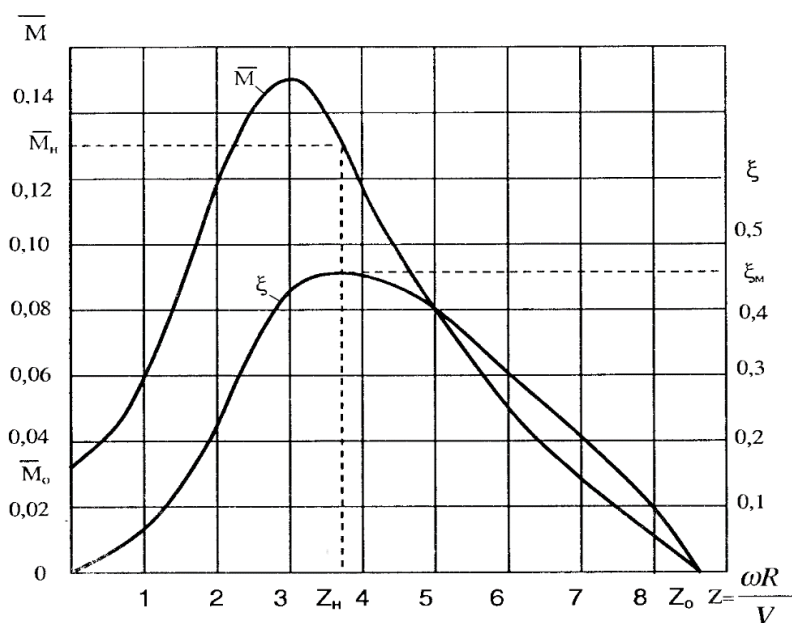


Рисунок 4.3 - Пример аэродинамической характеристики ветроколеса АВЭЖ

По вертикальной оси графика аэродинамической характеристики откладываются значения крутящего момента в относительных величинах \bar{M} :

$$\bar{M} = \frac{2M}{\pi R^3 \rho V^2} \quad (4.1)$$

где M – развиваемый ветроколесом момент, ρ – плотность воздуха.

Из приведенной формулы следует, что:

$$M = \bar{M} \pi R^3 \frac{\rho V^2}{2} \quad (4.2)$$

Для многолопастных ветроколес величина Z имеет меньшее значение, при этом ветроколесо развивает полную мощность на меньших оборотах, для малолопастных с 2-3

лопастями (быстроходных) Z имеет большее значение, при этом ветроколесо развивает полную мощность на больших оборотах.

Ещё одним важным параметром является коэффициент использования энергии воздушного потока ξ (рис. 4.4). Этот параметр во многом определяется выбором типа ветроколеса.

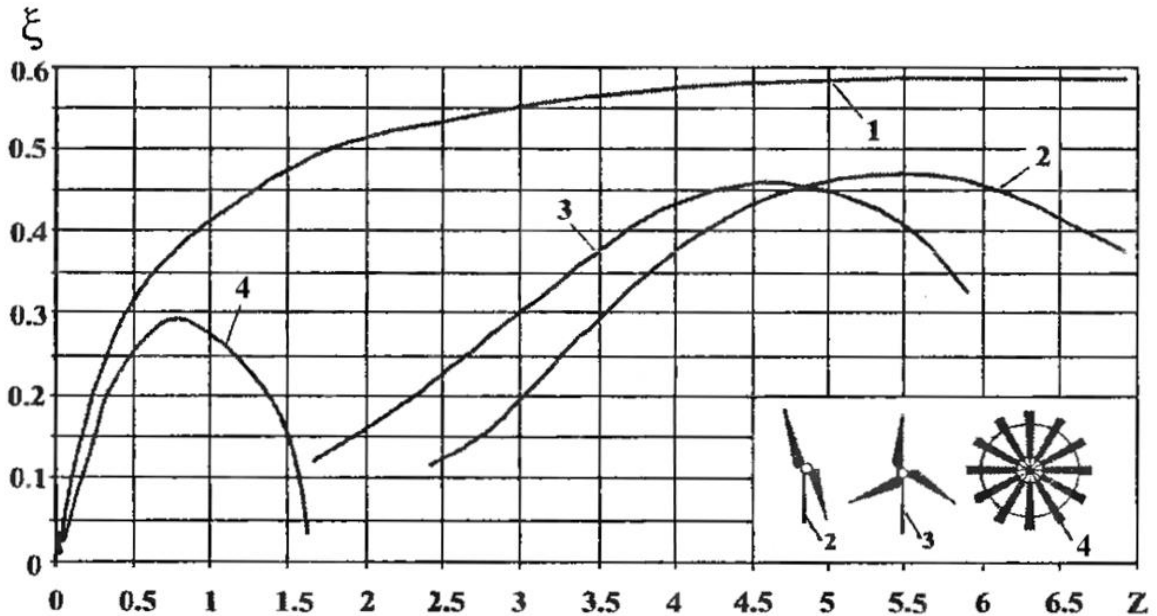


Рисунок 4.4 - Зависимость коэффициента использования энергии воздушного потока от безразмерной скорости вращения для ветроколес: 1 – идеального, 2 – быстроходного двухлопастного, 3 – быстроходного трёхлопастного, 4 – тихоходного многолопастного.

Коэффициент использования энергии воздушного потока определяется как отношение развиваемой ветроколесом мощности к мощности воздушного потока:

$$\xi = \frac{M \omega}{\pi R^2 \frac{\rho V^3}{2}} = \frac{\bar{M} \pi R^3 \frac{\rho V^2}{2} \omega}{\pi R^2 \frac{\rho V^3}{2}} = \frac{\bar{M} \omega R}{V} = \bar{M} Z \quad (4.3)$$

При проектировании ветроколеса необходимо знать следующие важные параметры:

Z_H – нормальная быстроходность ветроколеса, при которой коэффициент использования энергии воздушного потока является максимальным (Z_H находится на горизонтальной оси характеристики, представленной на рис. 4.3, под вершиной кривой ξ).

\bar{M}_H – нормальный относительный крутящий момент (на пересечении кривой \bar{M} с вертикалью, проходящей через Z_H на рис. 4.3)

\bar{M}_0 – начальный относительный момент или момент трогания ветроколеса при $Z=0$.

Z_0 – синхронная быстроходность, при которой относительный момент $\bar{M}=0$.

При расчёте ветроколеса АВЭК необходимо учитывать накопленный опыт их создания, а именно:

- чем больше число лопастей, их ширина и угол заклинения, тем ниже Z_0 и выше \bar{M}_0 ;
- у быстроходных колёс величина \bar{M}_0 в несколько раз меньше \bar{M}_H , а синхронная быстроходность Z_0 в 2-2,5 раза выше Z_H ;
- мощность ветроколеса при прочих равных условиях мало зависит от количества лопастей, основное влияние на мощность оказывают диаметр ветроколеса, профиль лопастей, правильный выбор угла заклинения [142].

При проектировании АВЭК необходимо учитывать, что мощность ветроколеса на развиваемых оборотах должна соответствовать мощности генератора.

Для установившегося режима работы:

$$P_{\text{ВК}} = P_{\text{ГЕН}} + P_{\text{ПОТ}} \quad (4.4)$$

где $P_{\text{ВК}}$ – мощность ветроколеса, $P_{\text{ГЕН}}$ – мощность генератора, $P_{\text{ПОТ}}$ – общая мощность потерь.

Для вычисления мощности ветроколеса будем считать, что:

$$P_{\text{ПОТ}} = 0,05 \cdot P_{\text{ГЕН}} \quad (4.5)$$

Тогда для установившегося номинального режима работы:

$$P_{\text{ВК}} = 1,05 \cdot P_{\text{ГЕН}} \quad (4.6)$$

Исходя из того, что мощность проектируемого генератора должна быть равна мощности генератора, установленного на АВЭК самолёта Sukhoi SuperJet-100, выберем мощность ветроколеса равную $P_{\text{ВК}} = 16$ кВт.

Ниже представлен расчёт ветроколеса пропеллерного типа по известной методике.

1. Выбор числа лопастей

Как уже было сказано выше, число лопастей практически не влияет на мощность ветроколеса. Причина этого следующая: мощность ветроколеса определяется произведением развиваемого вращающего момента M и угловой скорости вращения ω :

$$P_{\text{ВК}} = M \cdot \omega \quad (4.7)$$

С уменьшением числа лопастей момент уменьшается, однако примерно в той же пропорции увеличивается угловая скорость, таким образом, произведение $M \cdot \omega$ остается

почти постоянным, мало зависящим от числа лопастей [145]. Поэтому количество лопастей предварительно выберем равным 2, как и в АВЭК, установленном на самолёте Sukhoi SuperJet-100.

2. Наружный диаметр ветроколеса:

Для заданной мощности диаметр ветроколеса определяется по формуле:

$$D_{\text{ВК}} = \sqrt{\frac{8P_{\text{ВК}}}{C_p \rho v^3 \pi \eta_{\text{эл}} \eta_{\text{мех}}}} \quad (4.8)$$

Учитывая, что ветроколесо должно работать при скорости полёта самолёта, а плотность воздуха, набегающего на лопасти ветроколеса, зависит от высоты полёта, вычислим диаметр ветроколеса при двух крайних условиях:

Высота равна 5000 м, плотность воздуха на этой высоте $\rho=0,74 \text{ кг/ м}^3$, скорость воздушного потока $v=270 \text{ (км/ч)}=75 \text{ (м/с)}$ – условия, при которых АВЭК начинает работать в разреженной атмосфере.

$$\text{Вычисляем: } D_{\text{ВК}} = \sqrt{\frac{8 \cdot 16000}{0,42 \cdot 0,74 \cdot 75^3 \cdot 3,14 \cdot 0,89 \cdot 0,94}} = 0,65 \text{ м}$$

В отличие от наземных ветроэнергетических комплексов для определения условий работы АВЭК необходимо учитывать одновременное изменение скорости и высоты полёта при снижении (планировании) ВС. На высоте плотность воздуха меньше, чем у земли, поэтому для обеспечения постоянства мощности АВЭК на бóльшей высоте необходимо выдерживать бóльшую скорость полёта. Поэтому для расчётов на высоте 5000 м выбрана увеличенная скорость 270 км/ч. При снижении плотность воздуха увеличивается, при этом скорость полёта должна постепенно снижаться вплоть до посадочной, величина которой устанавливается индивидуально для каждого типа ВС. В реальных условиях необходимо определить диапазон допустимых скоростей на каждом эшелоне высот. Отсутствие необходимости стабилизации частоты напряжения расширяет границы условий работы АВЭК, при которых он обеспечивает напряжение на аварийных шинах от 18 до 31 В. Потому указанная в главе 2, п. 2.2 скорость полёта в диапазоне 200-240 км/ч может быть рассмотрена, например, как скорость ВС при полёте у земли перед посадкой. Режимы работы АВЭК (зависимость допустимой скорости от высоты полёта) должны быть уточнены при натурных испытаниях перспективного АВЭК в составе аварийной СЭС, имеющей предлагаемую структуру (рис. 2.1, глава 2, п. 2.1).

3. Внутренний диаметр ветроколеса, м

Так как лопасти будут крепиться на внешней конической поверхности магнитопровода индуктора, то внутренний диаметр лопасти примем равным диаметру генератора в самой узкой части конической поверхности индуктора.

$$d = 0,2 \cdot D_{\text{БК}} = 0,13 \quad (4.9)$$

4. Радиус ветроколеса, м

$$R = \frac{D_{\text{БК}}}{2} = 0,325 \quad (4.10)$$

5. Радиус расположения сечения лопасти, м

$$r_k = \bar{r}_k \cdot R \quad (4.11)$$

где \bar{r}_k - относительный радиус сечения лопасти,

$$\bar{r}_k = \bar{r}_0 + \frac{(1 - \bar{r}_0)(k - 1)}{(n - 1)} \quad (4.12)$$

$$\bar{r}_1 = 0,1, \bar{r}_2 = 0,325, \bar{r}_3 = 0,55, \bar{r}_4 = 0,775, \bar{r}_5 = 1$$

где \bar{r}_0 - относительный радиус расположения корневого сечения лопасти, k - номер сечения лопасти (от 1 до 5), n - число сечений лопасти

6. Относительный шаг между сечениями лопасти

$$\Delta \bar{r} = \frac{1 - \bar{r}_0}{n - 1} \quad (4.13)$$

Вычисляем:

$$\Delta \bar{r} = \frac{1 - 0,1}{5 - 1} = 0,225$$

7. Шаг между сечениями лопасти, м

$$\Delta r = \Delta \bar{r} \cdot R \quad (4.14)$$

$$\Delta r = 0,225 \cdot 0,325 = 0,073 \text{ м}$$

8. Коэффициент быстроходности сечения

$$Z_k = Z_R \cdot \bar{r}_k \quad (4.15)$$

Предварительно принимаем значение быстроходности $Z_R = 5$. Более точные данные о ветроколесе можно будет получить лишь после его продувки в аэродинамической трубе, так как использование справочных данных не представляется возможным по причине проектирования ветроколеса с отклонением от табличных значений исходя из особенностей конструкции проектируемого АВЭК.

Исходя из этого, быстроходность в каждом из пяти рассматриваемых сечений равна:

$$Z_1=0,5; Z_2=1,625; Z_3=2,75; Z_4=3,875; Z_5=5.$$

9. Хорда сечения лопасти, м

В связи с конической формой ступицы лопасти имеют вытянутую форму и крепятся на боковой конической поверхности. При этом хорда (ширина) лопасти увеличивается.

$$b_k = \bar{b}_k R \quad (4.16)$$

где \bar{b}_k - относительная хорда (в долях наружного радиуса колеса) сечения, рассчитывается по формуле:

$$\text{Выберем } \bar{b}_1 = \bar{b}_{\text{корн}} = 0,4; \bar{b}_2 = 0,35; \bar{b}_3 = 0,3; \bar{b}_4 = 0,25; \bar{b}_5 = \bar{b}_{\text{периф}} = 0,2.$$

где $\bar{b}_{\text{корн}}$ - относительная хорда (в долях радиуса лопасти) корневого сечения, $\bar{b}_{\text{периф}}$ - относительная хорда (в долях радиуса лопасти) сечения лопасти на периферии, R - радиус лопасти.

В отличие от ветроэнергетических комплексов, проектируемых для работы на энергии ветра у земли (например, для сельского хозяйства), в данном случае нет недостатка скорости набегающего воздушного потока, поэтому хорду в каждом сечении целесообразно выбрать увеличенной величины. Такой подход позволит повысить вращающий момент (при некотором уменьшении быстроходности) для гарантированного обеспечения работы электрогенератора на номинальном режиме.

Получаем следующие значения хорды на каждом сечении:

$$b_1 = b_{\text{корн}} = 0,130 \text{ м}, b_2 = 0,114 \text{ м}, b_3 = 0,098 \text{ м}, b_4 = 0,081 \text{ м}, b_5 = b_{\text{периф}} = 0,065 \text{ м}.$$

10. Углы заклинения лопасти в каждом сечении

При различных скоростях движения набегающего воздушного потока угол притекания воздушного потока меняется, вследствие чего меняется и угол атаки, а значит, и скорость вращения ветроколеса.

Угол притекания для каждого сечения вычисляется по формуле:

$$\beta_k = \arctg \left(\frac{1}{Z_{u_k}} \right) \quad (4.17)$$

где Z_{u_k} - число относительных модулей сечения

Для значений коэффициента быстроходности в каждом сечении имеем следующие значения Z_{u_k} :

$$Z_{u_1}=0,7, Z_{u_2}=2,4, Z_{u_3}=4,1, Z_{u_4}=6,0, Z_{u_5}=8.$$

Угол заклинения лопасти:

$$\varphi_k = \beta_k - \alpha_k \quad (4.18)$$

Для каждого сечения были вычислены углы притекания и углы заклинения из расчёта, что скорость набегающего потока равна 75 м/с (270 км/ч). Полученные результаты представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 - Углы, определяющие план скоростей и сил, действующих на лопасти ветроколеса при скорости воздушного потока 75 м/с (270 км/ч)

Номер сечения лопасти	1	2	3	4	5
Угол притекания лопасти β_k , град	59,8	29,9	18,2	14	11,7
Угол атаки α_k , град	4,7	1,2	0,2	0,5	2
Угол заклинения φ_k , град	55,1	28,7	18	13,5	9,7

Для построения профиля лопасти по всей её длине была построена зависимость угла заклинения по радиусу лопасти (рис. 4.5).

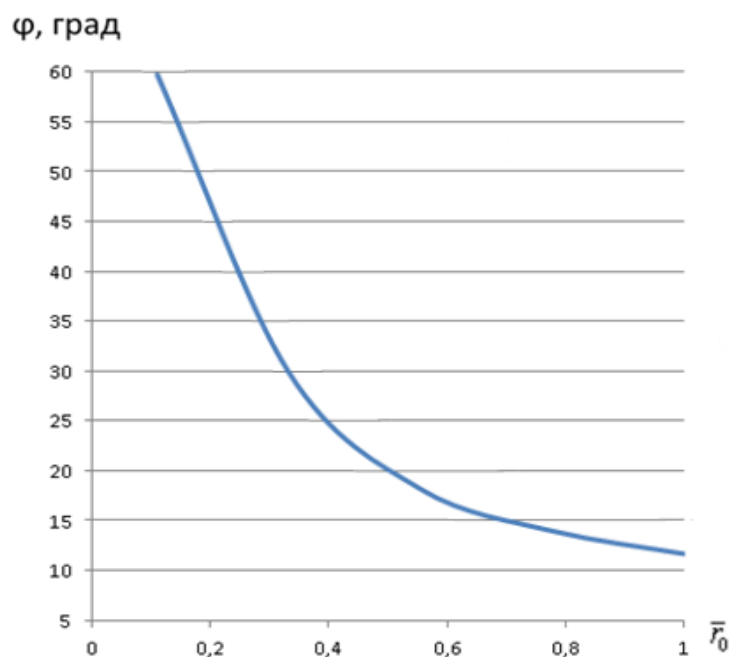


Рисунок 4.5 - Зависимость угла заклинения лопасти по радиусу

Таким образом, по известным формулам вычислены предварительные параметры ветроколеса, рассчитаны размеры и углы, определяющие форму и размер лопастей, позволяющие построить и проанализировать модель АВЭК, которые должны быть уточнены после продувки в аэродинамической трубе.

4.1.2 Методика проектирования генератора с постоянными магнитами для авиационного ветроэнергетического комплекса

Для расчёта конического генератора были проанализированы известные методики расчёта генераторов радиального и аксиального исполнения. Целью анализа являлось выявление общих положений при проектировании и расчёте различных параметров ЭМ. В результате проведенной работы была составлена методика, позволяющая рассчитать параметры ЭМ с ПМ для радиального, аксиального и конического конструктивного исполнения [77]. Все формулы, использованные в этой методике расчёта, можно разделить на две группы:

- известные формулы, оставленные без изменений [1, 5, 6, 7, 20, 32, 34, 35, 36, 41, 52, 53, 58, 61, 101, 103, 116, 117, 119, 123, 130, 135, 139, 147];
- выведенные формулы, учитывающие различие формы магнитной системы при различном конструктивном исполнении.

Для определения всех необходимых параметров конического генератора с ПМ использованы следующие выведенные формулы:

- 1). Формула определения рекомендуемого значения конструктивного коэффициента для ЭМ с заданным углом наклона воздушного зазора к оси вращения ротора:

$$\lambda_{\text{рек}} = \frac{0,8 - 0,3 \cdot \sin(\alpha)}{\sqrt{p}}$$

Данная формула (выражение (3.40)) выведена на основе анализа зависимости соотношения главных размеров генератора АВЭК от его формы, описанного в главе 3, п.3.3).

- 2). Формула определения диаметра эталонной окружности для эквивалентной ЭМ с выбранным углом наклона воздушного зазора к оси вращения ротора:

$$D_0 = D_{0\text{рад}} \cdot \sqrt[3]{\frac{\lambda_{\text{рад}}}{\lambda}} \quad (4.19)$$

Для вывода данной формулы обратимся к известной формуле определения расчётной мощности ЭМ [5, 41, 61, 101]:

$$S' = \frac{D^2 l' n A B_{\delta} \alpha' k_{\Phi} k_{\text{ОБ}}}{6,1 \cdot 10^7} \quad (4.20)$$

где S' - расчётная мощность ЭМ, D – диаметр расточки якоря (внутренний диаметр статора), l' – расчётная активная длина, n – частота вращения ротора, A – линейная нагрузка, B_{δ} - индукция в воздушном зазоре, α' - расчётный коэффициент полюсного перекрытия, k_{Φ} – коэффициент формы ЭДС, $k_{\text{ОБ}}$ – обмоточный коэффициент.

Из формулы (4.20) следует:

$$S' \sim D^3 \lambda \quad (4.21)$$

Если $n A B_{\delta} \alpha' k_{\Phi} k_{\text{ОБ}} = \text{const}$, то при неизменной расчётной мощности $S' = \text{const}$ получим:

$$D_1^3 \lambda_1 = D_2^3 \lambda_2 \quad (4.22)$$

где D_1 – диаметр расточки якоря для первого варианта расчёта, λ_1 – конструктивный коэффициент для первого варианта расчёта, D_2 – диаметр расточки якоря для второго варианта расчёта, λ_2 – конструктивный коэффициент для второго варианта расчёта.

Из выражения (4.22) следует:

$$D_2 = D_1 \cdot \sqrt[3]{\frac{\lambda_1}{\lambda_2}} \quad (4.23)$$

Для первого варианта расчёта (при $\alpha=0^\circ$) при заданных значениях $S', n, A, B_{\delta}, \alpha', k_{\Phi}, k_{\text{ОБ}}$ из формулы (4.20) для расчёта радиальных ЭМ определяется диаметр расточки якоря D_1 , который в соответствии с выражением (3.7) практически равен диаметру эталонной окружности $D_1 \approx D_{\text{орд}}$. По формуле (3.40) для радиальных ЭМ определяется оптимальное значение конструктивного коэффициента $\lambda_1 = \lambda_{\text{рад}}$.

Для второго варианта расчёта (при $\alpha \neq 0^\circ$) по формуле (3.39) для выбранного значения угла наклона воздушного зазора к оси вращения ротора определяется оптимальное значение конструктивного коэффициента λ_2 . Для эквивалентной ЭМ с выбранным углом $\alpha \neq 0^\circ$ термин «диаметр расточки якоря» уже не применим, поэтому по формуле (4.23), которая идентична формуле (4.19), определяем диаметр эталонной окружности, в зависимости от которого определяются некоторые другие параметры конических и аксиальных ЭМ. Таким образом, между D_0 и λ существует зависимость, график которой представлен на рис. 4.6.

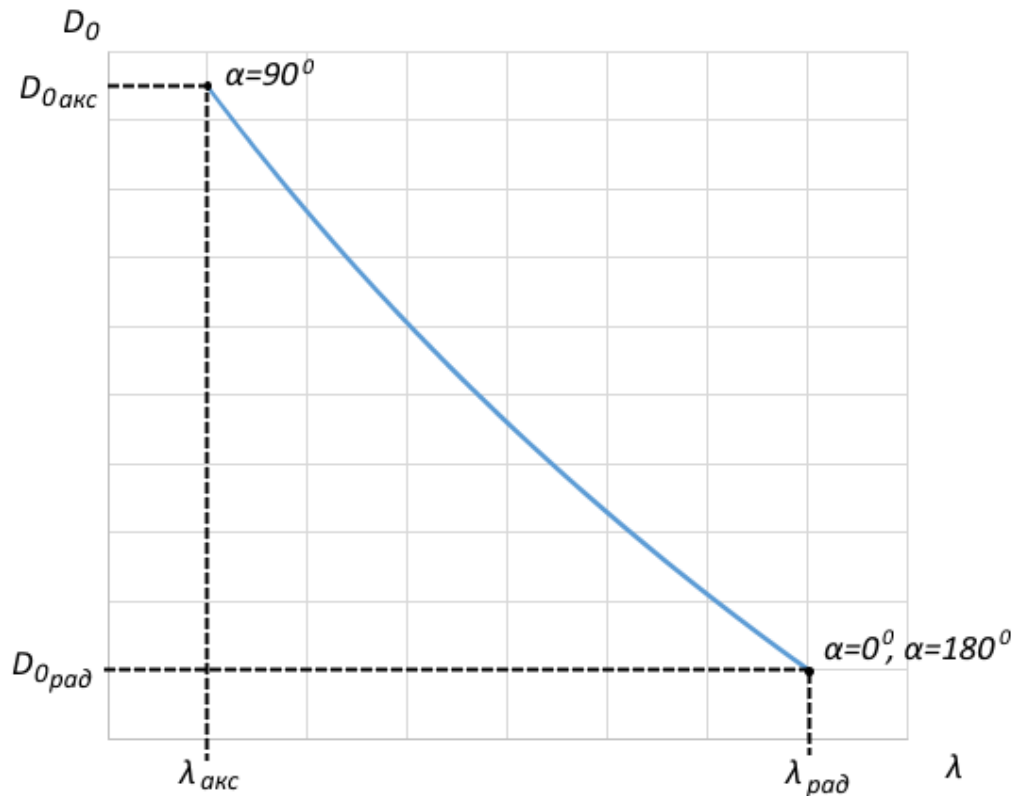


Рисунок 4.6 – Соотношение между диаметром эталонной окружности D_0 и конструктивным коэффициентом λ при постоянной мощности ЭМ

3). Формула определения критического угла наклона воздушного зазора к оси вращения ротора (выведена на основе анализа особенностей конструктивного исполнения конических ЭМ с ПМ, представленного в главе 2, п.2.3)

$$\alpha_{кр} = \arcsin \left(\frac{\pi D_0 - Z (b_{Z_{мин\ доп}} + b_{\Pi})}{\pi l} \right) \quad (4.24)$$

Так как изменение угла наклона воздушного зазора α к оси вращения ротора сопровождается изменением ширины зубцов в магнитопроводе якоря, то при массогабаритной оптимизации эквивалентных ЭМ следует учитывать ограничения, накладываемые на их конструкцию исходя из прочности и максимально допустимой электромагнитной нагрузки. В случае, если при изменении угла α ширина зубца на внутреннем диаметре магнитопровода якоря достигла минимально допустимого значения, то можно утверждать, что для рассматриваемого эквивалентного преобразования ЭМ с заданными параметрами достигнут критический угол наклона воздушного зазора к оси вращения ротора $\alpha_{кр}$.

Критический угол наклона воздушного зазора к оси вращения ротора для эквивалентных ЭМ рассчитывается в зависимости от минимальной величины ширины зубца якоря на внутреннем диаметре (в точке 1 на рис. 3.5, п. 3.1, глава 3).

При известной активной длине l можно вычислить радиус окружности с радиусом R_1 и центром на оси вращения ротора:

$$R_1 = R_0 + \frac{\delta}{2} \cos(\alpha) - \frac{l}{2} \sin(\alpha) \quad (4.25)$$

Длина окружности с радиусом R_1 и центром на оси вращения ротора равна:

$$L_1 = 2\pi R_1 = 2\pi \left(R_0 + \frac{\delta}{2} \cos(\alpha) - \frac{l}{2} \sin(\alpha) \right) \quad (4.26)$$

Тогда ширина зубца на этой (внутренней) окружности будет равна:

$$b_{Z_{ВН}} = \frac{L_1 - Z \cdot b_{П}}{Z} = \frac{2\pi \left(R_0 + \frac{\delta}{2} \cos(\alpha) - \frac{l}{2} \sin(\alpha) \right) - Z \cdot b_{П}}{Z} \quad (4.27)$$

Для $b_{Z_{ВН}} = b_{Z_{ВН}MIN}$ вычислим критический угол наклона воздушного зазора к оси вращения ротора $\alpha_{КР}$:

$$\sin(\alpha_{КР}) = \frac{2\pi \left(\frac{D_0 + \delta}{2} \cos(\alpha_{КР}) \right) - Z (b_{Z_{ВН}MIN} + b_{П})}{\pi l} \quad (4.28)$$

Величина воздушного зазора δ по сравнению с величиной D_0 мала и ей можно пренебречь. Это допущение позволяет упростить формулу для определения критического угла наклона воздушного зазора $\alpha_{КР}$ к оси вращения ротора, представленную выражением (4.28) и привести её к виду (4.24).

Минимальное значение величины $b_{Z_{ВН}MIN}$ может быть определено исходя из ограничений по прочности конструкции или по максимальной электромагнитной нагрузке в зубце магнитопровода якоря.

Таким образом, использование выведенных формул (3.40), (4.19) и (4.24) позволяет выполнить расчёт параметров радиальных, аксиальных и конических ЭМ с ПМ с учётом особенностей их конструктивного исполнения [77], что позволяет использовать их при расчёте генератора с ПМ для перспективного АВЭЖ.

Вышеперечисленные формулы не являются отдельной методикой проектирования ЭМ, однако, они позволяют дополнить и расширить известные методики проектирования радиальных ЭМ с ПМ для аксиальных и конических ЭМ. Полученная обобщенная методика представлена в приложении Г.

С точки зрения научной новизны, а также теоретической значимости важна не столько сама полученная методика, сколько способ её получения через принцип эквивалентности ЭМ различной конструкции. Применение такого подхода к ЭМ других типов – асинхронным, индукторным и др. позволит аналогичным образом создать методики проектирования различных типов ЭМ конического и аксиального исполнения.

Необходимость создания подобных методик расчёта вытекает из того, что они позволяют сравнивать и сопоставлять между собой показатели и параметры ЭМ, которые ранее трудно было сопоставить на этапе проектирования вследствие существенных различий известных методик для машин разного конструктивного исполнения.

4.2 Разработка методики массогабаритной оптимизации авиационного ветроэнергетического комплекса

Для определения массогабаритных показателей АВЭК необходимо учесть, что в общем случае он содержит:

- ветроколесо с лопастями;
- электрогенератор;
- регулятор угла установки лопастей (для регулирования частоты вращения ротора генератора);
- прочие узлы и агрегаты (подшипники, ось, корпус и др.).

Рассмотрим от чего зависят габаритные размеры L_x , L_y и L_z всего АВЭК.

Габаритный размер L_y определяется диаметром ветроколеса, который выбирается исходя из мощности электрогенератора. Таким образом, при прочих равных условиях для заданной мощности генератора уменьшить данный габаритный размер ветроколеса определенного типа нельзя. Однако, есть некоторые варианты решения этой проблемы:

1. Изменение профиля, улучшение аэродинамических характеристик лопасти. Использование новых материалов (композитных) может снизить массу лопастей и всего ветроколеса, а улучшение аэродинамических качеств лопасти - снизить лобовое сопротивление лопасти и увеличить её подъёмную силу. Однако, нахождение оптимальных аэродинамических качеств до построения реальной модели является трудновыполнимой задачей, поэтому применение этого технического решения возможно только на основе

продувок модели ветроколеса в аэродинамической трубе. Кроме того, в случае нахождения оптимальной геометрии лопасти дальнейшее улучшение её аэродинамических показателей станет невозможным;

2. Изменение аэродинамических характеристик АВЭК. Это возможно осуществить, например, за счёт изменения формы обтекателя ветроколеса. Применение этого технического решения возможно лишь на основе продувок модели АВЭК в аэродинамической трубе;

3. Применение концентратора воздушного потока. Такое техническое решение позволяет добиться уменьшения диаметра ветроколеса при той же мощности. Однако, масса и габариты самого концентратора воздушного потока ухудшают массогабаритные показатели всего АВЭК. Концентраторы воздушного потока имеются на АВЭК устаревших отечественных образцов, поэтому однозначно говорить о нецелесообразности их применения на ВС нельзя. Возможно создание легких и прочных концентраторов воздушного потока из современных композитных материалов, однако в данной работе этот вопрос не рассматривается исходя из выбранной конструкции АВЭК, описанной в главе 2, п. 2.1;

4. Изменение условий работы АВЭК, например, путем повышения номинальной скорости полёта ВС. Однако, повышение расчётной скорости работы АВЭК означает, что, например, при отказе всех двигателей необходимо увеличить скорость снижения, сократив тем самым максимальную дальность планирования. Исходя из того, что АВЭК предназначен, в конечном счёте, для повышения безопасности полёта, применение такого технического решения на ВС с целью улучшения массогабаритных показателей АВЭК нецелесообразно;

5. Применение ветроколеса другого типа. Как уже было отмечено, на современных АВЭК используется ветроколесо пропеллерного типа. Однако, существует большое многообразие типов ветроколес для наземных ветроэнергетических комплексов (рис. 4.7). Некоторые из них могут быть применены и на АВЭК. При этом для каждого ветроколеса методика проектирования будет разной. Сравнение характеристик двух различных ветроколес необходимо производить на основе результатов их продувок в аэродинамической трубе в условиях, близким к условиям полёта (скоростной напор и атмосферное давление).

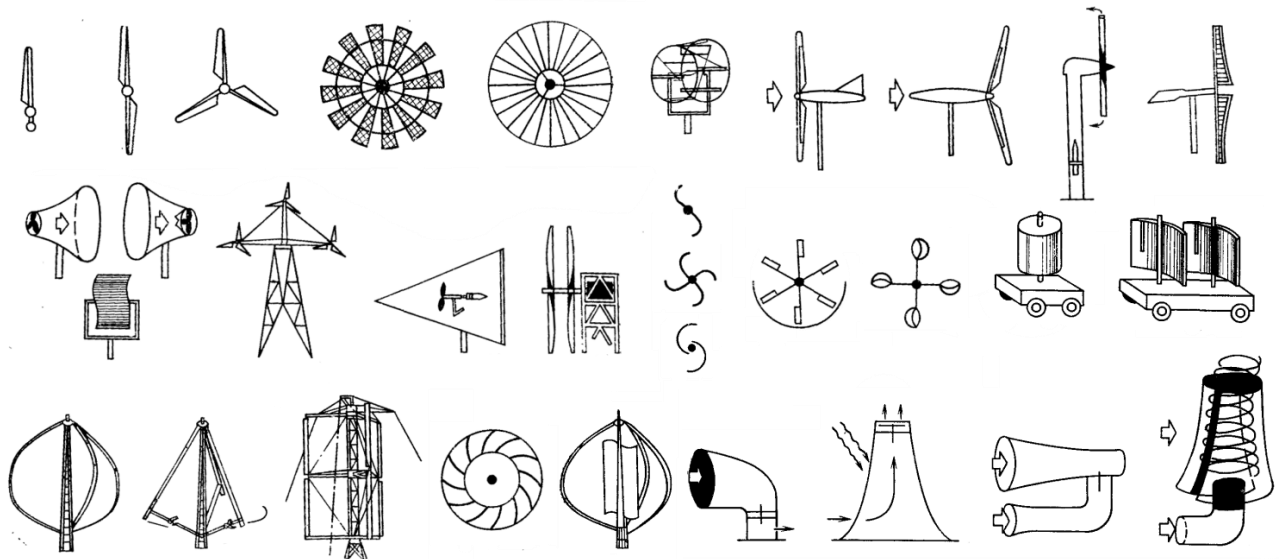


Рисунок 4.7 – Различные типы ветроколес для наземных ветроэнергетических комплексов

В связи с тем, что исследование аэродинамических характеристик ветроколеса выходит за рамки данного диссертационного исследования, для проектируемого АВЭК предлагается улучшить размер L_Y за счёт изменения аэродинамических характеристик АВЭК путем изменения формы ступицы ветроколеса;

Габаритный размер L_Z АВЭК зависит от числа лопастей. В АВЭК с двумя лопастями, как на самолёте Sukhoi SuperJet-100, этот размер определяется диаметром корпуса генератора. Такая схема является наиболее распространенной на современных АВЭК. При увеличении количества лопастей размер L_Z увеличивается до диаметра ветроколеса и становится равным размеру L_Y . Такая схема характерна, в основном, для устаревших образцов АВЭК.

Габаритный размер L_X определяется следующими факторами:

1. Наличием и размерами регулятора угла установки лопастей;
2. Размерами и конструктивным исполнением генератора;
3. Размерами крепежного устройства.

В проектируемом АВЭК предлагается улучшить размер L_X следующими способами:

1. Изменить форму магнитной системы генератора.
2. Изменить компоновку АВЭК путем размещения регулятора угла установки лопастей во внутреннем пространстве конического генератора.

Рассмотрим от чего зависит масса всего АВЭК.

$$M_{\text{ABЭК}} = M_{\text{ВК}} + M_{\text{ГЕН}} + M_{\text{РЕГ_ЛОП}} + M_{\text{КОРП}} \quad (4.29)$$

где $M_{\text{ABЭК}}$ – масса всего АВЭК, $M_{\text{ВК}}$ – масса ветроколеса, $M_{\text{ГЕН}}$ – масса электрогенератора, $M_{\text{РЕГ_ЛОП}}$ – масса регулятора угла установки лопастей, $M_{\text{КОРП}}$ – масса корпуса.

Предлагается улучшить массу АВЭК путем уменьшения массы генератора за счёт оптимизации его параметров.

Таким образом, методика массогабаритной оптимизации АВЭК включает:

1. Выбор способа улучшения каждого из массогабаритных показателей;
2. Применение методики массогабаритной оптимизации для каждого элемента АВЭК в соответствии с выбранным способом улучшения массогабаритных показателей АВЭК.

В связи с тем, что без исследований ветроколеса в аэродинамической трубе невозможно окончательно определить оптимальное количество лопастей, их профиль, массу и размеры, масса ветроколеса в данном диссертационном исследовании принимается постоянной. Поэтому, исходя из предложенных способов уменьшения массы АВЭК, необходимо разработать методику массогабаритной оптимизации параметров генератора с ПМ.

4.2.1 Обоснование и описание методики массогабаритной оптимизации генератора с постоянными магнитами

При постановке задачи по проектированию ЭМ кроме исходных данных определяются критерии, исходя из которых должен выполняться расчёт. Такими критериями могут быть наименьшая масса, материалы, габариты, стоимость и т.д. В связи с этим, после расчёта параметров ЭМ необходима их оптимизация по выбранному критерию.

Существующие методики оптимизации электрических машин, как правило, осуществляют оптимальное проектирование при выбранном (радиальном или аксиальном) конструктивном исполнении магнитной системы. То есть, сначала выбирается конструктивное исполнение (радиальное или аксиальное), а уже потом выполняется расчёт и оптимизация. При этом нет универсальных программ, которые одновременно могли бы быть применены и к радиальным, и к аксиальным ЭМ с учётом их особенностей, что позволило бы сравнивать их параметры.

В связи с этим, для обеспечения возможности оптимизации параметров проектируемой ЭМ с ПМ радиальной, аксиальной или конической формы необходимо разработать

новую методику оптимизации, которая должна учитывать особенности, присущие выбранному конструктивному исполнению. Это позволит сделать методику универсальной, а также позволит облегчить оптимальное проектирование ЭМ с ПМ конического конструктивного исполнения, и, тем самым, ускорить их развитие и внедрение в производство.

Методика оптимизации должна осуществлять выбор наилучшего варианта исполнения по нескольким переменным, то есть позволять оптимизировать максимальное количество параметров ЭМ. С одной стороны, увеличение варьируемых параметров позволит производить более глубокую оптимизацию, а значит, решать задачу оптимизации наиболее эффективно. Но, с другой стороны, с ростом числа варьируемых параметров усложняется математический аппарат методики оптимизации, который должен учитывать не только влияние каждого из этих параметров на значение целевой функции, но также учитывать их влияние на величину других параметров ЭМ. Некоторые связи очевидны и могут быть легко учтены в методике оптимизации, но некоторые зависимости непросто установить, для этого могут потребоваться экспериментальные данные. При отсутствии опытных образцов ЭМ могут помочь современные программные продукты, основанные на методе конечных элементов, которые позволяют моделировать различные электротехнические и электромеханические устройства с достаточно высокой степенью точности.

Под оптимизацией следует понимать процесс выбора наилучшего варианта из возможных. Показателями качества наилучшего варианта служат критерии оптимальности. Как правило, в расчетной модели присутствует несколько критериев оптимальности, и в самом общем случае возникает необходимость решения многокритериальной задачи. Следует отметить, что решение многокритериальной задачи достаточно сложно. Это обусловлено тем, что критерии оптимальности находятся между собой в противоречивой зависимости. Улучшение одного критерия приводит к ухудшению других. Так, говоря об ЭМ с ПМ, снижение массы постоянных магнитов приводит к росту массы и объема всей ЭМ, снижение массы и габаритов приводит к увеличению себестоимости и т.д. Перейти от многокритериальной к однокритериальной оптимизации можно используя метод весовых коэффициентов, который формирует обобщенный критерий из частных, умноженных на весовые коэффициенты, определяющие значимость каждого из частных критериев в обобщенном критерии. Весовые коэффициенты, как правило, назначаются экспертами из практического опыта [33].

На начальной стадии развития технического изделия методы многокритериальной оптимизации менее эффективны при большой трудоемкости их разработки. В процессе развития технических устройств доля субъективизма уменьшается, заменяется практическим опытом, и методы многокритериальной оптимизации начинают эффективно работать. В настоящее время конические ЭМ с ПМ находятся на стадии развития, когда достаточно эффективными для них является решение задачи однокритериальной оптимизации. Задача решения многокритериальной оптимизации составляет для них перспективу развития.

Задача однокритериальной оптимизации в классической постановке для заданных параметров (материалов, исходных данных технического задания) и выбранных ограничений состоит в том, чтобы, перебирая независимые переменные по определенному алгоритму, определить геометрию, которая обеспечивала бы экстремальное (как правило - наименьшее) значение выбранного критерия.

Выбор критерия оптимальности определяется конкретной проектной ситуацией. В качестве констант выступают данные технического задания и, в зависимости от выбранной задачи оптимизации - фиксированные габаритные размеры или форма, определяемая величиной угла наклона воздушного зазора к оси вращения ротора. В качестве ограничений выступают параметры, величина которых не может быть выше допустимого значения исходя из требований технологии изготовления и условий эксплуатации.

В качестве варьируемых параметров выбраны:

- угол наклона воздушного зазора к оси вращения ротора α , определяющий форму ЭМ;

- конструктивный коэффициент λ ;

- высота постоянного магнита $h_{\text{МАГ}}$.

В качестве постоянных величин (констант) выбраны исходные данные технического задания.

В качестве ограничений приняты:

- минимальное и максимальное значение конструктивного коэффициента

$$\lambda = l/D_0 = \lambda_{\text{опт}} \pm 20\%, \quad (4.30)$$

где l – активная длина, $\lambda_{\text{опт}}$ – оптимальное значение конструктивного коэффициента, определяемое по выражению (3.39);

- минимальная и максимальная высота постоянного магнита;

- минимально допустимая индукция в воздушном зазоре;

- максимально допустимая индукция в зубцах якоря (зависит от характеристик используемой стали);
- максимально допустимая индукция в спинке якоря (зависит от характеристик используемой стали);
- максимально допустимая индукция в ярме индуктора (зависит от характеристик используемой стали);
- минимальная и максимальная плотность тока в обмотке якоря (зависит от мощности ЭМ, частоты вращения, системы охлаждения, условий работы);
- рабочая температура обмотки якоря.

Исходя из того, что в ЭМ с ПМ при увеличении температуры высококоэрцитивных магнитов их магнитные свойства резко снижаются, важно не допускать повышение температуры выше определенного значения. Однако, известно, что в ЭМ с ПМ с пазовым статором, спроектированных на минимум массы, и при длительном, и при кратковременном режимах работы электромагнитный предел мощности машины наступает раньше теплового, поэтому на внешней характеристике такой машины номинальная точка располагается вблизи точки номинальной мощности [115].

Кроме того, следует отметить, что с точки зрения тепловых процессов генератор АВЭК работает в очень благоприятной среде. Во-первых, это вызвано уменьшением температуры окружающего воздуха с увеличением высоты полёта ВС. Так, например, при температуре воздуха у земли плюс 21 °С температура воздуха на высоте 2 км составляет плюс 5 °С, на высоте 4 км - минус 12 °С, на высоте 6 км - минус 26 °С [125]. А во-вторых, охлаждение генератора обеспечивается интенсивной продувкой воздушным потоком, набегающим на АВЭК со скоростью полёта ВС (не менее 200 км/ч).

В общем случае температуру ЭМ в методике массогабаритной оптимизации можно учесть произведением трёх коэффициентов:

$$k_T = k_l \cdot k_{PB} \cdot k_M \quad (4.31)$$

где k_T – температурный коэффициент, определяющий допустимую температуру ЭМ, k_l – коэффициент, зависящий от длины активной зоны ЭМ, k_{PB} – коэффициент, зависящий от расхода воздуха, k_M – коэффициент, зависящий от мощности ЭМ.

В предлагаемой методике массогабаритной оптимизации активная длина ЭМ меняется незначительно или остается постоянной, количество охлаждающего воздуха меняется в зависимости от формы ЭМ и конструкции АВЭК, при этом учет его расхода можно

представить в виде функции от угла наклона воздушного зазора к оси вращения ротора, а мощность ЭМ не меняется и зависит от исходных данных.

В качестве критериев оптимальности выбраны массогабаритные показатели, наиболее важные для авиационной техники:

- минимальный габаритный размер вдоль оси вращения L_x (с учётом вылета лобовой части обмотки якоря);
- минимальный диаметральный габаритный размер L_y (с учётом вылета лобовой части обмотки якоря);
- минимальная масса электротехнической стали;
- минимальная масса постоянных магнитов;
- минимальная масса активных материалов.

В качестве выходных данных выступают значения варьируемых переменных, при которых достигается наилучшее значение выбранного критерия оптимальности. После определения оптимальных значений варьируемых переменных определяются другие параметры ЭМ, зависящие от них.

Для анализа целевых функций использован метод однокритериальной оптимизации методом полного перебора, который относится к классу методов поиска решения исчерпыванием всевозможных вариантов. Он является простым и надёжным, хотя его применение требует больших вычислительных ресурсов. Вычислительные возможности современной компьютерной техники позволяют за небольшое время перебирать решения целевых функций с большим количеством варьируемых параметров. Рассмотрим целевые функции, на основе которых построена методика оптимизации ЭМ с ПМ.

4.2.2 Определение влияния формы генератора с постоянными магнитами на его габаритные размеры

Для того, чтобы определить зависимость габаритных размеров эквивалентных ЭМ с ПМ от угла наклона воздушного зазора к оси вращения ротора, введем прямоугольную систему координат с осями x и y таким образом, чтобы ось x совпала с осью вращения ротора рассматриваемой ЭМ, а ось y находилась в плоскости рассматриваемого сечения (рис. 4.8).

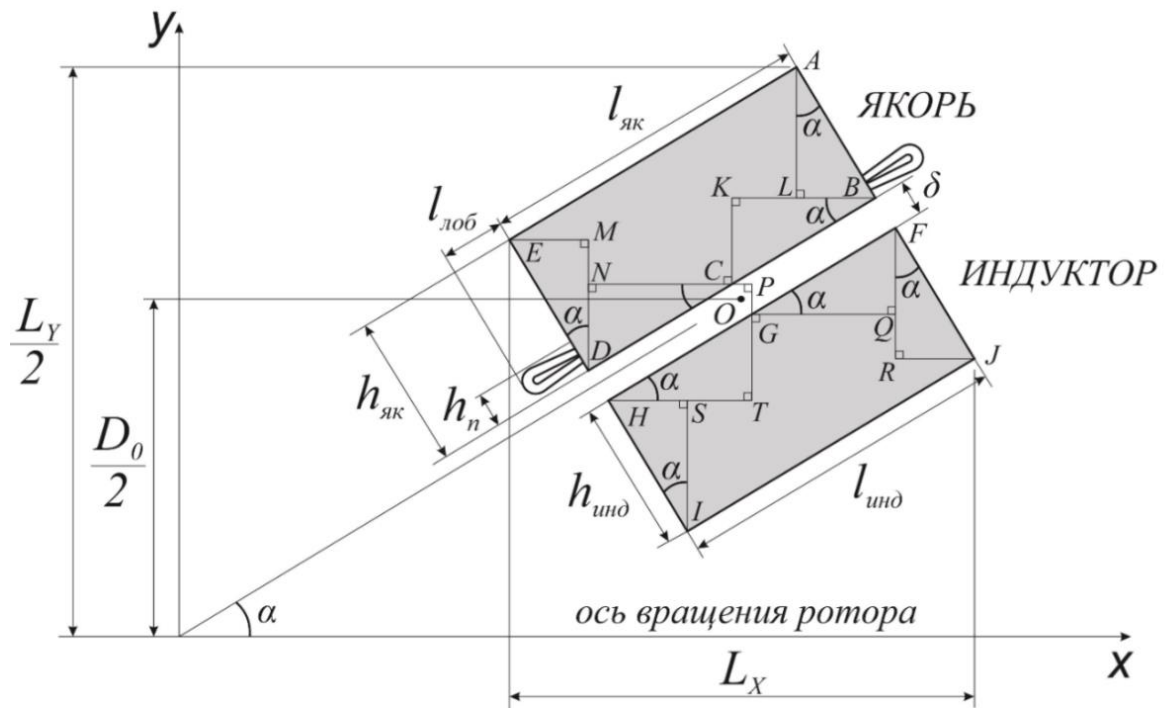


Рисунок 4.8 - К определению зависимостей габаритов ЭМ с коническим ротором от её параметров

Угол наклона воздушного зазора к оси вращения ротора равен α . Габаритные размеры ЭМ по осям x и y обозначим как L_X и L_Y соответственно. Тогда габаритный размер L_X , измеряемый вдоль оси вращения ротора, будет равен:

$$\begin{cases} L_{X_M} = (h_{\text{як}} + h_{\text{инд}} + \delta) \sin(\alpha) + l \cdot \cos(\alpha) \\ L_{X_OБM_ЯК} = h_{\text{л}} \cdot \sin(\alpha) + (l + 2 \cdot l_{\text{лоб}}) \cdot \cos(\alpha) \\ L_{X_ЭМ} = \text{MAX}(L_{X_M}; L_{X_OБM_ЯК}; L_{X_Инд_Як}) \end{cases} \quad (4.32)$$

где L_{X_M} – габаритный размер L_X магнитопроводов (якоря и индуктора), $L_{X_OБM_ЯК}$ – габаритный размер L_X обмотки якоря с учётом вылета лобовых частей, $L_{X_ЭМ}$ – габаритный размер L_X всей ЭМ, определяемый как функция выбора наибольшего значения из L_{X_M} и $L_{X_OБM_ЯК}$.

Габаритный размер L_Y , измеряемый перпендикулярно оси вращения ротора, будет равен:

$$\begin{cases} L_{Y_M_ЯК} = D_0 + (2 \cdot h_{\text{як}} + \delta) \cdot \cos(\alpha) + l \cdot \sin(\alpha) \\ L_{Y_M_Инд} = D_0 + (2 \cdot h_{\text{инд}} + \delta) \cdot \cos(\alpha + 180^\circ) + l \cdot \sin(\alpha + 180^\circ) \\ L_{Y_OБM_ЯК} = D_0 + (2 \cdot h_{\text{л}} + \delta) \cdot \cos(\alpha) + (l + 2 \cdot l_{\text{лоб}}) \cdot \sin(\alpha) \\ L_{Y_ЭМ} = \text{MAX}(L_{Y_M_ЯК}; L_{Y_M_Инд}; L_{Y_OБM_ЯК}) \end{cases} \quad (4.33)$$

где $L_{Y_M_ЯК}$ – габаритный размер L_Y магнитопровода якоря, $L_{Y_M_ИНД}$ – габаритный размер L_Y магнитопровода индуктора, $L_{Y_ОБМ_ЯК}$ – габаритный размер L_Y обмотки якоря с учётом вылета лобовых частей, $L_{Y_ЭМ}$ – габаритный размер L_Y всей ЭМ, определяемый как функция выбора наибольшего значения из $L_{Y_M_ЯК}$, $L_{Y_M_ИНД}$ и $L_{Y_ОБМ_ЯК}$.

Если рассматривать габаритные размеры только магнитопроводов, т.е. не учитывать вылет лобовых частей обмотки якоря, то для случая, когда габаритный размер ЭМ будет определяться габаритным размером магнитопровода якоря, т.е. $L_{Y_ЭМ}=L_{Y_M_ЯК}$, найдём соотношение габаритных размеров магнитной системы L_{X_M} и L_{Y_M} :

$$\frac{L_{X_M}}{L_{Y_M}} = \frac{(h_{ЯК} + h_{ИНД} + \delta) \sin(\alpha) + l \cdot \cos(\alpha)}{D_0 + (2h_{ЯК} + \delta) \cdot \cos(\alpha) + l \cdot \sin(\alpha)} \quad (4.34)$$

В радиальных ЭМ, у которых $\alpha=0^\circ$, наружный диаметр якоря D_H находится в определенном соотношении с диаметром расточки якоря D :

$$D_H = k_{ДН} \cdot D \quad (4.35)$$

Поэтому для радиальных ЭМ выражение (4.34) можно записать:

$$\frac{L_{X_M}}{L_{Y_M}} = \frac{l}{D_H} = \frac{1}{k_{ДН}} \frac{l}{D} \quad (4.36)$$

где $k_{ДН}$ – коэффициент наружного диаметра радиальной ЭМ, а величина $\frac{l}{D}$ представляет собой известное отношение длины магнитопровода l радиальной ЭМ к диаметру D расточки якоря. А как известно, выбор величины $\frac{l}{D}$ очень важен при проектировании, так как от этого зависит множество других параметров радиальных ЭМ [5, 9, 41, 52, 53, 58, 61, 101, 102, 116, 123, 138, 139, 144, 147].

Для аксиальных ЭМ, у которых $\alpha=90^\circ$, выражение (4.14) будет иметь вид:

$$\frac{L_{X_M}}{L_{Y_M}} = \frac{h_{ЯК} + h_{ИНД} + \delta}{D_0 + l} \quad (4.37)$$

Как видно из выражений (4.16) и (4.17), при увеличении длины активной зоны l величина отношения габаритных размеров магнитной системы $\frac{L_{X_M}}{L_{Y_M}}$ для радиальных ЭМ будет увеличиваться, а для аксиальных – уменьшаться.

Для определения полных габаритных размеров ЭМ, то есть получения функций $L_{X_ЭМ}=f(a)$ и $L_{Y_ЭМ}=f(a)$ с учётом вылета лобовых частей обмотки якоря должны быть из-

вестны следующие величины: D_0 – диаметр эталонной окружности, δ – величина воздушного зазора, l – активная длина ЭМ, $l_{\text{ЛОБ}}$ – длина вылета лобовой части обмотки якоря (с одной стороны магнитопровода), $h_{\text{ИНД}}$ – высота магнитопровода индуктора, равная сумме высоты ярма индуктора $h_{\text{ЯР_ИНД}}$ и высоты постоянного магнита $h_{\text{ПМ}}$, $h_{\text{П}}$ – высота паза, $h_{\text{ЯК}}$ – высота магнитопровода якоря, равная сумме высоты паза $h_{\text{П}}$ и высоты спинки якоря $h_{\text{СП_ЯК}}$. Далее для различных значений угла наклона воздушного зазора к оси вращения ротора α необходимо решить системы уравнений (4.32) и (4.33).

В зависимости от конкретных значений этих величин функции $L_{X_ЭМ}=f(\alpha)$ и $L_{Y_ЭМ}=f(\alpha)$ могут иметь различный вид. Для проектируемого конического генератора были проведены предварительные расчёты эквивалентного ему радиального генератора, на основе которых были получены следующие данные:

$$D_0=158 \text{ мм}, \delta=1 \text{ мм}, l=42 \text{ мм}, l_{\text{ЛОБ}}=7 \text{ мм}, h_{\text{ИНД}}=15 \text{ мм}, h_{\text{П}}=7 \text{ мм}, h_{\text{ЯК}}=26 \text{ мм}.$$

Исходя из полученных данных были построены зависимости, представленные на рис. 4.9 - 4.12.

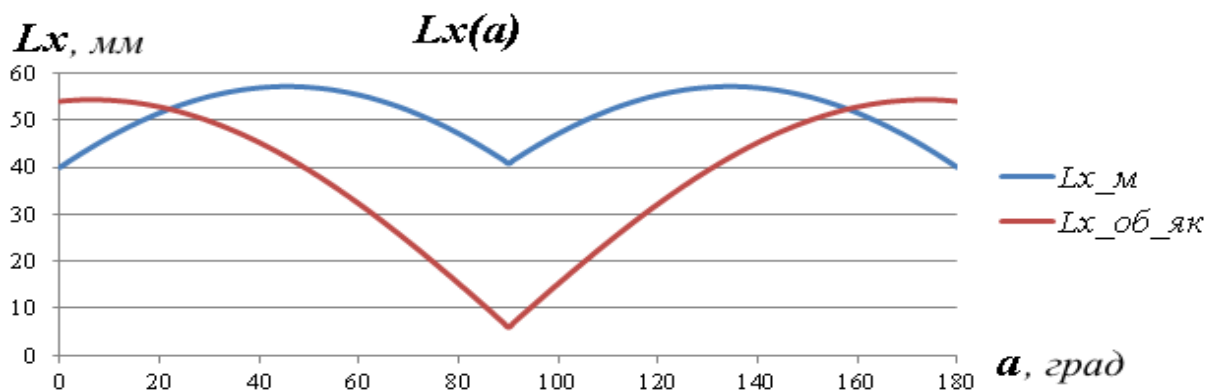


Рисунок 4.9 - Зависимость габаритного размера L_X магнитопроводов и обмотки якоря от угла наклона воздушного зазора к оси вращения ротора

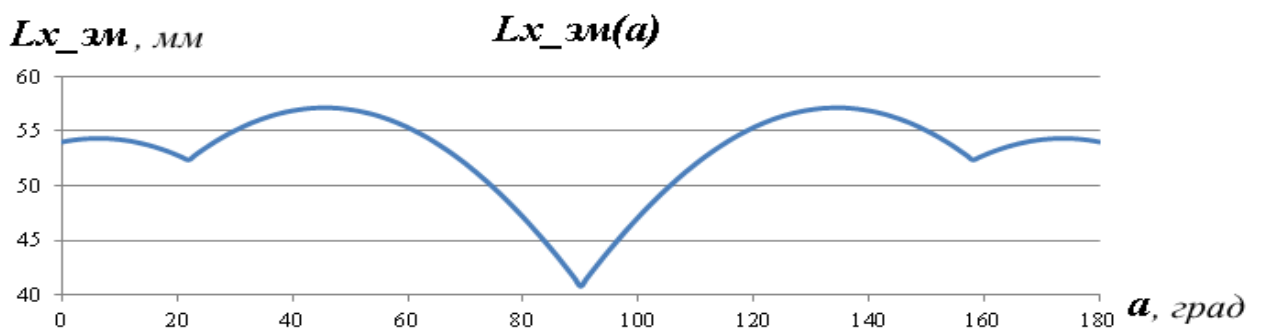


Рисунок 4.10 - Зависимость габаритного размера L_X ЭМ от угла наклона воздушного зазора к оси вращения ротора

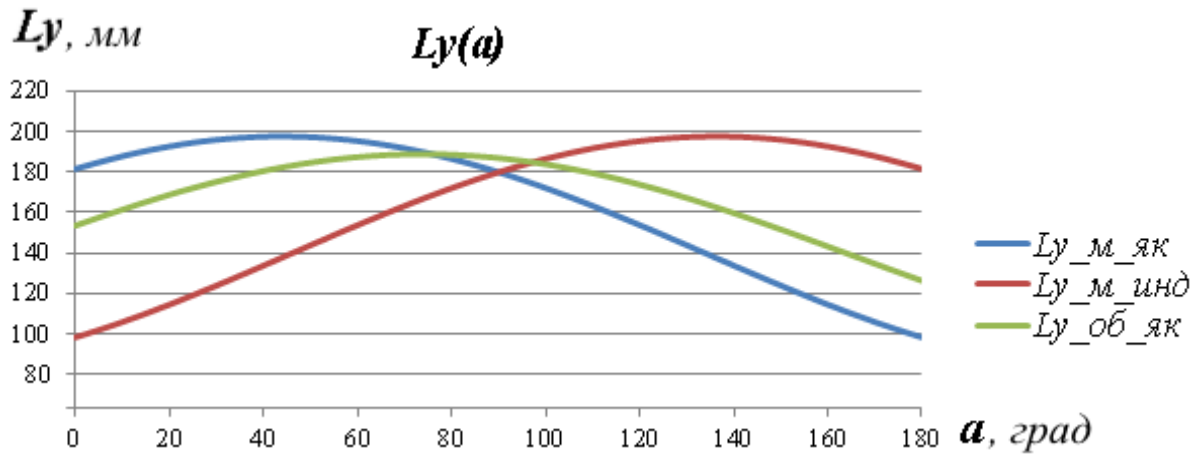


Рисунок 4.11 - Зависимость габаритного размера L_y магнитопроводов якоря и индуктора, обмотки якоря от угла наклона воздушного зазора к оси вращения ротора

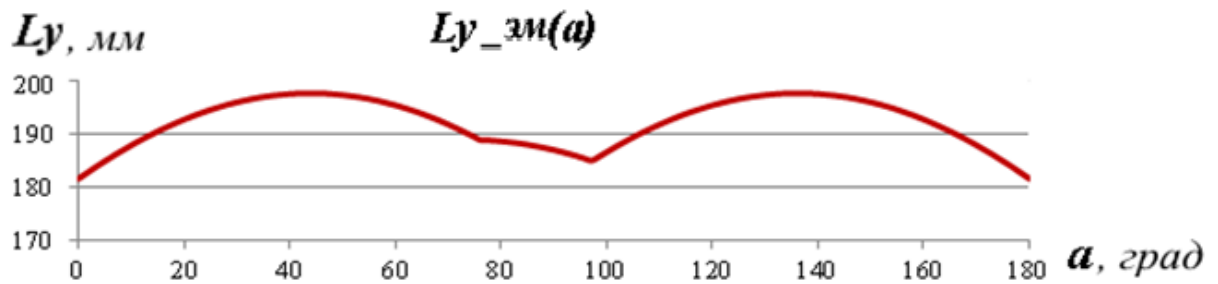


Рисунок 4.12 - Зависимость габаритного размера L_y ЭМ от угла наклона воздушного зазора к оси вращения ротора

Из графиков, представленных на рисунках 4.9 - 4.12, видно, что габаритные размеры L_x и L_y всей ЭМ при различных значениях угла наклона воздушного зазора к оси вращения ротора определяются различными элементами ЭМ – магнитопроводами якоря и индуктора, а также обмоткой якоря.

Если для рассматриваемого случая вычислить соотношение габаритных размеров ЭМ L_x/L_y с учётом вылета лобовых частей обмотки якоря, то получим следующую картину (рис. 4.13):

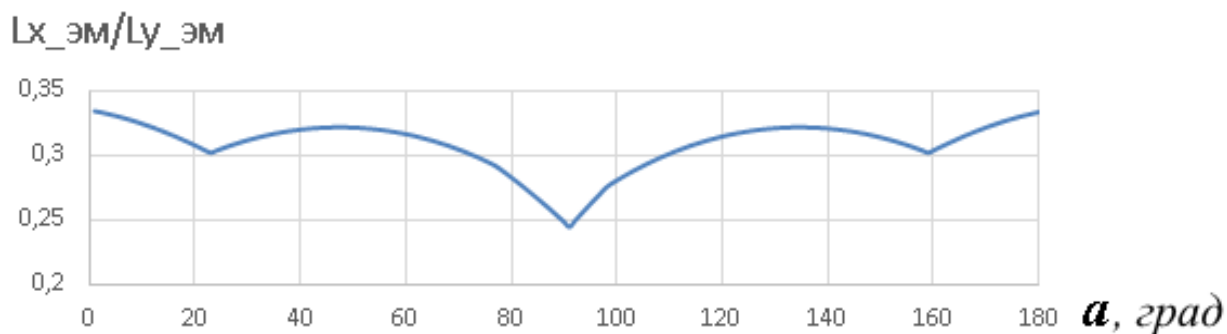


Рисунок 4.13 - Зависимость соотношения габаритных размеров $L_x/L_{yЭМ}$ от угла наклона воздушного зазора к оси вращения ротора

Таким образом, из полученных графиков наглядно видно, что выбор угла наклона воздушного зазора, определяющий форму ЭМ, также влияет на её габаритные размеры. В общем случае нельзя однозначно определить значение угла наклона воздушного зазора к оси вращения ротора, при котором габариты ЭМ будут наименьшими, особенно если диапазон возможных значений этого угла ограничен. Поэтому приведенные зависимости (4.32) и (4.33) включены в систему массогабаритной оптимизации [76].

4.2.3 Определение влияния формы генератора с постоянными магнитами на его массу активных материалов

Форма магнитопровода ЭМ с коническим ротором, у которой активная и тыльная поверхности перпендикулярны боковым поверхностям, задаётся взаимным расположением четырёх конусов, соотносящихся между собой определённым образом. Для установления этого соотношения через математические зависимости обратимся к рис. 4.14, на котором изображено одно из сечений магнитопровода (индуктора или якоря) плоскостью, проходящей через ось вращения ротора.

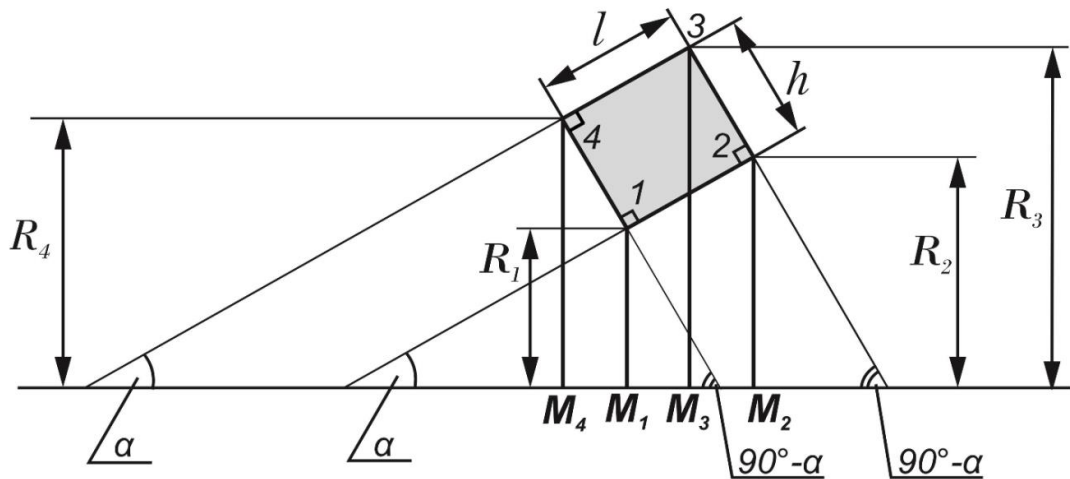


Рисунок 4.14- К определению соотношения формы и размеров магнитопровода в зависимости от угла α

Поверхность магнитопровода, через которую проходит прямая 3-4 является боковой поверхностью одного из «образующих» усечённых конусов с углом раствора α , у которого одно из оснований имеет радиус равный R_3 , а второе основание имеет радиус равный R_4 . Обозначим объём этого усечённого конуса как V_{34} , а высоту как h_{34} . Высота h_{34} равна длине отрезка M_3M_4 .

Поверхность магнитопровода, через которую проходит прямая 2-3 является боковой поверхностью второго «образующего» конуса с углом раствора $90^\circ - \alpha$, у которого одно из оснований имеет радиус равный R_3 , а другое основание имеет радиус равный R_2 . Обозначим объём этого усечённого конуса как V_{23} , а высоту как h_{23} . Высота h_{23} равна длине отрезка M_2M_3 .

Поверхность магнитопровода, через которую проходит прямая 1-4 является боковой поверхностью одного из «исключающих» усечённых конусов с углом раствора $90^\circ - \alpha$, у которого одно из оснований имеет радиус равный R_1 , а второе основание имеет радиус равный R_4 . Обозначим объём этого усечённого конуса как V_{14} , а высоту как h_{14} . Высота h_{14} равна длине отрезка M_1M_4 .

Поверхность магнитопровода, через которую проходит прямая 1-2 является боковой поверхностью второго «исключающего» конуса с углом раствора α , у которого одно из оснований имеет радиус равный R_1 , а другое основание имеет радиус равный R_2 . Обозначим объём этого усечённого конуса как V_{12} , а высоту как h_{12} . Высота h_{12} равна длине отрезка M_1M_2 .

Объём магнитопровода, не имеющего пазов, обозначим как $V_{3\Delta\Gamma}$, а объём магнитопровода с пазами обозначим как V_M . Тогда объём $V_{3\Delta\Gamma}$ найдем по формуле:

$$V_{3\Delta\Gamma} = V_{34} + V_{23} - V_{13} - V_{12} \quad (4.38)$$

На рис. 4.15 изображён усечённый конус с радиусами оснований равными r_1 и r_2 и высотой h .

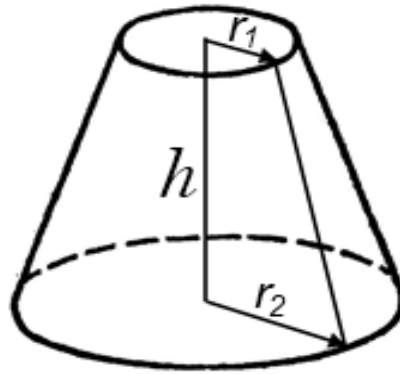


Рисунок 4.15 - Усечённый конус

Объём усеченного конуса в общем виде вычисляется по формуле:

$$V = \frac{1}{3} \pi h (r_1^2 + r_1 r_2 + r_2^2) \quad (4.39)$$

Тогда для случая, представленного на рис. 4.15 будут справедливы следующие выражения:

$$V_{34} = \frac{1}{3} \pi h_{34} (R_3^2 + R_3 R_4 + R_4^2) = \frac{1}{3} \pi l \cdot \cos(\alpha) (R_3^2 + R_3 R_4 + R_4^2) \quad (4.40)$$

$$V_{23} = \frac{1}{3} \pi h_{23} (R_2^2 + R_2 R_3 + R_3^2) = \frac{1}{3} \pi h \cdot \sin(\alpha) (R_2^2 + R_2 R_3 + R_3^2) \quad (4.41)$$

$$V_{14} = \frac{1}{3} \pi h_{14} (R_1^2 + R_1 R_4 + R_4^2) = \frac{1}{3} \pi h \cdot \sin(\alpha) (R_1^2 + R_1 R_4 + R_4^2) \quad (4.42)$$

$$V_{12} = \frac{1}{3} \pi h_{12} (R_1^2 + R_1 R_2 + R_2^2) = \frac{1}{3} \pi l \cdot \cos(\alpha) (R_1^2 + R_1 R_2 + R_2^2) \quad (4.43)$$

Объём магнитопровода без пазов (объём заготовки) будет равен:

$$V_{3\Delta\Gamma} = \frac{\pi}{3} \left(l \cdot \cos(\alpha) (R_3^2 + R_3 R_4 + R_4^2 - R_1^2 - R_1 R_2 - R_2^2) + h \cdot \sin(\alpha) (R_2^2 + R_2 R_3 + R_3^2 - R_1^2 - R_1 R_4 - R_4^2) \right) \quad (4.44)$$

С учётом (3.8)-(3.11) выражение (4.44) примет вид:

$$V_{3\Delta\Gamma} = l h \pi (2R_0 + (h + \delta) \cos(\alpha)) \quad (4.45)$$

Для магнитопровода якоря, у которого высота магнитопровода равна $h=h_{\text{ЯК}}$, площадь сечения паза равномерна по всей его длине и равна $S_{\text{П}}$, а количество пазов равно Z , объём магнитопровода с пазами будет равен:

$$V_{\text{ЯК}} = V_{\text{ЗАГ}} - S_{\text{П}} \cdot l \cdot Z = lh_{\text{ЯК}} \pi(2R_0 + (h_{\text{ЯК}} + \delta) \cos(\alpha)) - S_{\text{П}} \cdot l \cdot Z \quad (4.46)$$

Масса стали якоря равна:

$$M_{\text{СТ_ЯК}} = l \cdot \rho_{\text{СТ}} (h_{\text{ЯК}} \pi(D_0 + (h_{\text{ЯК}} + \delta) \cos(\alpha)) - S_{\text{П}} \cdot Z) \quad (4.47)$$

где l – активная длина, $\rho_{\text{СТ}}$ – плотность стали, $h_{\text{ЯК}}$ – высота магнитопровода якоря, D_0 – диаметр эталонной окружности, δ – воздушный зазор, $S_{\text{П}}$ – площадь поперечного сечения паза, Z – количество пазов магнитопровода якоря, α – угол наклона воздушного зазора к оси вращения ротора.

Масса стали индуктора равна массе ярма:

$$M_{\text{СТ_ИНД}} = \pi l h_{\text{ЯР}} \rho_{\text{СТ}} (D_0 - (2h_{\text{МАГН}} + h_{\text{ЯР}} + \delta) \cos(\alpha)) \quad (4.48)$$

где $h_{\text{ЯР}}$ – высота ярма индуктора, $h_{\text{МАГН}}$ – высота постоянного магнита индуктора.

Для всей ЭМ масса магнитопроводов (масса стали) равна:

$$M_{\text{СТ_ЭМ}} = M_{\text{СТ_ЯК}} + M_{\text{СТ_ИНД}} \quad (4.49)$$

Учитывая, что угол наклона воздушного зазора для магнитопроводов якоря и индуктора отличаются на 180° , получим:

$$M_{\text{СТ_ЭМ}} = l \rho_{\text{СТ}} (h_{\text{ЯК}} \pi(D_0 + (h_{\text{ЯК}} + \delta) \cdot \cos(\alpha)) - S_{\text{П}} \cdot Z) + \\ + l h_{\text{ЯР}} (D_0 - (2h_{\text{МАГН}} + h_{\text{ЯР}} + \delta) \cdot \cos(\alpha + 180^\circ)) \quad (4.50)$$

Ниже представлены графики, описывающие изменение массы стали якоря (рис. 4.16) и индуктора (рис. 4.17) при изменении угла наклона воздушного зазора к оси вращения ротора в пределах от 0° до 180° (при $\alpha=180^\circ$ якорь и индуктор меняются местами).

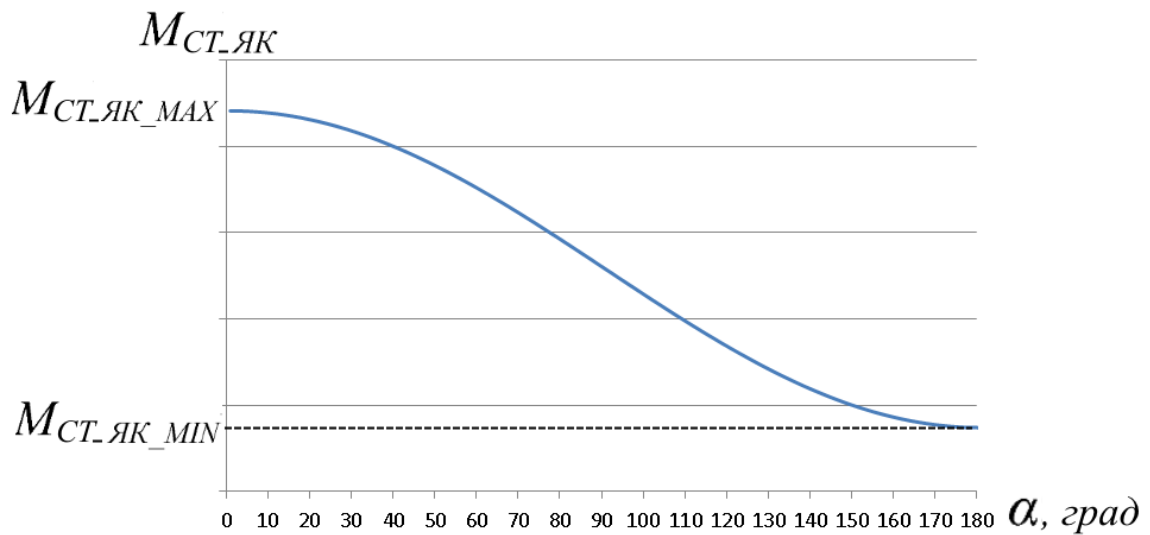


Рисунок 4.16 - Зависимость массы стали якоря от угла α наклона воздушного зазора к оси вращения ротора

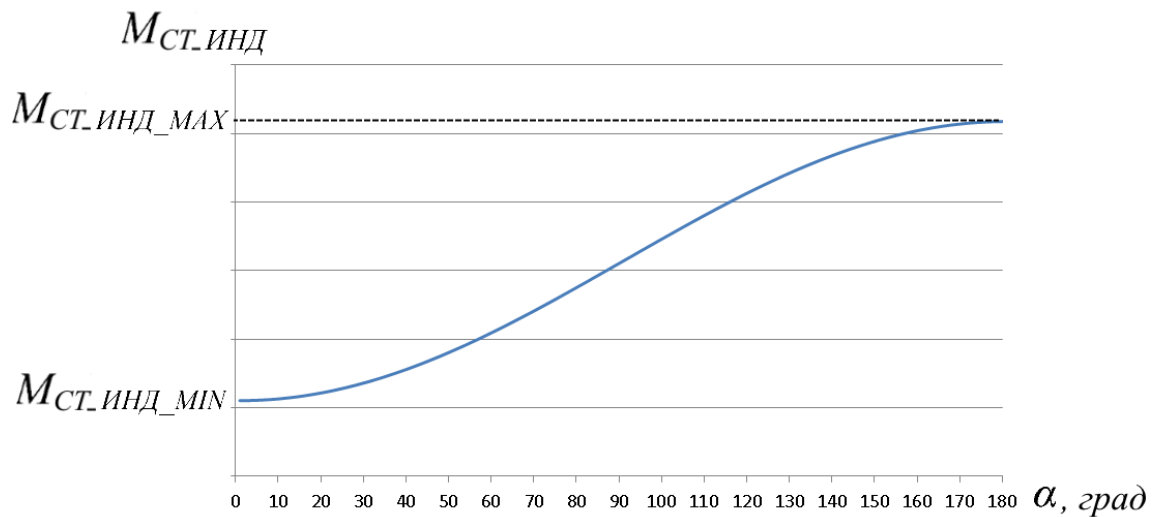


Рисунок 4.17 - Зависимость массы стали индуктора от угла α наклона воздушного зазора к оси вращения ротора

В зависимости от размеров магнитопровода якоря (высоты магнитопровода, количества и размеров пазов) и магнитопровода индуктора (высоты ярма) масса стали всей ЭМ может изменяться в некотором диапазоне, как показано на рис. 4.18, причём она может и увеличиваться, и уменьшаться в зависимости от того, что будет больше - изменение массы индуктора $\Delta M_{ст_инд}$ или якоря $\Delta M_{ст_як}$:

$$\Delta M_{ст_эм} = \Delta M_{ст_инд} - \Delta M_{ст_як} \quad (4.51)$$

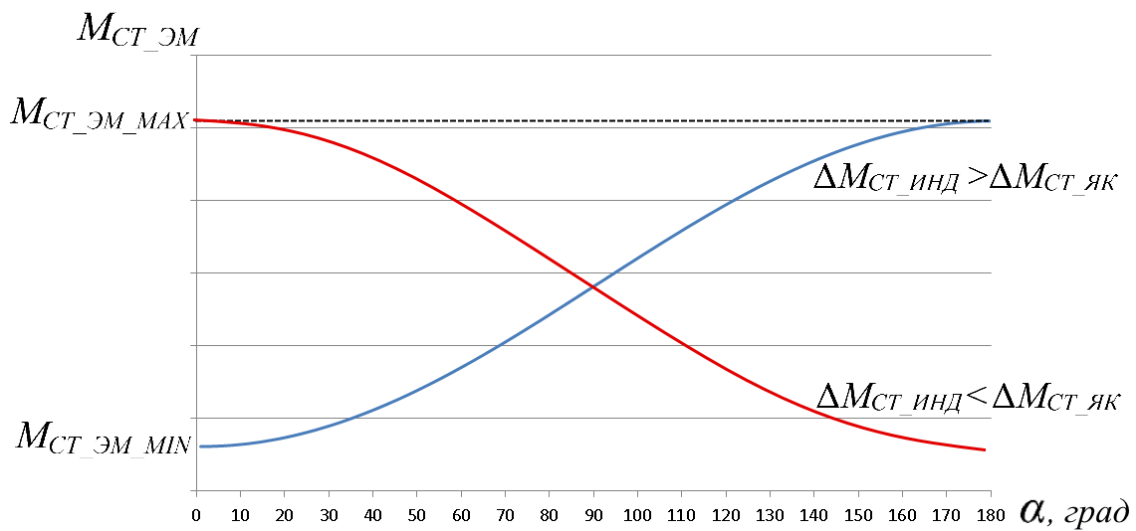


Рисунок 4.18 - Зависимость массы стали ЭМ от угла α наклона воздушного зазора к оси вращения ротора

Масса постоянных магнитов равна:

$$M_{\text{МАГН}} = \pi r_{\text{СТ}} l_{\text{МАГН}} h_{\text{МАГН}} \alpha_p (D_0 - (h_{\text{МАГН}} + \delta) \cdot \cos(\alpha)) \quad (4.52)$$

где α_p - коэффициент полюсного перекрытия, $l_{\text{МАГН}}$ - длина постоянных магнитов.

На рис. 4.19 представлен график зависимости массы магнитов $M_{\text{МАГН}}$ от угла наклона воздушного зазора к оси вращения ротора α .

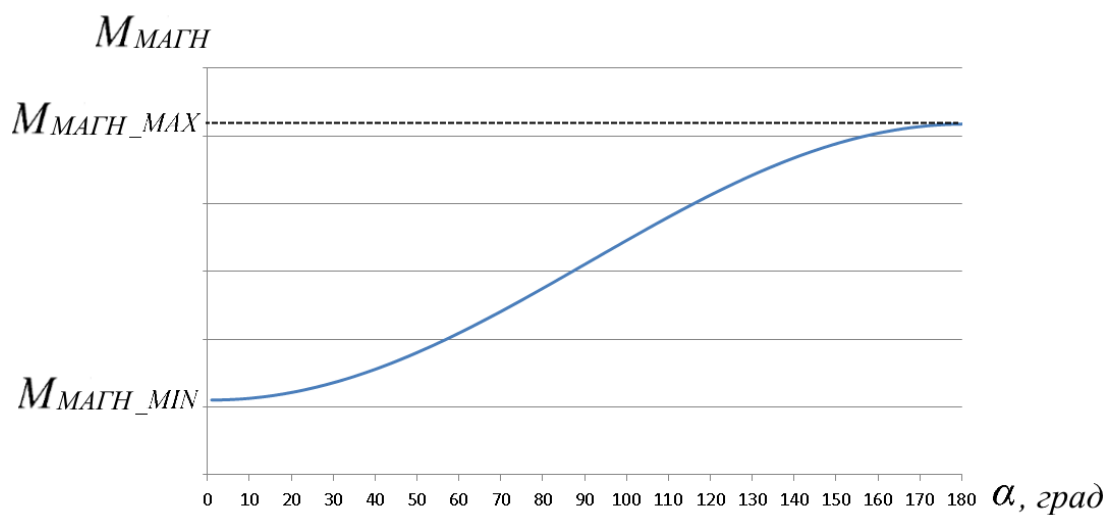


Рисунок 4.19 - Зависимость массы постоянных магнитов $M_{\text{МАГН}}$ от угла α наклона воздушного зазора к оси вращения ротора

Масса меди при фиксированных размерах паза также изменяется в зависимости от угла наклона воздушного зазора к оси вращения ротора. Это связано с изменением длины обмотки якоря, которая может быть вычислена по формуле:

$$L_{\text{обмяк}} = w_{\text{як}} \left(2l + y_z \left(\frac{2\pi(D_0 + \delta \cdot \cos(\alpha)) - Z \cdot b_{\text{п}}}{Z} \right) + 2y_z b_{\text{п}} \right) \quad (4.53)$$

где $w_{\text{як}}$ – число витков обмотки, y_z – шаг обмотки, $b_{\text{п}}$ – ширина паза магнитопровода якоря, Z – количество пазов.

Масса меди ЭМ (обмотки якоря) равна:

$$M_{\text{МЕДИ_ЭМ}} = \rho_{\text{М}} \cdot s_{\text{обмяк}} \cdot L_{\text{обмяк}} \quad (4.54)$$

График изменения массы меди ЭМ (обмотки якоря) от угла наклона воздушного зазора представлен на рис. 4.20.

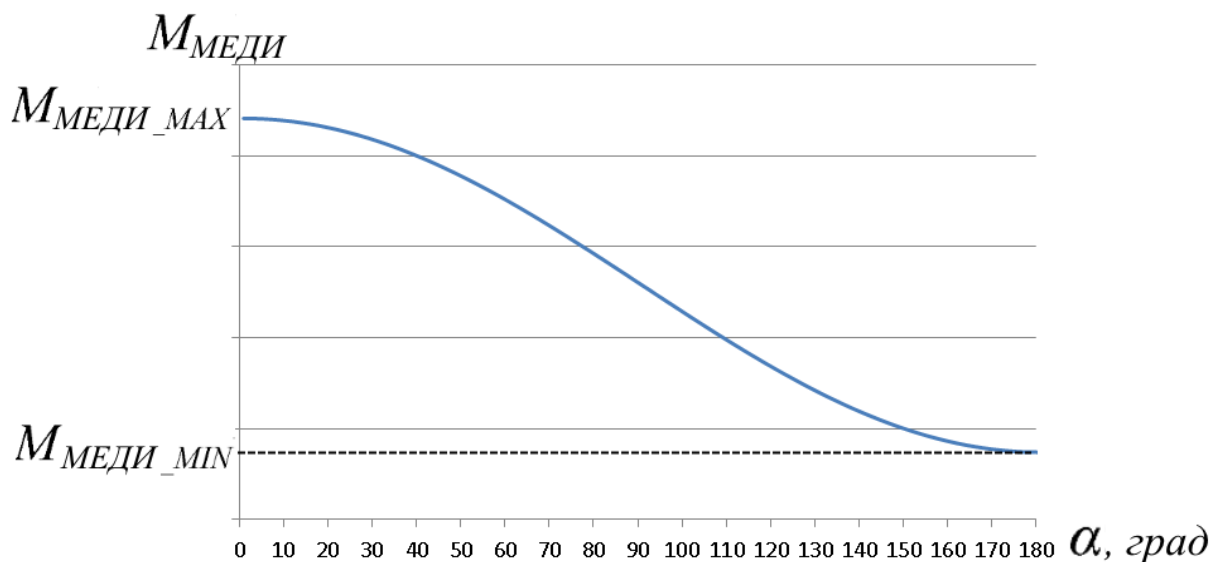


Рисунок 4.20 - Зависимость массы меди от угла α наклона воздушного зазора к оси вращения ротора

Масса активных материалов (рис. 4.21) складывается из массы стали и массы меди (массы обмотки якоря):

$$M_{\text{АКТ_МАТ}} = M_{\text{СТ_ЭМ}} + M_{\text{МЕДИ}} + M_{\text{МАГН}} \quad (4.55)$$

где $M_{\text{МЕДИ}}$ – масса обмотки якоря.

В зависимости от размеров и якоря и индуктора, в том числе зависящих от характеристик используемых материалов, масса активных материалов при изменении угла наклона воздушного зазора к оси вращения ротора, может как уменьшаться, так и

увеличиваться, но в любом случае эта зависимость носит монотонный характер и имеет экстремум (рис. 4.21).

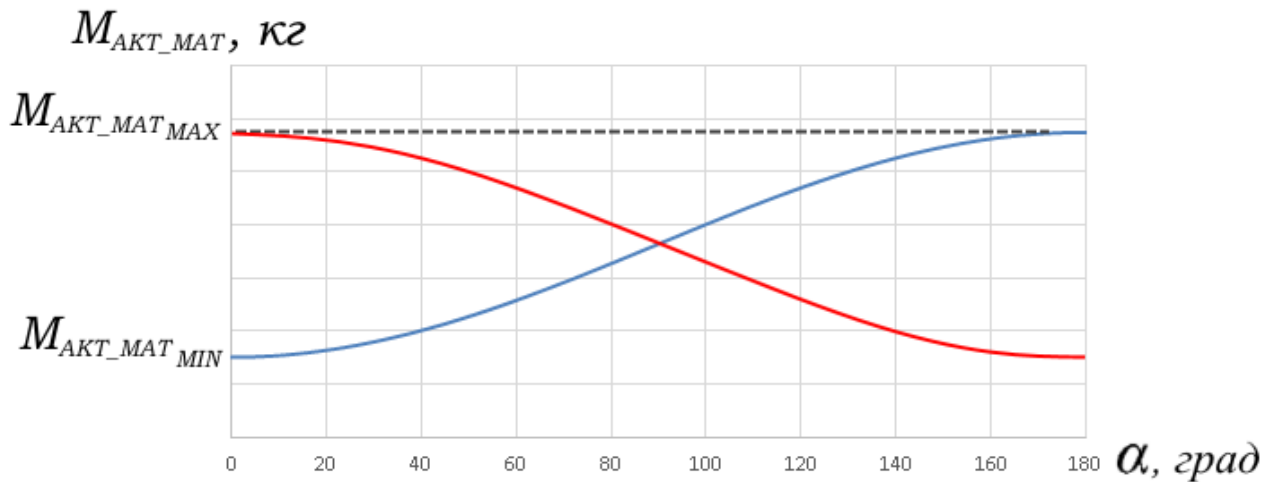


Рисунок 4.21 - Зависимость массы активных материалов ЭМ от угла α наклона воздушного зазора к оси вращения ротора

Полная масса ЭМ предварительно вычисляется исходя из массы активных материалов и конструктивного исполнения ЭМ, выражаемого коэффициентом привеса $k_{пр}$. В этот коэффициент закладывается увеличение массы ЭМ за счёт массы корпуса, вала, подшипников и прочих элементов конструкции, характерных для выбранного конструктивного исполнения.

$$M_{ЭМ} = k_{пр} \cdot M_{АКТ_МАТ} \quad (4.56)$$

где $M_{ЭМ}$ – полная масса ЭМ, $k_{пр}$ – коэффициент привеса, $M_{АКТ_МАТ}$ – масса активных материалов ЭМ.

Таким образом, в результате проведенного анализа установлено, что при изменении угла наклона воздушного зазора к оси вращения ротора в диапазоне от 0° до 180° полная масса ЭМ будет непрерывно меняться - либо только увеличиваться, либо только уменьшаться, причем как именно и насколько будет изменяться масса ЭМ в каждом конкретном случае зависит от значений диаметра эталонной окружности D_0 , величины воздушного зазора δ , активной длины l , высоты спинки якоря $h_{сп_як}$, высоты ярма индуктора $h_{яр_инд}$, длины магнита $l_{магн}$, высоты магнита $h_{магн}$, ширины магнита $b_{магн}$, высоты паза $h_{пз}$, ширины паза $b_{пз}$, количества пазов Z . Поэтому приведенные зависимости (4.50), (4.52), (4.54) и (4.55) включены в систему массогабаритной оптимизации.

4.2.4 Определение влияния высоты постоянных магнитов на массогабаритные показатели генератора с постоянными магнитами

От высоты постоянных магнитов зависит величина магнитной индукции в нейтральном сечении магнита и в воздушном зазоре, а это, в свою очередь, влияет на выбор главных размеров ЭМ с ПМ, поэтому выбор высоты постоянных магнитов является важным этапом проектирования таких машин. Чтобы понять, каким образом высота магнитов влияет на величину главных размеров, обратимся к формуле (4.20) определения расчётной мощности ЭМ [41].

При уменьшении высоты постоянного магнита $h_{\text{МАГН}}$ уменьшается магнитная индукция в нейтральном сечении магнита $B_{\text{НС}}$ и в воздушном зазоре B_{δ} , поэтому для обеспечения требуемой мощности необходимо увеличивать главные размеры D и l' (при условии, что остальные переменные в выражении (4.20) не изменяются), что приводит к увеличению массы всей машины.

В то же время, при изменении магнитной индукции в нейтральном сечении магнита необходимо изменять высоту ярма индуктора $h_{\text{ЯР}_{\text{ИНД}}}$:

$$h_{\text{ЯР}_{\text{ИНД}}} = \frac{B_{\text{НС}} \cdot S_{\text{НС}}}{2 \cdot B_{\text{ИНД}_{\text{МАХ}}} \cdot k_{\text{зс}} \cdot l} \quad (4.57)$$

где $B_{\text{НС}}$ - магнитная индукция в нейтральном сечении магнита, $S_{\text{НС}}$ - площадь поперечного сечения магнита, $B_{\text{ИНД}_{\text{МАХ}}}$ - максимально допустимая индукция в ярме индуктора (определяется свойствами стали), $k_{\text{зс}}$ - коэффициент заполнения стали, l - активная длина машины.

Уменьшение магнитной индукции $B_{\text{НС}}$ в соответствии с выражением (4.57) позволяет уменьшить высоту ярма индуктора $h_{\text{ЯР}_{\text{ИНД}}}$, вследствие чего возможно уменьшить массу всей ЭМ.

Таким образом, при изменении высоты постоянного магнита возникают противоречивые последствия, которые требуют численного анализа для нахождения оптимальной высоты постоянного магнита с точки зрения выбранного критерия. Для этого необходимо установить точную зависимость магнитной индукции в нейтральном сечении магнита $B_{\text{НС}}$ и в воздушном зазоре B_{δ} от высоты постоянного магнита $h_{\text{МАГН}}$.

Существующие методики, позволяющие решить эту задачу, основаны на том, что для выбранной формы и размеров нейтрального сечения магнита на его рабочей диаграмме находят рабочую точку и определяют «оптимальную» (с точки зрения максимума магнитной энергии) высоту магнита с учётом свойств выбранного материала (самарий-кобальт, алюминий-никель-кобальт, неодим-железо-бор и др.). Но при этом не говорится о том, как изменится положение рабочей точки при отклонении высоты магнита от найденного «оптимального» значения.

Искомые зависимости $B_{НС}(h_{МАГН})$ и $B_{\delta}(h_{МАГН})$ зависят от свойств используемых активных материалов, размеров и формы магнитов и всей магнитной системы и определяются для каждой ЭМ индивидуально.

С целью получения зависимостей $B_{НС}(h_{МАГН})$ и $B_{\delta}(h_{МАГН})$ для проектируемого генератора были проведены исследования в программе «Ansys Maxwell 16». Для этого была создана модель магнитной цепи генератора с ПМ на пару полюсов, представленная на рис. 4.22.

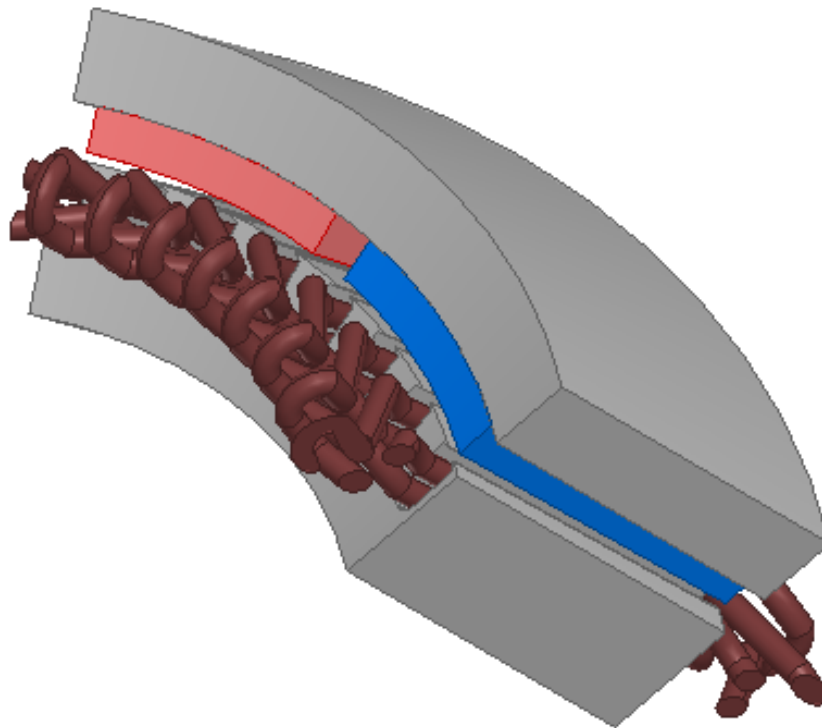


Рисунок 4.22 – Модель магнитной цепи конического генератора с постоянными магнитами на пару полюсов

Результаты исследований представлены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 - Значение магнитной индукции в нейтральном сечении магнита и в воздушном зазоре при разной величине воздушного зазора и высоты магнита

Высота магнита, мм	Возд. зазор, мм	Магн. индукция в нейтр. сечен., Тл	Магн. индукция в возд. заз., Тл
2	0,5	0,762	0,663
4	0,5	0,871	0,757
6	0,5	0,916	0,797
8	0,5	0,943	0,820
10	0,5	0,959	0,834
2	1	0,644	0,560
4	1	0,79	0,687
6	1	0,856	0,744
8	1	0,894	0,777
10	1	0,918	0,798
2	1,5	0,557	0,484
4	1,5	0,722	0,628
6	1,5	0,801	0,697
8	1,5	0,847	0,737
10	1,5	0,88	0,765
2	2	0,49	0,426
4	2	0,663	0,577
6	2	0,752	0,654
8	2	0,808	0,703
10	2	0,845	0,735

Как видно из полученных результатов, с увеличением высоты магнита индукция в его нейтральном сечении и в воздушном зазоре меняется нелинейно. При этом, с увеличением высоты магнита индукция в нейтральном сечении магнита стремится к остаточной индукции материала магнита 1,2 Тл.

Полученные зависимости были аппроксимированы методом наименьших квадратов в виде экспоненциальной функции:

$$B_{\text{НС}} = B_r \cdot \left(e^{\frac{-0,25-50 \cdot \delta}{h_{\text{МАГН}}}} - 30 \cdot \delta + 0,095 \right) \quad (4.58)$$

где B_r - остаточная индукция материала, из которого сделан магнит, δ - величина воздушного зазора (м), $h_{\text{МАГН}}$ - высота постоянного магнита (м)

На рис. 4.23 и 4.24 представлены данные, полученные на основе экспериментов в программе «Ansys Maxwell 16» (сплошные линии) и расчётные данные, полученные с использованием выражения (4.58) (пунктирные линии). Погрешность определения индукции в нейтральном сечении постоянного магнита с помощью полученного выражения (4.58) не превысила 2,8%. Средняя погрешность составила 1,1%.

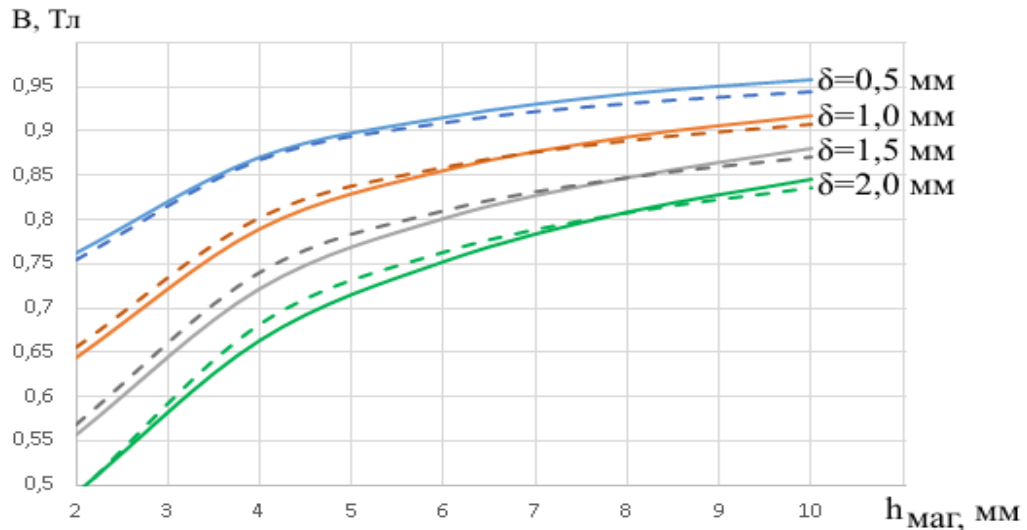


Рисунок 4.23 - Зависимость магнитной индукции в нейтральном сечении магнита от его ВЫСОТЫ

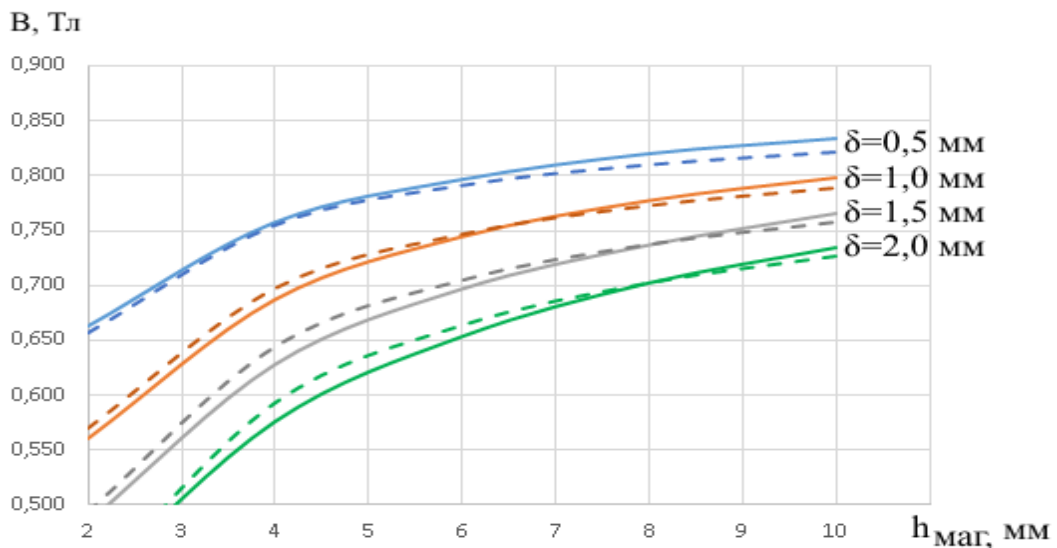


Рисунок 4.24 - Зависимость магнитной индукции в воздушном зазоре от высоты магнита

При изменении угла наклона воздушного зазора к оси вращения ротора магнитная индукция в нейтральном сечении магнита также меняется. Для определения зависимости магнитной индукции в нейтральном сечении магнита от угла наклона воздушного зазора

в программе «Ansys Maxwell 16» был выполнен анализ ЭМ с ПМ с разным углом наклона воздушного зазора к оси вращения ротора. Установлено, что среднее значение магнитной индукции в нейтральном сечении постоянного магнита при одинаковой высоте, длине и величине полюсного перекрытия в аксиальных ЭМ меньше, чем в радиальных. На основании полученных данных выражение (4.58) для исследованных эквивалентных машин преобразовано к виду:

$$B_{НС} = B_r \cdot \left(e^{\frac{-0,25-50 \cdot \delta}{h_{МАГН}}} - 30 \cdot \delta + 0,095 \right) \cdot (1 - 0,08 \cdot |\sin(\alpha)|) \quad (4.59)$$

Полученное выражение (4.58) учитывает свойства активных материалов, а также размеры и форму исследованной магнитной системы, так как экспериментальные данные, на основе которых была выполнена аппроксимация, были получены при анализе соответствующей трёхмерной модели магнитной цепи генератора.

Использование выражений (4.57) и (4.59) позволяет определить высоту ярма индуктора в зависимости от высоты магнита. Использование выражения (4.20) и найденного значения магнитной индукции в воздушном зазоре позволяет определить диаметр эталонной окружности ЭМ, являющийся одним из главных размеров ЭМ. В дальнейшем эти величины используются в формулах (4.32), (4.33), (4.50), (4.52) и (4.55) для определения массогабаритных показателей ЭМ с ПМ.

Таким образом, с помощью программы «Ansys Maxwell 16» были получены выражения, позволяющие определить величину магнитной индукции в воздушном зазоре при различной величине воздушного зазора и различной высоте постоянных магнитов с учётом свойств используемых активных материалов, а также размеров и формы постоянных магнитов и всей магнитной системы ЭМ. Выражение (4.59) было использовано при массогабаритной оптимизации разработанного генератора с ПМ.

4.3 Разработка программы для расчёта и массогабаритной оптимизации генератора с постоянными магнитами

Известные методики расчёта ЭМ содержат множество формул, таблиц и графиков со справочной или другой необходимой информацией. Выполнение большого количества вычислений вручную является весьма утомительным процессом, вследствие чего возможны ошибки, любая из которых, в конечном счёте, может привести к неправильному

результату. Поэтому автоматизация процесса расчёта параметров на этапе проектирования является актуальной задачей для любого типа ЭМ, в том числе и для ЭМ с ПМ.

В связи с этим, для снижения трудоёмкости при расчёте генератора с постоянными магнитами разработана программа расчета и массогабаритной оптимизации генератора с постоянными магнитами [83]. Она предназначена для расчета параметров генератора - главных размеров, параметров обмотки якоря, магнитных цепей (в том числе размеров постоянных магнитов), и других параметров, для теплового расчёта, а также для выполнения расчёта и оптимизации массогабаритных показателей. Программа содержит 7 этапов расчета, на каждом из которых определяются значения соответствующих параметров проектируемого генератора с ПМ:

- 1 – расчет основных параметров генератора;
- 2 – расчет обмотки якоря;
- 3 – расчет магнитной цепи на полюс;
- 4 – расчёт габаритных размеров;
- 5 – расчет массы;
- 6 – расчет потерь и КПД;
- 7 – тепловой расчёт.

Программа разработана в среде программирования Delphi 7 на языке Pascal.

Программа расчета и массогабаритной оптимизации генератора с постоянными магнитами позволяет упростить и максимально автоматизировать процесс проектирования генератора с постоянными магнитами. Перед началом расчета необходимо ввести исходные данные, на основе которых происходит расчет по разработанной методике (Приложение Г).

Расчеты выполняются в вышперечисленной последовательности. Расчёт каждого следующего этапа выполняется только после завершения предыдущего. Для выполнения расчёта на каждом из этапов необходимо нажать соответствующую кнопку («Расчитать основные параметры генератора», «Расчитать обмотку якоря» и т.д.) (рис. 4.25). При вычислении параметров генератора используются не только исходные данные, но и данные, которые необходимо вводить вручную. В процессе расчета автоматически появляются окна для ввода требуемой величины, значение переменных вводятся в соответствующие поля появляющихся окон. После ввода всех требуемых данных при нажатии на кнопку «Продолжить расчет» (рис. 4.26-4.28) расчет параметров ЭМ продолжается и при необходимости появляются новые окна для ввода требуемой информации. Таким образом, весь

процесс расчета сводится к введению необходимых данных в соответствующие поля появляющихся окон.

Для облегчения выбора значения вводимой величины во всплывающих окнах представлены вспомогательные (справочные) данные - графики или диапазоны значений, из которых необходимо выбрать нужное значение. Такой подход позволяет максимально упростить и сократить время поиска, выбора и ввода данных, а соответственно, сократить время расчета параметров проектируемого генератора.

Процесс выбора необходимых справочных данных в программе расчета и оптимизации генератора с постоянными магнитами автоматизирован по сравнению с существующими аналогичными программами [50] за счет внедрения в процесс ее расчета алгоритма работы с таблицами, содержащими справочные данные о кривых размагничивания сталей, а также о размерах проводников прямоугольного и круглого сечения из ГОСТ 434-78 («Проволока прямоугольного сечения и шины медные для электрических целей») и ГОСТ 26615-85 («Провода обмоточные с эмалевой изоляцией»).

В процессе расчета табличные значения не нужно выбирать и вводить вручную. Необходимые для расчета величины подбираются автоматически путем последовательного перебора всех значений из соответствующих таблиц. В случае, если выбранная из таблицы величина (размер проводника) не позволяет выполнить расчёт генератора из-за выхода какого-либо параметра за допустимые пределы, из таблицы выбирается следующая величина и процесс расчета повторяется до тех пор, пока не будет выбрано значение, которое удовлетворяет всем требованиям. В случае, если в таблице не оказывается такого значения, появляется сообщение с предупреждением о невозможности расчёта с указанием причины. В этом случае необходимо скорректировать исходные данные или ввести в процессе расчёта другие значения переменных (например, другую величину отношения активной длины к диаметру эталонной окружности) и повторить процесс расчёта сначала. Автоматизированная выборка табличных данных позволяет избежать ручного выбора и ввода данных, что позволяет максимально сократить время расчета проектируемого генератора и исключить возможные ошибки ручной обработки данных.

Все исходные и расчётные данные записываются в отдельной строке, напротив каждого значения указывается название расчётной величины.

Во всплывающих окнах приводятся вспомогательные данные со значениями, которые могут быть оптимальны только для авиационных генераторов (исходя из использованных источников). При проектировании промышленных генераторов необходимые данные могут быть выбраны из другого диапазона.

В программе используются табличные данные кривой размагничивания стали магнитопроводов якоря и индуктора, которые хранятся в файле Excel. Для расчёта были использованы два файла с данными о кривой размагничивания стали Somaloy-1000 и стали 49K2ФА (Приложение Б). Если необходимо использовать другую сталь, то данные о кривой размагничивания этой стали должны быть переведены в табличный вид, после чего они так же могут быть использованы для расчета параметров проектируемого генератора.

Главное окно программы (рис. 4.25) содержит поля ввода исходных данных и окно, в котором отображаются результаты всех этапов расчёта. Напротив каждого поля ввода данных указано, какой именно величине будет соответствовать вводимое значение.

Рисунок 4.25 - Главное окно разработанной программы расчета и массогабаритной оптимизации генератора с постоянными магнитами

Для величин, значения которых вводятся вручную, поля ввода данных имеют жёлтый фон, а для величин, значения которых рассчитываются автоматически, поля имеют белый фон.

Кроме того, главное окно содержит кнопки запуска каждого из шести вышеперечисленных этапов расчёта. Результаты расчёта каждого этапа можно просмотреть в окне вывода результатов на главной форме путем перемещения ползунка на полосе прокрутки.

В нижней части главного окна расположены кнопки «Сохранить в файл», «Загрузить из файла» и «Создать скрипт Maxwell». Кнопка «Сохранить в файл» предназначена для сохранения результатов расчёта в таблице Excel для последующего анализа или дальнейшего перерасчёта. Кнопка «Загрузить из файла» предназначена для загрузки исходных данных и результатов расчёта из файла, сформированного при нажатии на кнопку «Сохранить в файл». Это позволяет повторять расчёт генератора, не вводя каждый раз нужные исходные данные, и пересчитывать все или некоторые этапы расчёта (без повторения расчёта предыдущих). Это позволяет ускорить процесс перерасчёта отдельных параметров проектируемого генератора.

В процессе расчёта, как уже было сказано выше, появляются окна для ввода некоторых данных. Одно из таких окон приведено на рис.4.26.

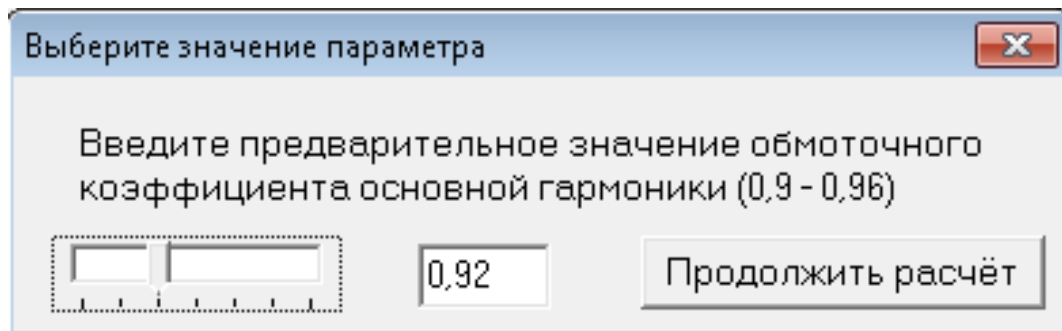


Рисунок 4.26 - Окно ввода предварительного значения обмоточного коэффициента основной гармоники

Как видно из рис. 4.26, необходимую величину можно ввести в текстовое поле, а можно выбрать из предложенного диапазона путем перемещения ползунка в нужное положение. Это позволяет сделать выбор значения какой-либо величины наиболее удобным способом.

В некоторых случаях ввод нужных данных осуществляется путем выбора значения из выпадающего списка, как показано на рис. 4.27.

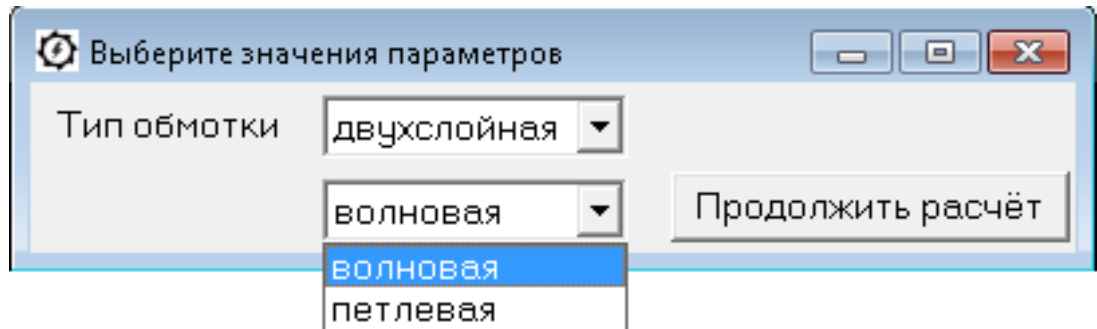


Рисунок 4.27 - Выбор параметров обмотки якоря из выпадающего списка

При выполнении очередного этапа расчёта выдается соответствующее сообщение, как показано на рис. 4.28.

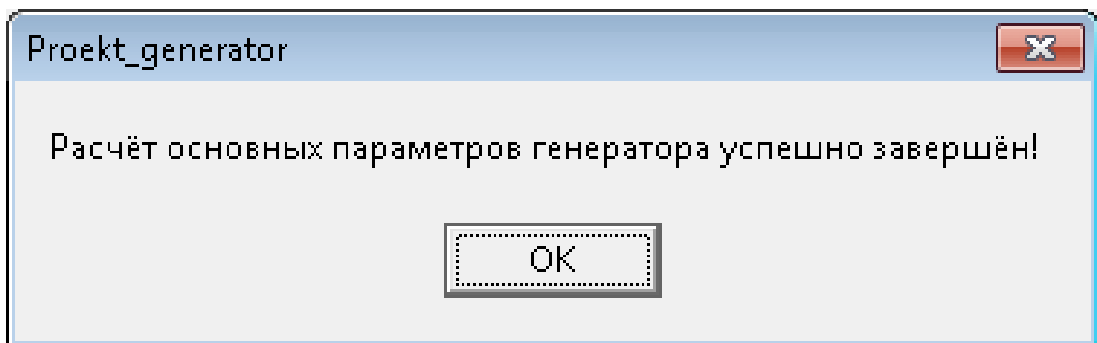


Рисунок 4.28 - Сообщение о завершении этапа расчёта основных параметров ЭМ

После завершения очередного этапа расчёта можно приступать к следующему. Расчёт каждого этапа, кроме первого, можно производить только после того, как были выполнены все предыдущие.

После завершения всех этапов расчёта для анализа полученных данных необходимо сохранить результаты в файл Excel путем нажатия на кнопку «Сохранить в файл». Таблица Excel с результатами представлена на рис. 4.29.

Исходные данные	Значение
Номинальная мощность, В*А	15000
Номинальное фазное напряжение, В	115
Число фаз	3
Номинальная частота вращения, об/мин	4000
Частота, Гц	400
Кэффициент мощности при номинальной нагрузке	0,84
Предварительное значение линейной нагрузки, А/м	28000
Предварительное значение индукции в зазоре, Тл	0,7
Кэффициент ЭДС (1,05 - 1,15) (меньшее значение при большей мощности)	1,10
Кэффициент полюсного перекрытия (0,8 - 0,9)	0,85
Остаточная индукция постоянного магнита (1,10-1,25 Тл)	1,15
Козрцитивная сила постоянного магнита (840000-900000 А/м)	850000
Кэффициент перегрузки по току (2...3)	2
Основные параметры генератора	
Расчётная электромагнитная мощность, В*А	16500
Номинальный ток фазы, А	41,6667
Расчётный коэффициент полюсного перекрытия	0,865
Кэффициент формы ЭДС	1,0908
Число пар полюсов	6

Рисунок 4.29 - Файл Excel с результатами расчётов

Кнопка «Создать скрипт Maxwell» предназначена для создания специального файла скрипта, который позволяет в программе «Ansys Maxwell 16» автоматически построить трёхмерную модель генератора с постоянными магнитами на основе полученных расчётных данных. Текст скрипта формируется автоматически на основе разработанных универсальных алгоритмов построения ЭМ с ПМ радиальной, аксиальной и конической формы, созданных на основе опыта работы с трёхмерными объектами в программе «Ansys Maxwell 16». Из результатов расчёта выбираются необходимые величины параметров, значения некоторых записываются в текст скрипта (Приложение Д).

Для оптимизации параметров генератора используется меню выбора критерия оптимизации и кнопка «Выполнить оптимизацию», как показано на рис. 4.30.

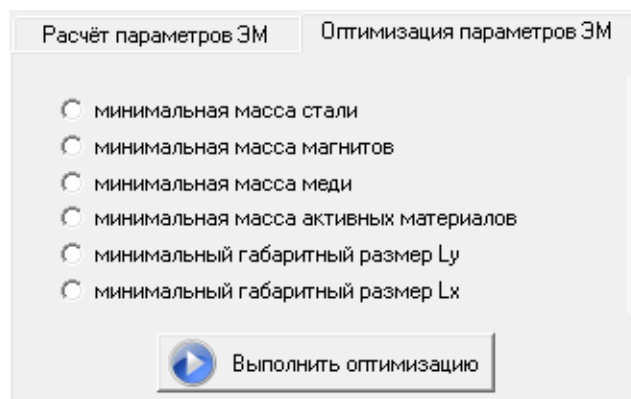


Рисунок 4.30 - Меню выбора критерия оптимизации

Оптимизация выполняется в соответствии с выведенными формулами, представленными в п. 4.2.

В данной работе оптимизация массогабаритных показателей генератора производилась по трём критериям – минимальный размер L_x , минимальный размер L_y и минимальная масса активных материалов $M_{АКТ_МАТ}$. В результате проведенных расчётов получены данные, представленные в таблице 4.3.

Таблица 4.3 - Результаты расчёта и оптимизации параметров генератора для АВЭК

Критерий оптимизации \ Варьируемый параметр	Угол наклона воздушного зазора к оси вращения ротора	Конструктивный коэффициент	Высота постоянных магнитов
Минимальный габаритный размер генератора L_x	$\alpha=90^\circ$	$\lambda=0,26$	$h_{\text{магн}}=2$ мм
Минимальный габаритный размер генератора L_y	$\alpha=180^\circ$	$\lambda=0,26$	$h_{\text{магн}}=2$ мм
Минимальная масса активных материалов $M_{\text{АКТ_МАТ}}$	$\alpha=180^\circ$	$\lambda=0,26$	$h_{\text{магн}}=2$ мм

Результаты, представленные в табл. 4.3 показали, что проектируемый генератор радиальной конструкции с внешним ротором ($\alpha=180^\circ$) обладает наименьшей массой активных материалов и габаритным размером L_y . При этом наименьший габаритный размер L_x достигается при аксиальном исполнении ($\alpha=90^\circ$). Конический генератор не является лучшим по какому-либо массогабаритному показателю, однако, за счёт своей формы он может быть максимально компактно размещен в конической ступице, имеющей хорошую аэродинамику. В связи с этим, для анализа были выбраны и рассчитаны три модели генератора с постоянными магнитами – радиальный ($\alpha=180^\circ$), аксиальный ($\alpha=90^\circ$) и конический ($\alpha=140^\circ$).

4.4 Электромагнитный анализ моделей генераторов с постоянными магнитами для перспективного авиационного ветроэнергетического комплекса в программе «Ansys Maxwell 16»

В программе «Ansys Maxwell 16», предназначенной для анализа электромагнитных устройств, в том числе вращающихся ЭМ, были построены трёхмерные модели (рис. 4.31) проектируемых генераторов, являющихся частью АВЭК. При построении моделей были использованы результаты расчётов, полученных с помощью разработанной программы для расчёта и оптимизации параметров генератора с постоянными магнитами [83, 84]. В качестве исходных данных для построения модели были использованы геометрические размеры магнитопроводов, угол наклона воздушного зазора к оси вращения ротора, количество и размер пазов, сечение проводников обмотки якоря и их количество в пазу и многие другие параметры. Кроме того, при создании модели были учтены свойства активных материалов путем назначения каждому элементу модели свойств определенного материала. Обмотка якоря была определена как медь, постоянные магниты – как сплав неодим-железо-бор $Nd_2Fe_{14}B$ марки N35, магнитопроводы якоря и индуктора – как электротехническая сталь 49К2ФА (для радиальной модели) и Somaloy-1000 (для конической и аксиальной моделей) (Приложение Б).

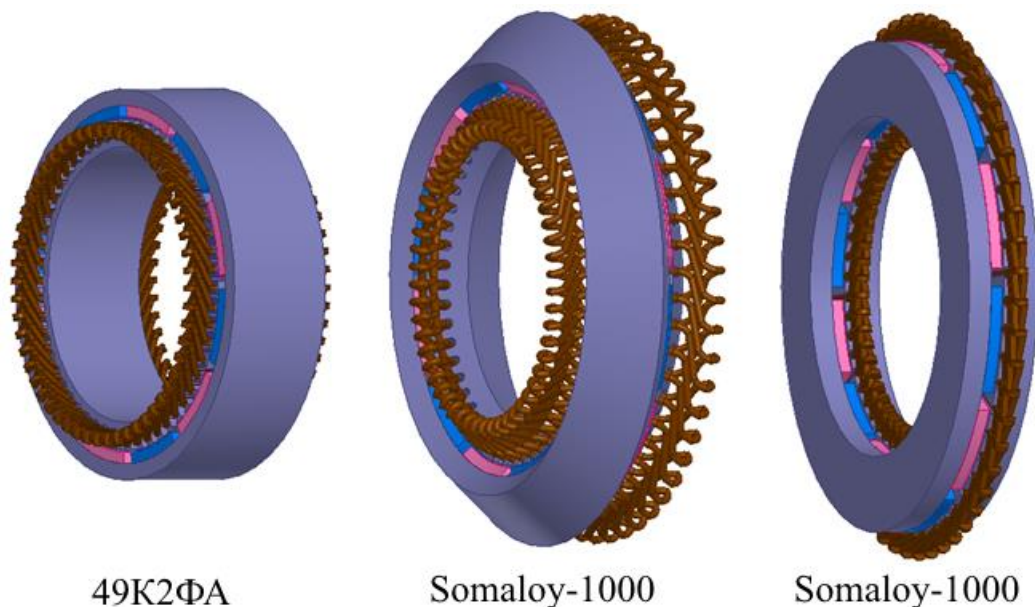


Рисунок 4.31 - Модели радиального, конического и аксиального генераторов с ПМ для АВЭК

После построения модели и задания необходимых условий моделирования был выполнен анализ. Модели были исследованы при заданной частоте вращения, соответствующей расчётной в номинальном режиме работы.

В результате расчёта модели были получены осциллограммы фазных напряжений на холостом ходу, представленные на рис. 4.32. Исходя из полученных данных разница в величине напряжения между радиальным, аксиальным и коническим генераторами не превысила 4%.

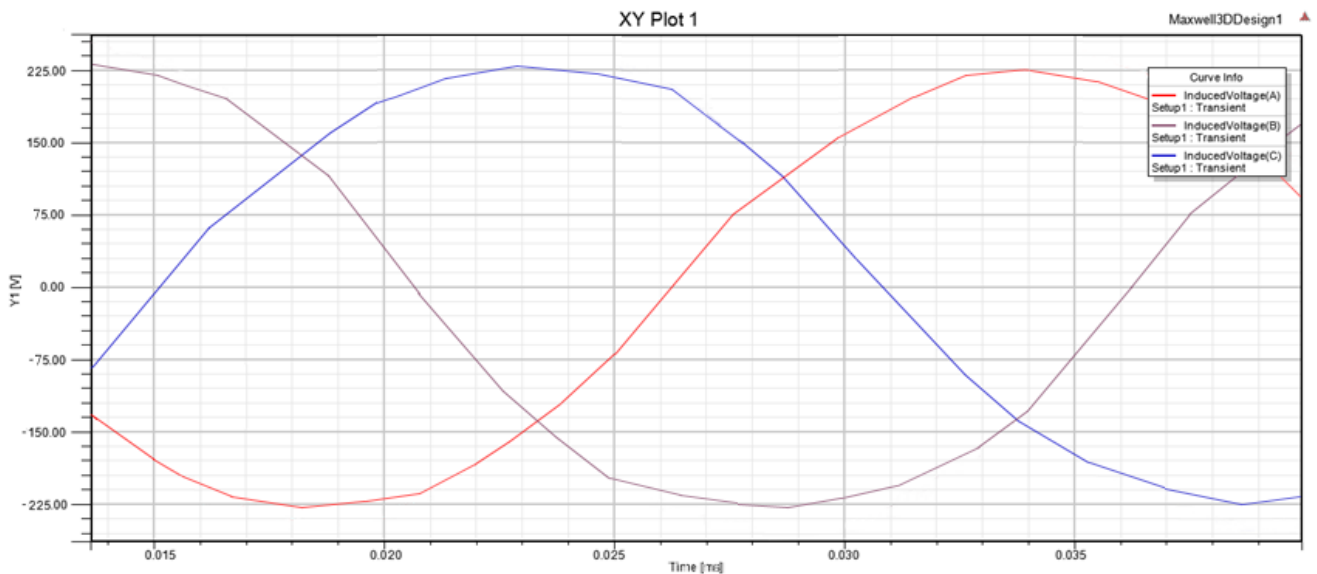


Рисунок 4.32 - Осциллограммы фазных напряжений на холостом ходу

Амплитуда фазного напряжения при частоте вращения 4000 об/мин составила $U_M=216$ В, при этом величина действующего напряжения равна:

$$U_{\phi} = \frac{U_M}{\sqrt{2}} \quad (4.60)$$

$$\text{Вычисляем: } U_{\phi} = \frac{222}{\sqrt{2}} = 157,4 \text{ В}$$

При работе на активно-индуктивную нагрузку, электрическая схема которой представлена на рис. 4.33, действующее значение фазного напряжения составило 117 В, при этом фазный ток составил 46,2 А.

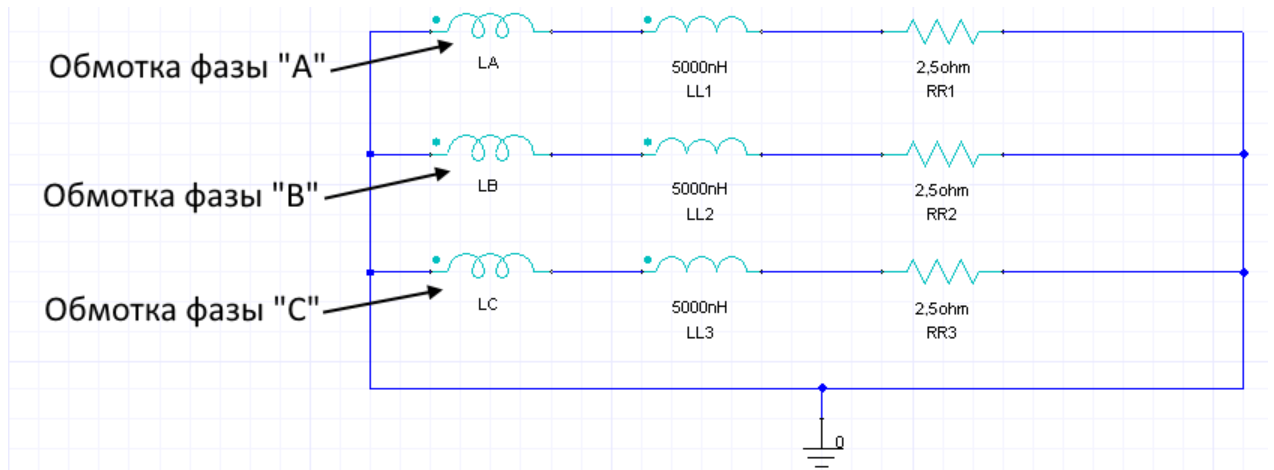


Рисунок 4.33 - Электрическая схема с обмотками генераторов программе «Ansys Maxwell Circuit Editor»

Кроме расчёта фазных напряжений и токов в программе «Ansys Maxwell 16» можно вычислить значение магнитной индукции в любой части модели. Для наглядности полученные результаты могут быть представлены в виде графической картины. Картина распределения магнитной индукции в магнитопроводах индуктора генератора радиальной конструкции представлена на рис. 4.34, конической – на рис. 4.35, аксиальной – на рис. 4.36.

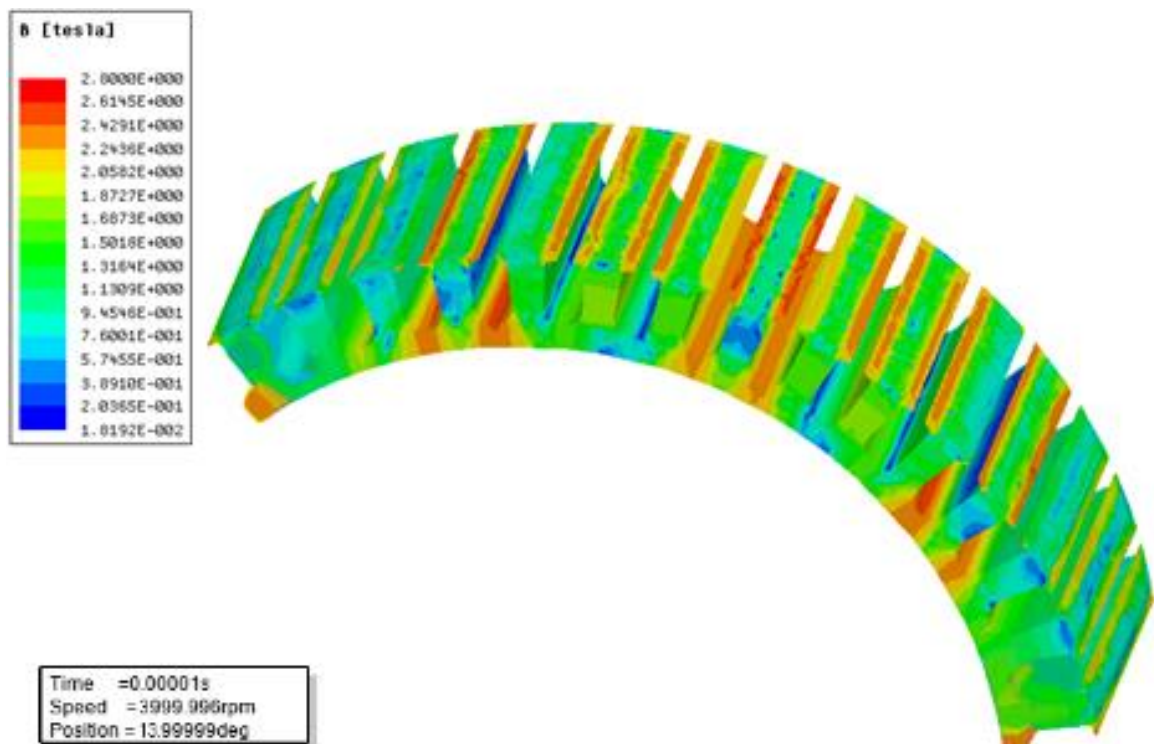


Рисунок 4.34 – Картина распределения магнитной индукции в магнитопроводе якоря радиального генератора с ПМ

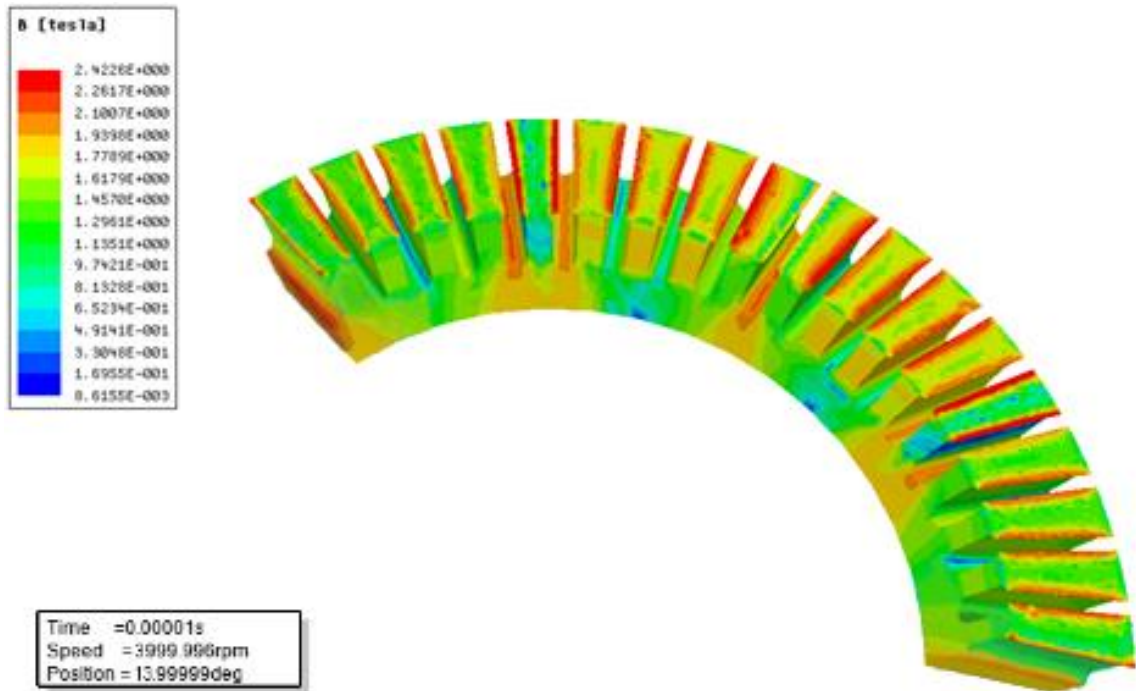


Рисунок 4.35 – Картина распределения магнитной индукции в магнитопроводе якоря конического генератора с ПМ

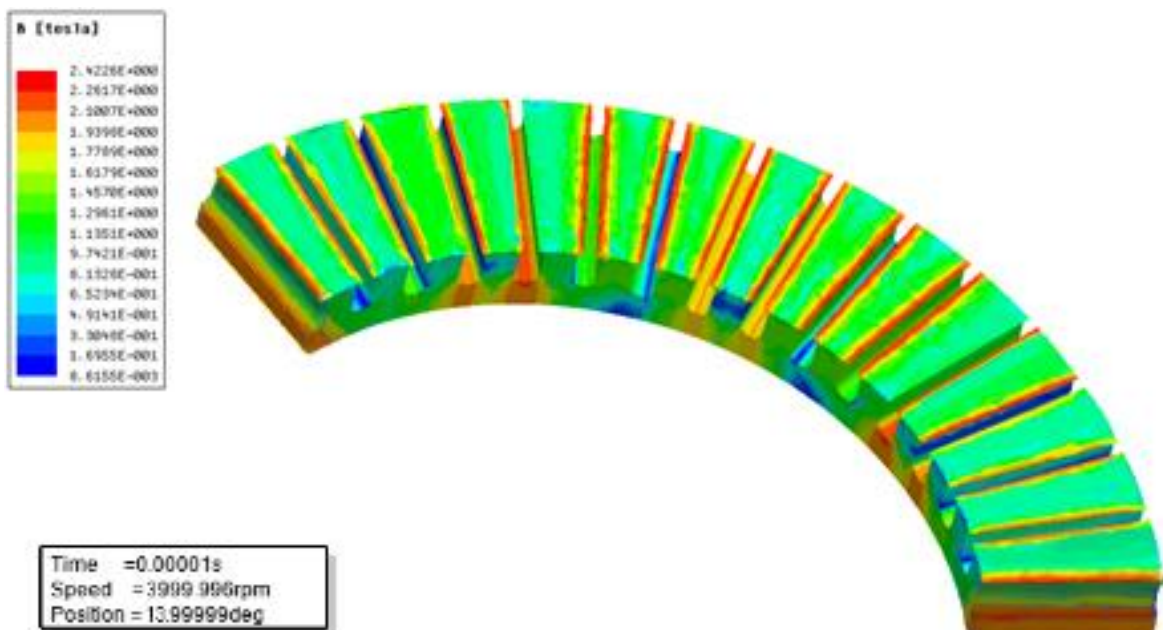


Рисунок 4.36 – Картина распределения магнитной индукции в магнитопроводе якоря аксиального генератора с ПМ

Анализ полученных результатов показал, что средняя погрешность в определении магнитной индукции в магнитопроводах якоря и в воздушном зазоре, а также фазного

напряжения, полученных с помощью расчёта по методике и с помощью программы «Ansys Maxwell 16» составила 8%.

Таким образом, совместное использование разработанной программы расчёта и массогабаритной оптимизации генератора с постоянными магнитами и программы «Ansys Maxwell 16» позволяет получить необходимые данные для оценки параметров и характеристик генератора с ПМ для АВЭК. Подобный подход позволяет автоматизировать процесс проектирования, а также сократить время расчёта и оптимизации параметров генератора с ПМ.

4.5 Сквозное проектирование генератора с постоянными магнитами для авиационного ветроэнергетического комплекса

Проектирование электрических машин является сложной инженерной задачей. Если раньше проектирование выполнялось вручную (на бумаге или с использованием электронных вычислительных машин для расчётов), то в настоящее время при проектировании ЭМ в полной мере используется вычислительная техника и специальное программное обеспечение, позволяющее выполнить все стадии проектирования. Это привело к появлению нового направления в развитии электромашиностроения, так называемого, сквозного проектирования электромеханических устройств, которое ориентировано на безбумажную технологию оформления документации при разработке, производстве и испытании изделия [144]. Система сквозного проектирования является перспективной и воплощение в жизнь каждой из её составляющих является шагом на пути к её полной реализации.

Анализируя программные средства, используемые для проектирования ЭМ, можно выделить четыре этапа сквозного проектирования. На первом этапе используются, в основном, некоммерческие программы, разрабатываемые, как правило, каждым отдельным предприятием самостоятельно. Задачей этого этапа является расчет основных параметров машины, таких как машинные постоянные, параметры обмоток ротора и статора, выбор рабочих частот, числа полюсов, их тип, и пр. После выполнения этого предварительного этапа конструктор может приступить ко второму этапу - созданию CAD модели ЭМ и отдельных ее частей, с различной детализацией. Этот этап проектирования так же подразумевает разностороннее физическое моделирование различных процессов электриче-

ской машины. Сюда входит моделирование электромагнитных полей, расчет распределения тепла, переходных процессов и т.д. [3, 18, 21, 25, 31, 43, 46, 53, 56, 98, 131, 137, 141, 155] с целью проверки или оптимизации отдельных показателей [50, 158]. К сожалению, далеко не все элементы ЭМ можно выбрать или рассчитать без привлечения посторонних программных средств. Например, расчет механических показателей валов и осей, выбор подшипников, изоляции и проводов для обмоток практически невозможно выполнить, пользуясь только программами общего назначения. Таким образом, использование специальных программ и баз данных для выбора и/или расчета дополнительных компонентов можно выделить как третий этап проектирования.

Заключительным этапом проектирования можно назвать так называемую виртуальную эксплуатацию. На этом этапе производится моделирование готового изделия в предполагаемых условиях работы. Таким образом, виртуальная эксплуатация позволяет отладить управляющие программы, системы защиты, согласовать условия обслуживания и т.п. Выявленные конфликты устраняются еще на этапе проектирования, таким образом, при изготовлении относительно дорогостоящих прототипов сокращается время на поиск и устранение неполадок, сокращается количество отказов и поломок оборудования, ускоряется процесс поиска программных и конструктивных решений [144].

Сопоставление программ расчётов отдельных частей, узлов ЭМ, накопление банков данных, решение вопроса создания автоматизированной системы проектирования ЭМ – одна из трудных и важных задач электротехнической науки [101, с. 6]. Проектирование ЭМ предполагает выполнение специальных расчетов (электромагнитного, теплового, прочностного, вентиляционного, конструктивного) для всех единиц, составляющих машину. Однако, из существующего многообразия методик проектирования и большого количества специализированного программного обеспечения не так просто найти подходящую методику расчёта, выбрать программное обеспечение, разобраться в его интерфейсе и особенностях работы с ним.

Разработанная методика, реализованная в среде «Delphi 7» в виде программы для ЭВМ, позволяет выполнять расчёт в автоматизированном режиме, поэтому она является реализацией первого этапа сквозного проектирования ЭМ с ПМ [68].

Разработанные скрипты для программы «Ansys Maxwell 16», позволяющие в автоматическом режиме построить трёхмерную модель ЭМ (рис. 4.37) представляют собой реализацию второго этапа сквозного проектирования ЭМ с ПМ.

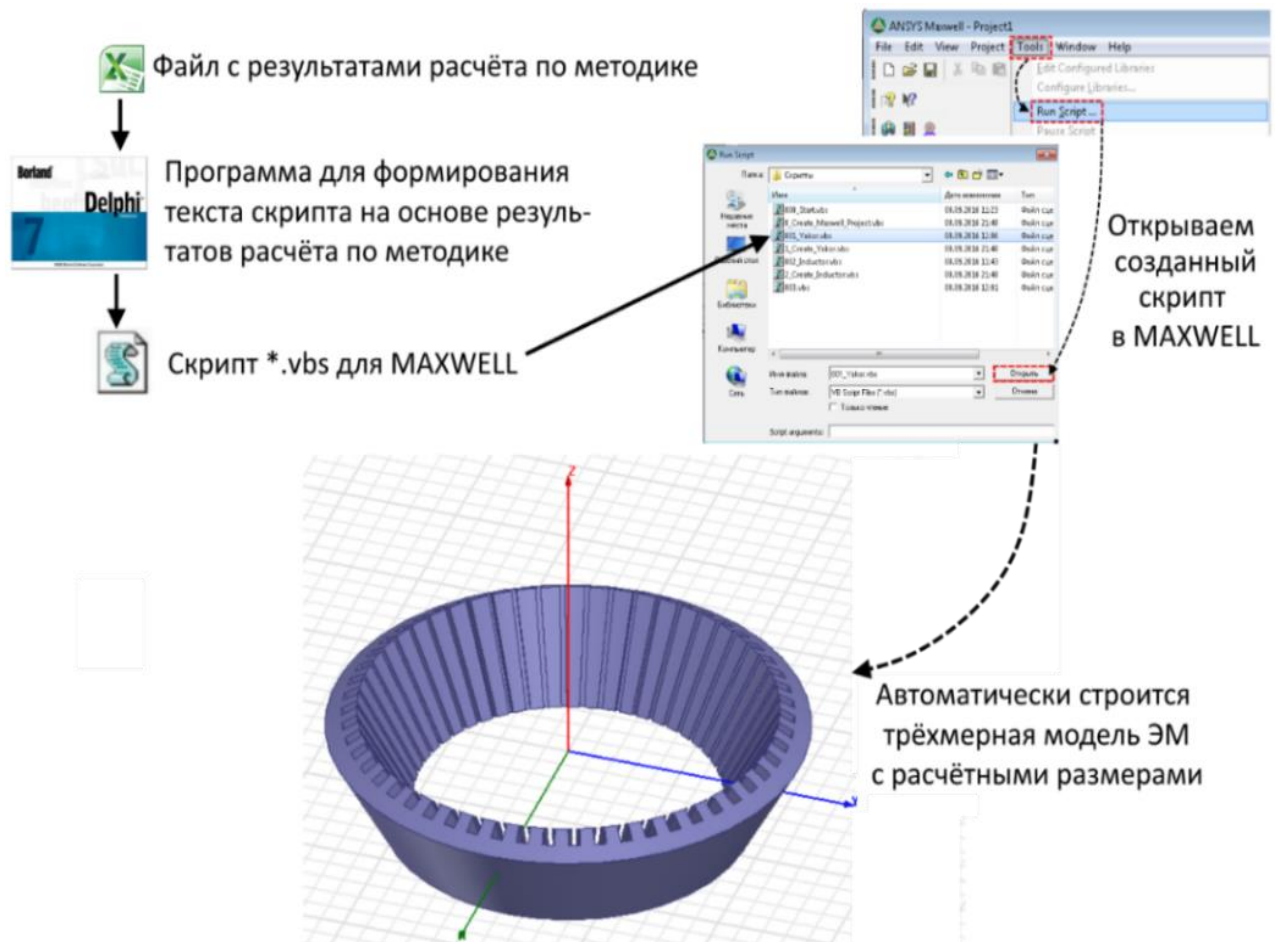


Рисунок 4.37 – Пример построения конического магнитопровода якоря с углом наклона воздушного зазора к оси вращения ротора 30° в программе «Ansys Maxwell 16»

Для автоматического создания таких скриптов была разработана программа создания трёхмерной модели синхронной электрической машины с постоянными магнитами [85]. Для удобства функции этой программы были добавлены в программу расчета и оптимизации генератора с постоянными магнитами в виде отдельной кнопки «Создать скрипт MAXWELL» (рис. 4.26).

Содержание скрипта для последовательного построения каждой части ЭМ формируется на основе разработанного шаблона, в который добавляются соответствующие значения параметров, полученные в результате расчёта. Таким образом, формируется полная трёхмерная модель ЭМ с ПМ, содержащая обмотку якоря, магнитопроводы якоря и индуктора, а также постоянные магниты.

После создания и проверки трёхмерной модели ЭМ в программе «Ansys Workbench 14.5» она передаётся для выполнения связанного анализа (электромагнитного, теплового, прочностного, вентиляционного) (рис. 4.38).

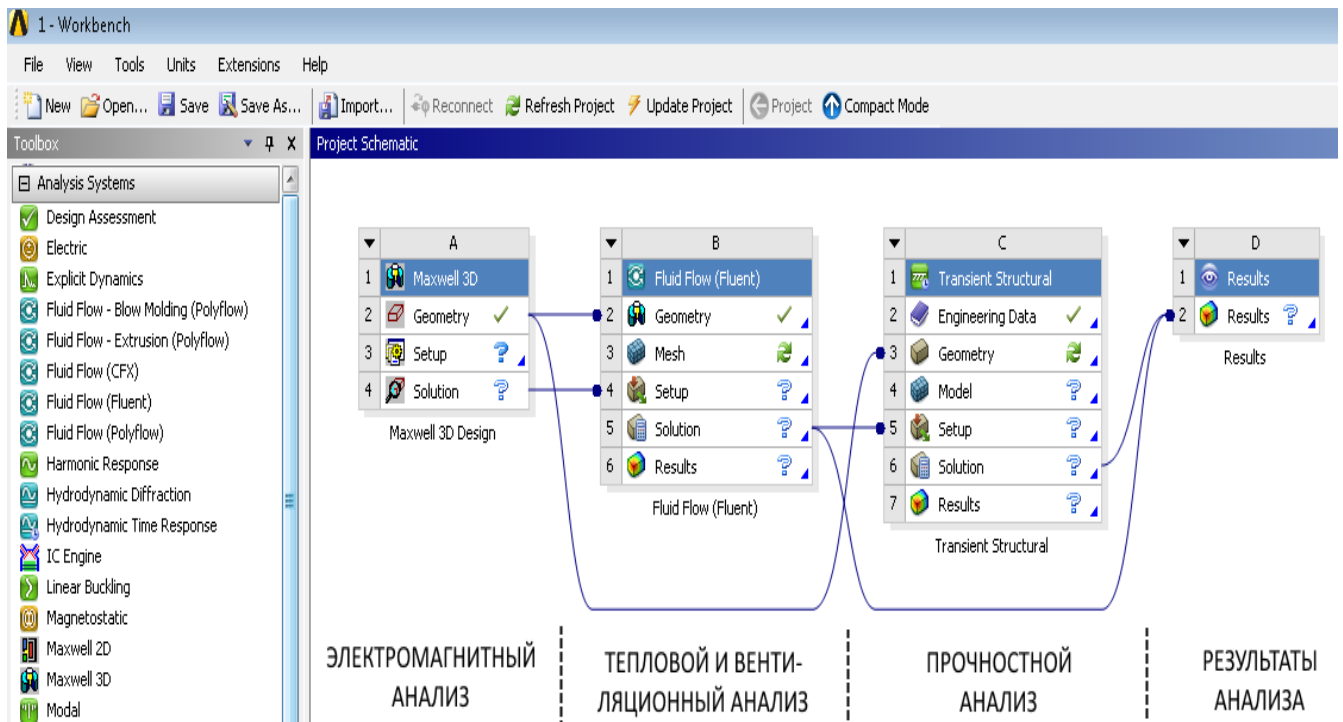


Рисунок 4.38 - Связанный анализ в программе «Ansys Workbench 14.5»

Программа «Ansys Workbench 14.5» позволяет использовать результаты одного анализа как исходные данные для другого. Электромагнитный анализ выполняется в программе «Ansys Maxwell 16», после чего результаты передаются для теплового анализа в модуль «FluidFlow (Fluent)» в виде потерь на нагрев в обмотках и потерь от вихревых токов, которые учитываются при тепловом и вентиляционном анализе, а также для прочностного анализа в модуль «Transient Structural» в виде электромагнитных моментов для учёта электромагнитных сил, стремящихся деформировать ЭМ (особенно зубцовую зону) при вращении ротора.

Использование скриптов и разработанная программа для их автоматического создания позволяет автоматизировать переход от первого ко второму этапу сквозного проектирования ЭМ путём создания трёхмерной модели. Полная реализация второго этапа (анализ и доработка модели) требует специализированной подготовки и не может быть упрощена в общем случае. Третий и четвертый этапы сквозного проектирования данное исследование не затрагивает.

Таким образом, разработанная методика расчёта ЭМ с ПМ, а также программа для автоматического построения трёхмерных моделей в программе «Ansys Maxwell 16» являются вкладом в развитие и реализацию сквозного проектирования ЭМ с ПМ [68].

4.6 Обоснование достоверности разработанной методики проектирования генератора с постоянными магнитами для перспективного авиационного ветроэнергетического комплекса и результатов моделирования в программе «Ansys Maxwell 16»

На основании данных, изложенных в руководстве по технической документации генератора ГТ30НЖЧ12, а также на основании данных, полученных при изучении его стендового образца в разрезе (рис. 4.39) были установлены параметры подвозбудителя генератора ГТ30НЖЧ12, представленные в таблице 4.4.

Таблица 4.4 - Параметры подвозбудителя генератора ГТ30НЖЧ12

№	Название параметра	Значение
1.	Диаметр эталонной окружности, мм	68
2.	Активная длина ЭМ, мм	20
3.	Угол наклона воздушного зазора, град	0
4.	Число фаз	3
5.	Число пар полюсов	4
6.	Количество пазов якоря	36
7.	Частота вращения (номинальная), об/мин	12000
8.	Номинальное фазное напряжение, В	50
9.	Номинальный фазный ток, А	6
10.	Частота, Гц	800
11.	Материал постоянных магнитов	SmCo

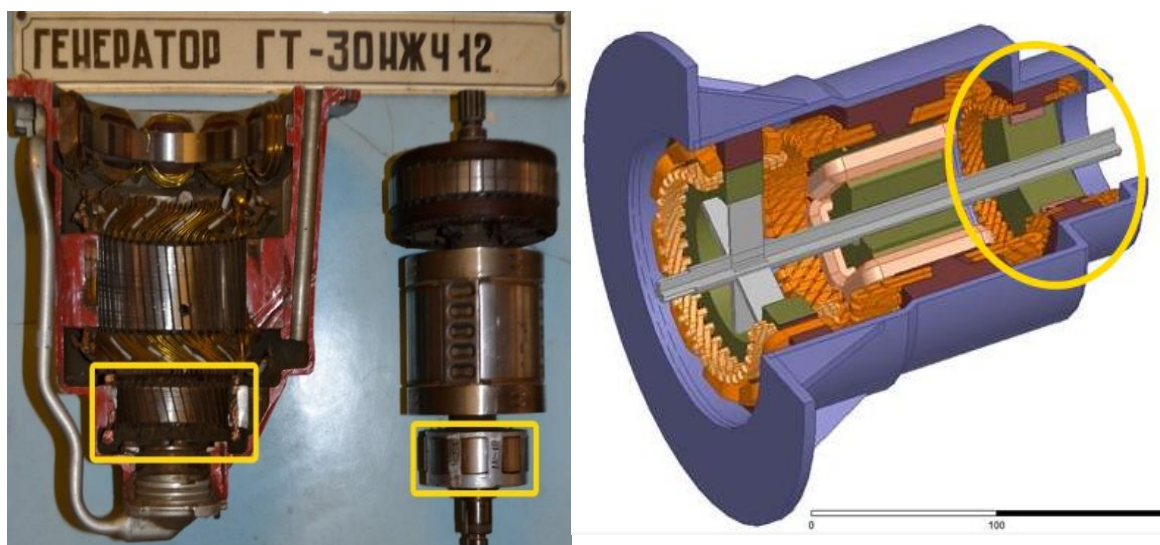


Рисунок 4.39 - Подвозбудитель генератора ГТ30НЖЧ12 на стендовом образце и в трёхмерной компьютерной модели в программе «Ansys Maxwell 16»

Выходные характеристики подвозбудителя определены с помощью информации, изложенной в техническом описании генератора ГТ30НЖЧ12 (рис. 4.40).

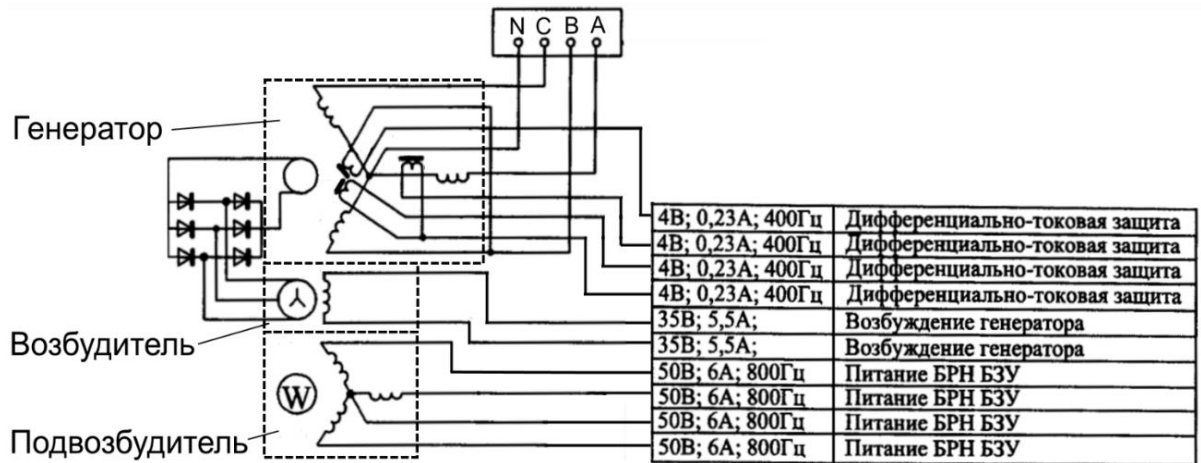


Рисунок 4.40 - Электрическая схема генератора ГТ30НЖЧ12

На основании собранной информации определены исходные данные, представленные в таблице 4.5, для расчёта подвозбудителя генератора ГТ30НЖЧ12 с использованием разработанной методики расчёта ЭМ с ПМ.

Таблица 4.5 - Исходные данные для расчёта подвозбудителя генератора ГТ30НЖЧ12

№ п/п	Название параметра	Значение параметра
1.	Номинальная мощность	1800 В·А
2.	Номинальное фазное напряжение	50 В
3.	Число фаз	3
4.	Номинальная частота вращения	12000 об/мин
5.	Частота	800 Гц
6.	Коэффициент мощности при номинальной нагрузке	0,8 (отстающий)
7.	Предварительное значение линейной нагрузки	29000 А/м
8.	Предварительное значение индукции в зазоре	0,5 Тл
9.	Относительная ЭДС	1,15
10.	Коэффициент полюсного перекрытия	0,67
11.	Остаточное значение магнитной индукции ПМ	0,82 Тл
12.	Коэрцитивная сила ПМ	780000 А/м
13.	Коэффициент перегрузки по току	2

После расчёта были получены результаты, представленные в таблице 4.6.

Таблица 4.6 - Результаты расчёта подвозбудителя генератора ГТ30НЖЧ12

№ п/п	Название параметра	Значение параметра
1.	Диаметр эталонной окружности	67,9 мм
2.	Число витков фазы	86
3.	Число пазов на полюс и фазу	1,5
4.	Число пазов якоря	36
5.	Зубцовое деление	6 мм
6.	Диаметр расточки якоря	68,2 мм
7.	Наружный диаметр якоря	89,5 мм
8.	Активное сопротивление фазы	0,5 Ом
9.	Индукция в воздушном зазоре	0,6 Тл
10.	Длина магнита	21 мм
11.	Ширина магнита	17 мм
12.	Высота магнита	8,5 мм
13.	Наружный диаметр индуктора	67,6 мм
14.	Внутренний диаметр индуктора	42 мм
15.	КПД	0,83

В результате проведенных расчётов установлено, что расчётные геометрические размеры соответствуют реальным размерам с погрешностью 1,5%, что позволяет сделать вывод о достоверности данных, получаемых с использованием разработанной методики проектирования ЭМ с ПМ.

На основании результатов расчёта в программе «Ansys Maxwell 16» построена трёхмерная компьютерная модель подвозбудителя генератора ГТ30НЖЧ12, представленная на рис. 4.41.

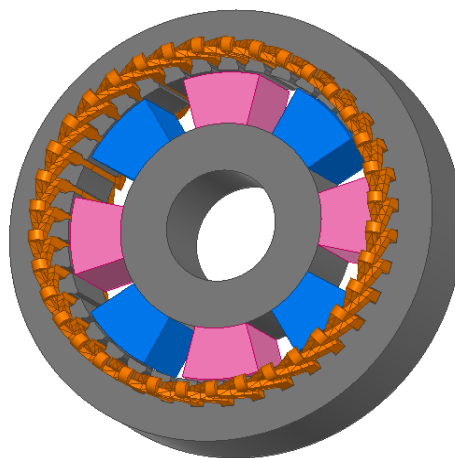


Рисунок 4.41 - Трёхмерная модель подвозбудителя генератора ГТ30НЖЧ12

В программе «Ansys Maxwell 16» произведен электромагнитный анализ построенной модели. Каждой части модели были назначены свойства соответствующих материалов, при расчётах задана частота вращения ротора 12000 об/мин. Результаты исследования при работе на холостом ходе представлены на рис. 4.42.

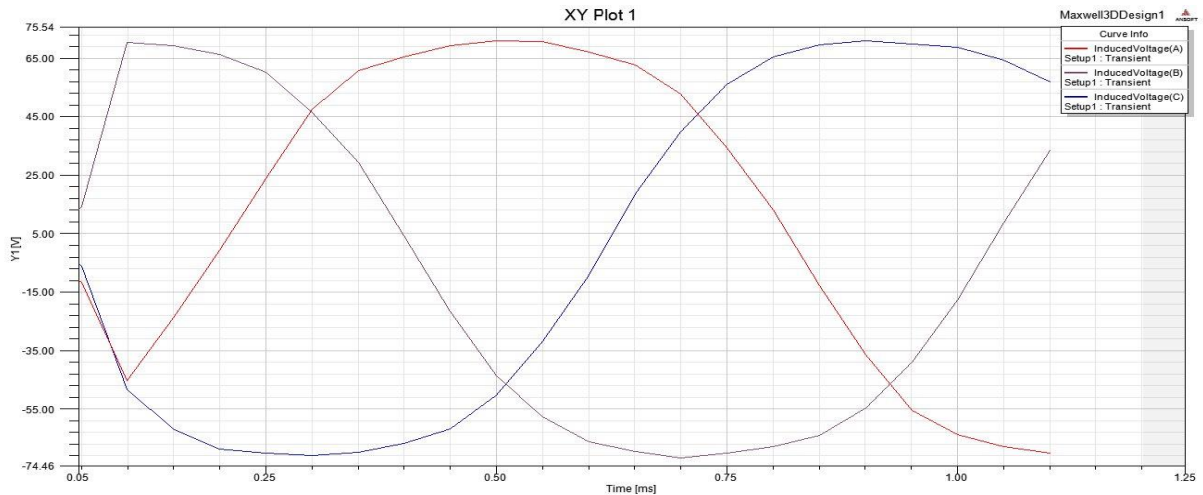


Рисунок 4.42 - Осциллограммы фазных напряжений в обмотке якоря модели подвозбудителя генератора ГТ30НЖЧ12 на холостом ходу

Результаты исследования при работе под нагрузкой представлены на рис. 4.43. Цепь нагрузки «подключалась» к обмотке якоря разработанной модели с помощью специального модуля «Maxwell Circuit», встроенного в программу «Ansys Maxwell 16».

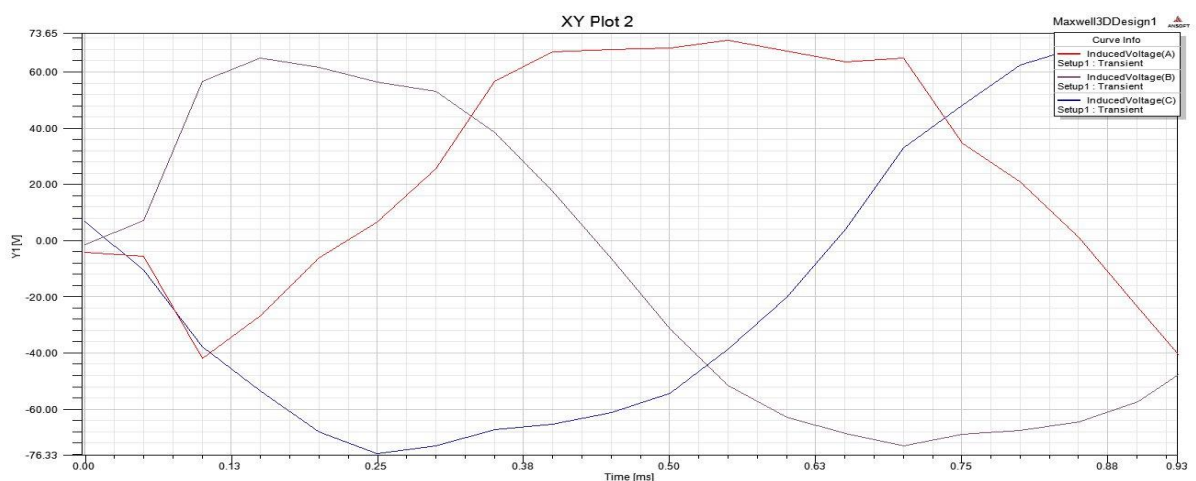


Рисунок 4.43 - Осциллограммы фазных напряжений в обмотке якоря модели подвозбудителя генератора ГТ30НЖЧ12 под нагрузкой

На рис. 4.44 представлена картина распределения магнитной индукции, кроме того, были получены средние значения магнитной индукции в воздушном зазоре, а также в магнитопроводах якоря (в спинке и в зубцах) и индуктора (в ярме и в магнитах).

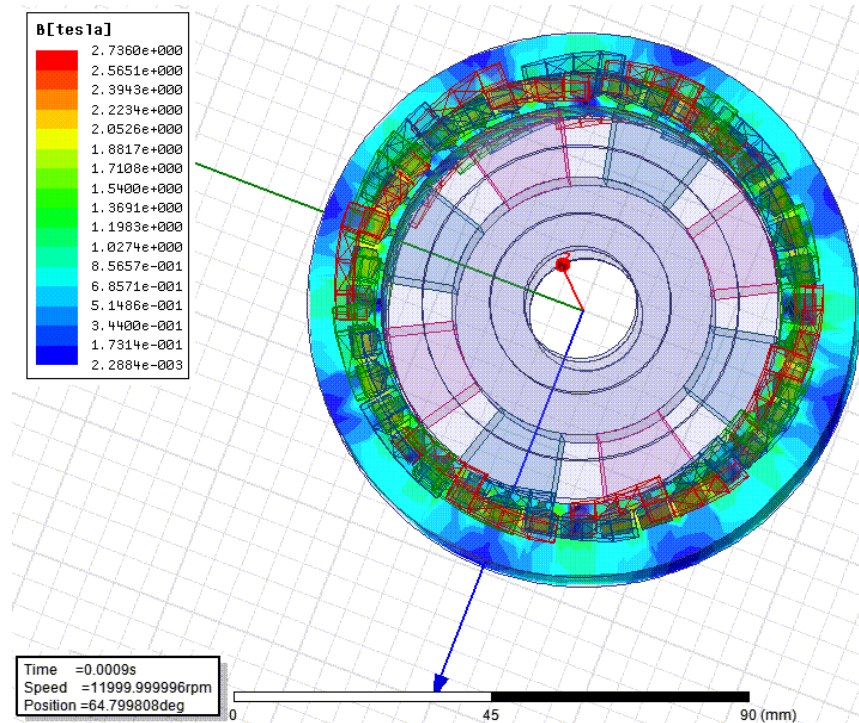


Рисунок 4.44 - Картина распределения магнитной индукции в модели подвозбудителя генератора ГТ30НЖЧ12

В результате выполнения анализа установлено, что величина фазного напряжения соответствует данным, указанным в руководстве по технической эксплуатации с погрешностью 2%, а величина магнитной индукции в воздушном зазоре и в зубцах якоря соответствуют данным, полученным на основе расчёта по разработанной методике с погрешностью 3,6%. Таким образом, разработанная методика расчёта ЭМ с ПМ в совокупности с разработанными скриптами для автоматического построения трёхмерных моделей ЭМ с ПМ в программе «Ansys Maxwell 16» позволяют получать достоверные данные о параметрах проектируемой ЭМ и получать наглядные результаты анализа проектируемой ЭМ, который выполняется с учётом особенностей её конструкции. Это позволяет оценивать характеристики ЭМ на этапе проектирования для оперативной и точной оптимизации её параметров.

4.7 Преимущества разработанного перспективного авиационного ветроэнергетического комплекса

Для доказательства того, что разработанный перспективный АВЭК обладает улучшенными массогабаритными показателями по сравнению с существующим аналогом, были разработаны модели АВЭК с генераторами радиальной, конической и аксиальной конструкции (рис. 4.45). Расчёты и моделирование производились с учётом свойств материалов, используемых при производстве машин разного конструктивного исполнения. Расчёт параметров для радиальной ЭМ производился с учётом свойств листовой стали 49К2ФА, а для аксиальной и конической – порошковой стали Somaloy-1000. Кривые размагничивания этих сталей представлены в Приложении Б. Разница в величине индукции их насыщения приводит к тому, что для одной и той же конструкции при одной и той же мощности ЭМ магнитопровод из стали Somaloy-1000 имеет больший объём и габариты, чем магнитопровод из стали 49К2ФА. Однако, плотность у Somaloy-1000 ($\rho=7300 \text{ кг/м}^3$) на 5% меньше, чем у 49К2ФА ($\rho=7650 \text{ кг/м}^3$).

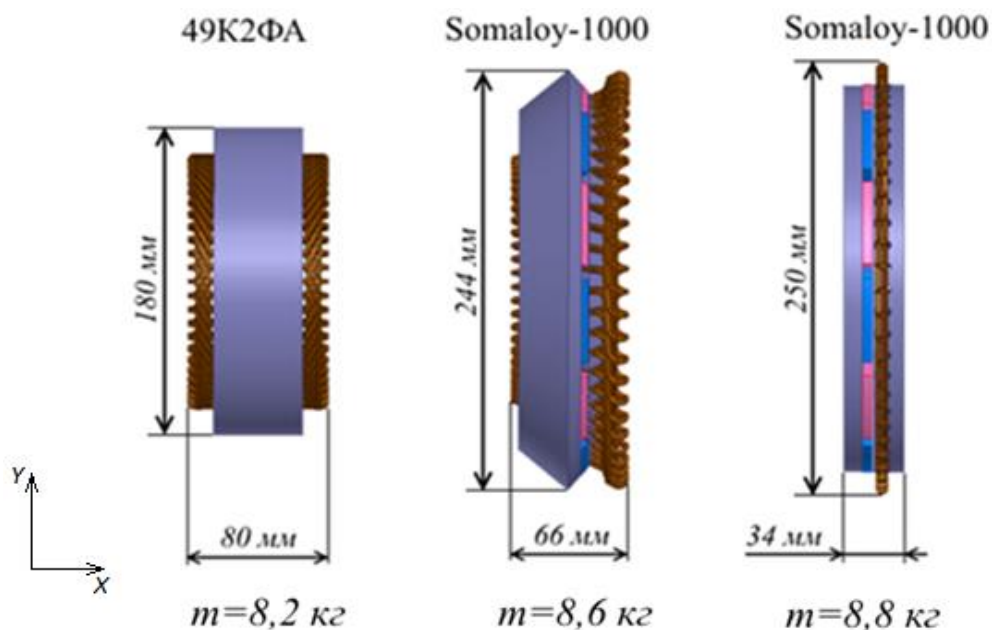


Рисунок 4.45 - Массогабаритные показатели разработанных моделей генераторов радиального, конического и аксиального исполнения

Исходя из данных, представленных на рис. 4.45 установлено, что:

1. Масса активных материалов у радиального генератора на 4,8% меньше, чем у конического и на 7,3% меньше, чем у аксиального;

2. Габаритный размер L_X у радиального генератора на 17% больше, чем у конического и на 57% больше, чем у аксиального;

3. Габаритный размер L_Y у радиального генератора на 35% меньше, чем у конического и на 39% меньше, чем у аксиального.

Конический генератор по какому-либо одному массогабаритному показателю не является лучшим, но в тоже время он и не является худшим ни по одному из них. При этом стоит учитывать, что налаживание производства конических генераторов с ПМ в настоящее время будет связано с преодолением технических и технологических трудностей.

Однако, несмотря на то, какой генератор будет выбран для АВЭК, очевиден выигрыш в массе у перспективного АВЭК по сравнению с существующим зарубежным аналогом, установленным на самолёте Sukhoi SuperJet-100. Масса всего АВЭК, в конечном счёте, будет зависеть от массы регулятора угла поворота лопастей, массы корпуса и других узлов и деталей.

Для сравнения массы генератора известного АВЭК (на Sukhoi SuperJet-100) и перспективного, необходимо учесть следующее:

1. Масса корпуса у генератора с внешним ротором будет меньше, чем у генератора с внутренним ротором;

2. Масса стали якоря у генератора с внешним ротором будет меньше, чем с внутренним ротором;

3. АВЭК установленный на самолёте Sukhoi SuperJet-100, содержит не просто генератор, а генераторную установку, состоящую из трёх ЭМ (подвозбудителя, возбудителя и генератора, как и в генераторе ГТ30НЖЧ12 на рис. 4.39).

Чтобы сравнить массу известного и разработанного ветроэнергетического комплекса, используем индекс «SSJ100» для АВЭК, установленного на самолёте Sukhoi SuperJet-100 и индекс «ПЕРСП» для перспективного АВЭК. Тогда, в соответствии с (4.29) получим:

$$M_{\text{АВЭК_SSJ100}} = M_{\text{БК_SSJ100}} + M_{\text{ГЕН_SSJ100}} + M_{\text{РЕГ_ЛОП_SSJ100}} + M_{\text{КОРП_SSJ100}} \quad (4.61)$$

Вычисляем: $M_{\text{АВЭК_SSJ100}} = 0,5 + 11,2 + 1,5 + 1,5 = 14,7$ (кг)

$$M_{\text{АВЭК_ПЕРСП}} = M_{\text{БК_ПЕРСП}} + M_{\text{ГЕН_ПЕРСП}} + M_{\text{РЕГ_ЛОП_ПЕРСП}} + M_{\text{КОРП_ПЕРСП}} \quad (4.62)$$

Принимая массу ветроколеса и регулятора угла установки лопастей в известном и перспективном АВЭК одинаковыми соответственно (для определенности), т.е. $M_{ВК_SSJ100} = M_{ВК_ПЕРСП}$, $M_{РЕГ_ЛОП_SSJ100} = M_{РЕГ_ЛОП_ПЕРСП}$, определим массу разработанных перспективных АВЭК:

1. Для АВЭК с радиальным генератором:

$$M_{АВЭК_ПЕРСП} = 0,5 + 8,2 + 1,5 + 1,5 = 11,7 \text{ (кг)}$$

2. Для АВЭК с коническим генератором:

$$M_{АВЭК_ПЕРСП} = 0,5 + 8,6 + 1,5 + 1,5 = 12,1 \text{ (кг)}$$

3. Для АВЭК с радиальным генератором:

$$M_{АВЭК_ПЕРСП} = 0,5 + 8,8 + 1,5 + 1,5 = 12,3 \text{ (кг)}$$

Из полученных данных видно, что масса у разработанных перспективных АВЭК лучше, чем у существующего АВЭК, а именно:

- у АВЭК с радиальным генератором - меньше на 3,0 кг (20,4%);
- у АВЭК с коническим генератором - меньше на 2,6 кг (17,7%);
- у АВЭК с аксиальным генератором - меньше на 2,4 кг (16,3%).

Для сравнения габаритных размеров на рис. 4.46 представлены размеры существующего АВЭК (на самолёте Sukhoi SuperJet-100) и перспективных АВЭК с радиальным, коническим и аксиальным генераторами.

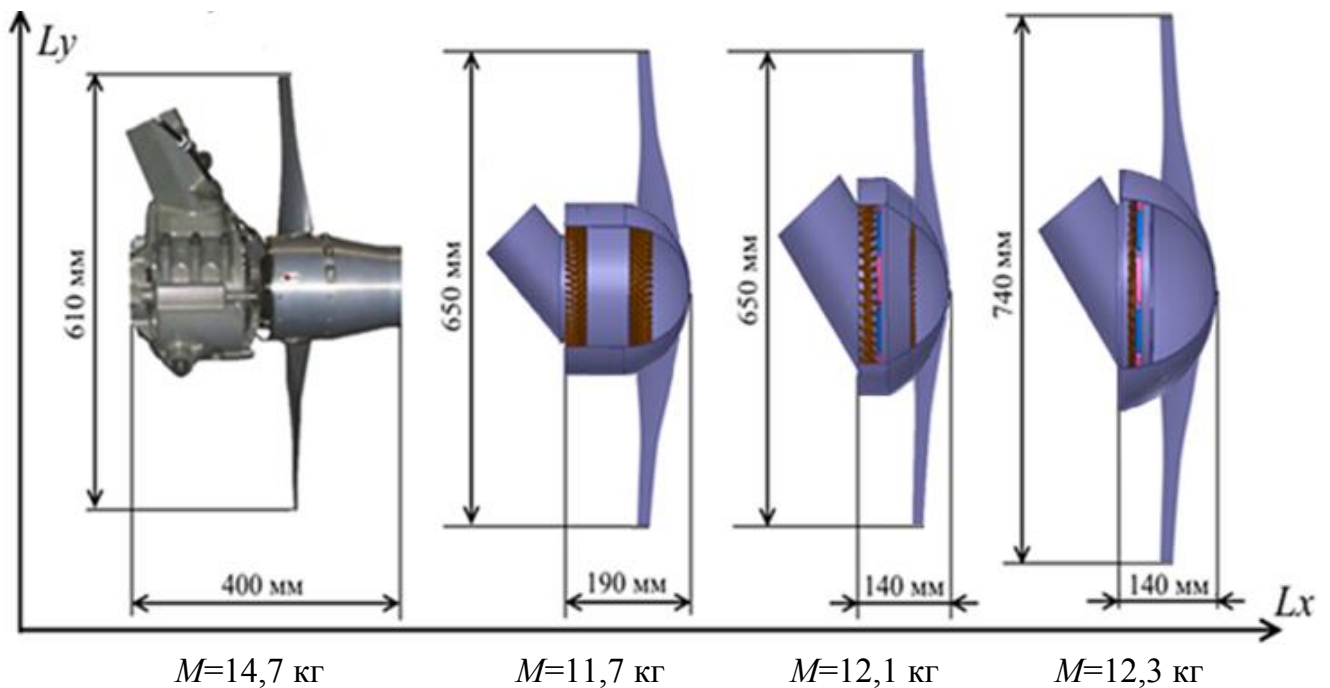


Рисунок 4.46 – Массогабаритные показатели АВЭК на самолёте Sukhoi SuperJet-100 и перспективных АВЭК с радиальным, коническим и аксиальным генераторами

Из данных, представленных на рис. 4.46 видно, что:

1. Габаритный размер L_y у разработанных перспективных АВЭК немного хуже, чем у существующего АВЭК, а именно:

- у АВЭК с радиальным генератором - больше на 40 мм (6,5%);
- у АВЭК с коническим генератором - больше на 40 мм (6,5%);
- у АВЭК с аксиальным генератором - больше на 130 мм (21,3%).

2. Габаритный размер L_x у разработанных перспективных АВЭК лучше, чем у существующего АВЭК, а именно:

- у АВЭК с радиальным генератором - меньше на 210 мм (52,5%);
- у АВЭК с коническим генератором - меньше на 260 мм (65%);
- у АВЭК с аксиальным генератором - меньше на 260 мм (65%).

Полученные результаты дают возможность оценить достоинства и недостатки каждой из представленных на рис. 4.46 моделей. Окончательный выбор конкретного конструктивного исполнения АВЭК остается за заказчиком и может быть сделан после экономического расчёта их изготовления.

Исходя из представленных данных следует, что по совокупности массогабаритных показателей каждый из разработанных АВЭК превосходит существующий аналог, поэтому можно считать, что цель данной работы достигнута.

4.8 Выводы по главе

Разработанная методика проектирования АВЭК позволила выполнить сравнительный расчёт АВЭК с генераторами различного конструктивного исполнения. Разработанная методика массогабаритной оптимизации позволила выполнить оптимизацию параметров АВЭК с генераторами с ПМ различного конструктивного исполнения по выбранному критерию. Разработанная программа расчета и массогабаритной оптимизации генератора с постоянными магнитами позволила автоматизировать процесс расчёта и оптимизации ЭМ с ПМ, а также построить трёхмерные модели генераторов различного конструктивного исполнения. На основе полученных моделей разработаны модели АВЭК, благодаря чему стало возможным наглядно сравнить их массогабаритные показатели.

Установлено, что разработанные АВЭК с генераторами различного конструктивного исполнения превосходят по совокупности массогабаритных показателей существующие аналоги.

Таким образом, в четвертой главе решены следующие задачи:

1. Разработана методика проектирования АВЭК, отличающаяся тем, что в методику проектирования генератора с постоянными магнитами АВЭК включены выведенные формулы эквивалентного преобразования ЭМ, формулы определения рекомендуемого значения конструктивного коэффициента для ЭМ с заданным углом наклона воздушного зазора к оси вращения ротора, формулы определения диаметра эталонной окружности для эквивалентной ЭМ с выбранным углом наклона воздушного зазора к оси вращения ротора, формулы определения критического угла наклона воздушного зазора к оси вращения ротора;

2. Разработана методика массогабаритной оптимизации АВЭК, отличающаяся тем, что она содержит способы улучшения каждого из массогабаритных показателей АВЭК, а также разработанную методику массогабаритной оптимизации генератора с постоянными магнитами;

3. Разработана программа расчета и оптимизации генератора с постоянными магнитами для АВЭК, отличающаяся тем, что она позволяет выполнить расчёт и массогабаритную оптимизацию параметров ЭМ с ПМ в автоматизированном режиме;

4. Разработана программа создания трёхмерной модели синхронной электрической машины с постоянными магнитами в программе «Ansys Maxwell 16», отличающаяся тем, что она позволяет создавать трёхмерные модели ЭМ с ПМ на основе расчётных данных в автоматическом режиме;

5. Построена трёхмерная компьютерная модель генератора с ПМ конической формы для АВЭК в программе «Ansys Maxwell 16», позволяющая оценить энергетические показатели проектируемого конического генератора для перспективного АВЭК;

6. Произведен электромагнитный анализ генераторов различной формы для перспективного АВЭК в программе «Ansys Maxwell 16», результаты которого показали хорошую сходимость с данными, полученными при использовании разработанной методики, подтвердив её пригодность к использованию;

7. Подтверждена достоверность результатов на основе сходимости паспортных данных с результатами расчёта по разработанной методике и результатами электромагнитного анализа трёхмерной модели подвозбудителя известного генератора ГТ30НЖЧ12 в программе «Ansys Maxwell 16»;

8. Проведен сравнительный анализ массогабаритных показателей существующего современного и разработанного перспективного АВЭК, в результате которого установлено, что перспективные АВЭК с радиальным, коническим и аксиальным генератором обладает улучшенными массогабаритными показателями по сравнению с существующим аналогом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе на основе теоретических и экспериментальных исследований решена актуальная научно-техническая задача по разработке авиационного ветроэнергетического комплекса с улучшенными массогабаритными показателями для аварийной системы электроснабжения воздушного судна.

Анализ существующих образцов АВЭК показал, что они обладают недостатками, препятствующими повышению их массогабаритных показателей. Кроме того, в результате анализа работы АВЭК в составе аварийной СЭС самолёта Sukhoi SuperJet-100 выявлен недостаток, связанный с ограничением условий пилотирования ВС, негативно влияющий на безопасность полёта в чрезвычайной ситуации. Исходя из анализа конструкции существующего АВЭК и структурной схемы СЭС в аварийном режиме её работы, предложены новые взаимосвязанные технические решения, а именно – новая конструкция АВЭК и новая схема аварийной СЭС, позволяющие устранить выявленные недостатки. Предложенная схема аварийной СЭС удовлетворяет всем требованиям ГОСТ Р 54073-2010 и может быть реализована с использованием отечественных агрегатов, поэтому целесообразно использовать её при импортозамещении СЭС самолёта Sukhoi SuperJet-100 согласно приказа Министерства промышленности и торговли РФ №663 от 31 марта 2015 года «Об утверждении плана мероприятий по импортозамещению в отрасли гражданского авиастроения Российской Федерации».

Предложенная и теоретически обоснованная конструкция перспективного АВЭК, которая удовлетворяет всем предъявленным требованиям, может быть взята за основу для создания ветроэнергетических комплексов не только для ВС, но и для других подвижных и стационарных автономных объектов. Это позволит решить (полностью или частично) проблему их электроснабжения и расширить область применения ветроэнергетических комплексов.

Исследование массогабаритных и энергетических показателей конечных ЭМ с ПМ послужило поводом к исследованию и описанию эквивалентных ЭМ. Это понятие, применимое не только к ЭМ с ПМ, но и к машинам других типов – синхронным ЭМ с обмоткой возбуждения, асинхронным, индукторным и др., позволяет пересмотреть подход к выбору их конструктивного исполнения при проектировании и изготовлении с учётом существующих современных технологий их производства и внести существенный вклад в развитие теории ЭМ в целом.

Разработанная программа расчёта и массогабаритной оптимизации генератора с постоянными магнитами при совместном использовании со средствами программы «Ansys Maxwell 16» позволяют внести вклад в развитие средств автоматизированного проектирования ЭМ с ПМ. Разработанная программа автоматического построения трёхмерных моделей ЭМ с ПМ в программе «Ansys Maxwell 16» позволяет существенным образом упростить и автоматизировать процесс компьютерного проектирования АВЭК и других энергетических комплексов, содержащих генераторы с ПМ.

На основании выполненных теоретических исследований и проведённых исследований получены следующие основные результаты и выводы:

1. Разработана конструкция перспективного АВЭК, работающего в составе аварийной СЭС ВС, отличающаяся от известных конструкций тем, что магнитная система электрогенератора имеет коническую форму, и позволяющая добиться улучшения массогабаритных показателей всего АВЭК;

3. Разработана методика проектирования АВЭК, отличающаяся тем, что в методику проектирования генератора с постоянными магнитами АВЭК включены выведенные формулы эквивалентного преобразования ЭМ, формулы определения рекомендуемого значения конструктивного коэффициента для ЭМ с заданным углом наклона воздушного зазора к оси вращения ротора, формулы определения диаметра эталонной окружности для эквивалентной ЭМ с выбранным углом наклона воздушного зазора к оси вращения ротора, формулы определения критического угла наклона воздушного зазора к оси вращения ротора;

4. Разработана методика массогабаритной оптимизации АВЭК, отличающаяся тем, что она содержит способы улучшения каждого из массогабаритных показателей АВЭК, а также разработанную методику массогабаритной оптимизации генератора с постоянными магнитами;

5. Разработана программа расчета и оптимизации генератора с постоянными магнитами для АВЭК, отличающаяся тем, что она позволяет выполнить расчёт и массогабаритную оптимизацию параметров ЭМ с ПМ в автоматизированном режиме;

6. Разработана программа создания трёхмерной модели синхронной электрической машины с постоянными магнитами в программе «Ansys Maxwell 16», отличающаяся тем, что она позволяет создавать трёхмерные модели ЭМ с ПМ на основе расчётных данных в автоматическом режиме.

ЭМ с ПМ конической формы не получили распространения по причине отсутствия методик их проектирования и технологии изготовления. Результаты, полученные в данной диссертационной работе, вносят существенный вклад в их развитие.

С экономической точки зрения на сегодняшний день наименее затратным является производство радиальных и аксиальных ЭМ с ПМ. Однако, конические ЭМ имеют уникальные особенности (форма магнитной системы, улучшенные условия теплоотвода, возможность регулирования величины воздушного зазора и др.), которые могут стать причиной для их внедрения в технику и запуска серийного производства. Развитие АВЭК с использованием конических ЭМ имеет перспективы, однако, в настоящее время оно затруднено отсутствием практического опыта производства таких ЭМ. Современные технологии позволяют преодолеть трудности, связанные с проектированием и производством электротехнических и электромеханических устройств со сложной геометрией магнитной системы. А вновь возникающие проблемы в процессе развития авиационной и космической техники часто требуют поиска новых путей их решения, поэтому широкое применение конических ЭМ вполне может стать востребованным, оправданным и актуальным. Однако, для того, чтобы это стало возможным в ближайшем будущем, работы в данном направлении необходимо проводить уже сейчас.

В силу повышения степени электрификации воздушных судов, а также наличия тенденции к увеличению вместимости (грузоподъёмности) ВС вопросы повышения надёжности работы системы электроснабжения и безопасности полётов приобретают наибольшую значимость. Авиационные ветроэнергетические комплексы являются простым и эффективным решением этих проблем для ВС как гражданского, так и военного назначения. Их распространение является актуальным и востребованным на сегодняшний день, поэтому работы по разработке и созданию современных отечественных образцов авиационных ветроэнергетических комплексов необходимо поддерживать как на уровне государственных программ, так и частных инициатив.

Список литературы

1. Абрамов, А. И. Расчет и конструкция гидрогенераторов: учебное пособие / А.И. Абрамов, А.В. Иванов-Смоленский. - М.: Высшая школа. - 1964. - 259 с.
2. Аварийная авиационная турбина [Электронный ресурс]: Официальный сайт. Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Аварийная_авиационная_турбина (дата обращения: 02.03.2016 г.)
3. Алексеев, В. В. Электрические машины. Моделирование электрических машин приводов горного оборудования: учебное пособие. - СПб. - 2006. - 58 с.
4. Антонов, М. В. Технология производства электрических машин: учебное пособие для вузов / М.В. Антонов, Л.С. Герасимова. - М.: Энергоатомиздат, 1982. - 512 с.
5. Балагуров, В.А. Проектирование специальных электрических машин переменного тока: учебное пособие. - Москва: Высшая школа. - 1982 г. - 272 с.
6. Балагуров, В.А. Электрические генераторы с постоянными магнитами / В.А. Балагуров, Ф.Ф. Галтеев. - М.: Энергоатомиздат. - 1988. - 280 с.
7. Балагуров, В.А. Бесконтактные двигатели постоянного тока с постоянными магнитами / В.А. Балагуров, В.М. Гридин, В.К. Лозенко. - М.: Энергия. - 1975. - 127 с.
8. Барвинский, А. П. Электрооборудование самолетов: учебник / А.П. Барвинский, Ф.Г. Козлова. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Транспорт. - 1990. - 320 с.
9. Беляев, Е. Ф. Расчет и проектирование электрических машин постоянного тока малой мощности. - Пермь: ПГТУ. - 2001. - 72 с.
10. Бертинов, А.И. Специальные электрические машины - источники и преобразователи энергии: учебное пособие в 2 кн. Кн.1 / А.И. Бертинов, Д.А. Бут, С.Р. Мизюрин. - М.: Энергоатомиздат. - 1993. - 319 с.
11. Брускин, Д. Э. Электрические машины и микромашинны: учеб. для электротехн. спец. вузов / Д. Э. Брускин, А. Е. Зорохович, В. С. Хвостов. - 3-е изд., перераб. и доп. - М.: Высш. шк. - 1990. - 528 с.
12. Брускин, Д. Э. Электрические машины. Часть 1: учебник / Д.Э. Брускин, А.Е. Зорохович, В.С. Хвостов. - 2-е изд. - М.: Высшая школа. - 1987. - 319 с.
13. Брускин, Д. Э. Электрические машины. Часть 2: учебник / Д.Э. Брускин, А.Е. Зорохович, В.С. Хвостов. - 2-е изд. - М.: Высшая школа. - 1987. - 335 с.
14. Брускин, Д.Э. Основы электрооборудования летательных аппаратов: учебник для вузов, в 2-х частях. Часть 1 / Д.Э. Брускин, Н.Т. Коробан, В.Т. Морозовский. - М.: Высшая школа. - 1978. - 303 с.

15. Брускин, Д.Э. Основы электрооборудования летательных аппаратов: учебник для вузов, в 2-х частях. Часть 2 / Д.Э. Брускин, Н.Т. Коробан, В.Т. Морозовский. - М.: Высшая школа. - 1978. - 280 с.
16. Бут, Д.А. Бесконтактные ЭМ. - 2-е издание. - М: Высшая школа. - 1990. - 413 с.
17. Бут, Д.А. Электрические генераторы для летательных аппаратов: конспект лекций / Д.А. Бут, А.И. Бертинов. - М.: МАИ. - 1976. - 62 с.
18. Ващенко, А.П. Характеристики и математическая модель вентильного электродвигателя: инструктивные указания по проектированию электротехнических промышленных установок / А.П. Ващенко, В.А. Шиленков. – 1986. - №5. - с.812.
19. Видеман, Е. Конструкции электрических машин / Е. Видеман, В. Келленбергер. - М: Энергия. - 1972. - 520 с.
20. Виноградов Н.В. Обмотчик электрических машин: учебник. - 7 изд-е, перераб. и доп. – М.: Высш. Школа. - 1969. – 224 с.
21. Волченсков, В.И. Об особенностях моделирования магнитной цепи синхронного генератора с постоянными магнитами / В.И. Волченсков, В.А. Соболев // журнал Инженерный вестник МГТУ им. Баумана. - М: МГТУ им. Баумана. – 2013. - №9. С. 635 - 644.
22. Вольдек, А. И. Электрические машины. - 3-е издание. – Ленинград: издательство «Энергия». - 1978. - 832 с.
23. Вольдек, А.И. Электрические машины. Введение в электромеханику. Машины постоянного тока и трансформаторы: учебник для ВУЗов / А.И. Вольдек, В.В. Попов. - Санкт-Петербург: Питер. - 2008. - 320 с.
24. Гайтов, Б.Х. Аксиальный управляемый бесконтактный двигатель-генератор / Б.Х. Гайтов, Я.М. Кашин, А.Я. Кашин, А.С. Князев // Пат. 2601952 Российская Федерация, МПК H02K 29/06, H02K 19/38, H02K 21/00; Заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «КубГТУ» - №2015116432/07; заявл. 29.04.2015; опубл. 10.11.2016 Бюл. № 31.
25. Гайтов, Б.Х. Разработка математической модели электромагнитных и электромеханических переходных процессов в аксиальных многофазных генераторных установках / Б.Х. Гайтов, Я.М. Кашин, Л.Е. Копелевич, А.Я. Кашин, А.А. Голованов, М.Л. Копелевич // научный журнал КубГАУ. - 2012. - №76(02). - С. 2-11.
26. Гайтов, Б.Х. О целесообразности использования двухмерных электрических машин в системах автономного электроснабжения [Текст] / Б.Х. Гайтов, Я.М. Кашин, Л.Е. Копелевич, А.С. Князев, А.Я. Кашин // Технические и технологические системы: материалы VII международной научной конференции, г. Краснодар, 07-09 октября 2015 г. / филиал ВУНЦ ВВС «ВВА». – Краснодар. – 2015. – С. 8 11.

27. Гайтов, Б.Х. Аксиальный бесконтактный двигатель-генератор / Б.Х. Гайтов, Я.М. Кашин, А.Я. Кашин, А.С. Князев, С.А. Пудов // Пат. 2529210 Российская Федерация: МПК H02K 19/38, H02K 21/00, H02K 29/06; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «КубГТУ» - №2013144515/07; заявл. 03.10.2013; опубл. 27.09.2014. Бюл. № 27.

28. Гайтов, Б.Х. Аксиально-радиальный бесконтактный генератор переменного тока / Б.Х. Гайтов, Я.М. Кашин, А.Я. Кашин, А.С. Князев // Пат. 2626814 Российская Федерация, МПК H02K 19/10, H02K 21/12, H02K 16/04, H02K 47/00; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «КубГТУ» - № 2016111052; заявл. 24.03.2016; опубл. 02.08.2017 Бюл. № 22.

29. Гайтов, Б.Х. Способ изготовления магнитопроводов аксиальных электрических машин / Б.Х. Гайтов, Я.М. Кашин, И.Н. Автайкин, Т.Б. Гайтова, А.Я. Кашин, Д.В. Пауков // Пат. №2475924 Российская Федерация: МПК H02K 15/02, H01F 41/02; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «КубГТУ» - № 2011134971/07; заявл. 19.08.2011; опубл. : 20.02.2013. Бюл. № 5.

30. Гайтова, Т.Б. Нетрадиционные электротехнические комплексы. Монография / Т.Б. Гайтова, Я.М. Кашин - Краснодар: КВАИ. - 2004. - 403 с.

31. Гайтова, Т.Б. Математическое моделирование перспективных генераторных установок для систем автономного электроснабжения [Текст] / Т.Б. Гайтова, Я.М. Кашин, Л.Е. Копелевич, А.Я. Кашин, А.С. Князев // Известия вузов. Электромеханика. – 2013. - №3 - С. 16-23.

32. Ганджа, С.А. Анализ электромагнитной мощности для различных конструктивных исполнений вентильных машин с аксиальным потоком // журнал Вестник ЮУрГУ. - Челябинск: издво ЮУрГУ. - 2010. - № 32. - С. 64-69.

33. Ганджа, С.А. Вентильные электрические машины с аксиальным магнитным потоком. Анализ синтез внедрение в производство: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук: 05.09.01 / Ганджа Сергей Александрович. Челябинск, 2011. – 271 с.

34. Ганджа, С.А. Оптимальное проектирование электроприводов на базе вентильных электрических машин с аксиальным зазором // журнал Вестник ЮУрГУ. - Челябинск: изд-во ЮУрГУ. - 2009. - № 34. - С. 68-72.

35. Ганджа, С.А. Методика инженерного расчёта вентильных электрических машин с аксиальным воздушным потоком / С.А. Ганджа, А.С. Мартьянов // журнал Вестник ЮУрГУ. Серия: Энергетика. - Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ. - 2013. – Выпуск № 2, том 13. - С. 85-87.

36. Ганджа, С.А. Определение оптимальных габаритных размеров для вентильных машин с аксиальным магнитным потоком (ВМАП) / С.А. Ганджа, А.С. Мартьянов // журнал Вестник ЮУрГУ. Серия: Энергетика. - Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ. – 2013. - Выпуск № 2, том 13. - С. 88-90.
37. Глебов, И.А. Научные основы проектирования систем возбуждения мощных синхронных машин. - Л.: Наука. - 1988. - 330 с.
38. Глебов, И.А. Системы возбуждения мощных синхронных машин. - Л.: Наука, 1979. - 315 с.
39. Глебов, И.А. Электромагнитные процессы систем возбуждения синхронных машин: монография. Ленинград: Наука. - 1987. - 344 с.
40. Глебов, И.А. Научные основы проектирования турбогенераторов / И.А. Глебов, Я.Б. Данилевич - Л.: Наука. - 1986. - 183 с.
41. Гольдберг, О.Д. Проектирование ЭМ / О.Д. Гольдберг, И.С. Свириденко. - изд. 3-е, перераб. - М.: Высш. шк. - 2006. - 431 с.
42. Грузков, С.А. Электрооборудование летательных аппаратов: учебник для вузов, в 2х т. - М.: МЭИ. - 2005. - 568 с.
43. Грузов, Л.Н. Методы математического исследования электрических машин. - М.: Госэнергоиздат. - 1953. - 264 с.
44. Данилевич, Я.Б. Численные методы анализа электрических машин. - Л.: Энергоатомиздат. - 1988. - 220 с.
45. Данилевич, Я.Б. Новые конструкции генераторов и проблемы их создания / Я.Б. Данилевич, Л.И. Чубраева. - СПб: Наука. - 1993. - 223 с.
46. Дмитриев, Ф.Б. К вопросу построения универсальной математической модели обобщенной электрической машины в программной среде MatLab Simulink / Ф.Б. Дмитриев, А.И. Черевко, Д.А. Гаврилов. – Электротехника. - 2005. - №7. - с. 38.
47. Дьяков, В.И. Типовые расчеты по электрооборудованию: практ. пособие. – 7 е изд., перераб. - М.: Высш. шк.. - 1991. - 160 с.
48. Журавлев, С.В. Аналитический расчет магнитного поля в активной зоне синхронных машин с постоянными магнитами / С.В. Журавлев, Б.С. Зечихин, Р.В. Кузьмичев // Вестник Московского авиационного института. - 2016. - Т. 23. № 1. - С. 197-209.
49. Зарицкая, Е.И. Оптимизационный расчет тихоходного синхронного генератора на постоянных магнитах для безредукторных электрогенерирующих установок / Е.И. Зарицкая, Л.Н. Канов, А.М. Олейников // журнал Проблемы техники. - Севастополь: СевНТУ. - 2008. - С. 104-107.

50. Зечихин, Б.С. Автоматизированный расчёт авиационного синхронного генератора: методические разработки по курсовому и дипломному проектированию / Б.С. Зечихин, М.С. Радько, Н.П. Старовойтова, О.Ю. Цыбакова - М.: МАИ. - 1989. - 64 с.
51. Зечихин, Б.С. Расчетные коэффициенты синхронных машин с редкоземельными магнитами / Б.С. Зечихин, С.В. Журавлев, Д.А. Ситин - Электричество. - 2009. № 3. - С. 35-40.
52. Зимин, В.И. Обмотки электрических машин / В.И. Зимин, М.Я. Каплан, А.М. Палей, И.Н. Рабинович, В.П. Федоров, П.А. Хаккен. - Л.: Энергия. - 1970. - 472 с.
53. Иванов-Смоленский, А.В. Универсальный метод расчёта электромагнитных процессов в электрических машинах. - М.: Энергоатомиздат. - 1986. - 216 с.
54. Иванов-Смоленский, А.В. Электрические машины: учебник для вузов. – В 2т. Т.1. - М.: изд-во МЭИ. - 2004. - 652 с.
55. Иванов-Смоленский, А.В. Электрические машины: учебник для вузов. – В 2т. Т.2. - М.: изд-во МЭИ. - 2004. - 532 с.
56. Иванов-Смоленский, А.В. Электромагнитные поля и процессы в электрических машинах и их физическое моделирование. - М.: Энергия. - 1969. - 304 с.
57. Игнатов, В.А. Торцевые электродвигатели интегрального изготовления / В.А. Игнатов, К.Я. Вильданов. - М.: Энергоатомиздат. - 1988. - 304 с.
58. Исмагилов, Ф.Р. Введение в конструирование электромеханических преобразователей энергии / Ф.Р. Исмагилов, Ю.В. Афанасьев, А.В. Стыскин. - М.: Изд во МАИ. - 2006. - 132 с.
59. Исмагилов, Ф.Р. Основы проектирования высокооборотных электромеханических преобразователей энергии с высококоэрцитивными постоянными магнитами: монография / Ф.Р. Исмагилов, И.Х. Хайруллин, В.Е. Вавилов. - М.: Инновационное машиностроение. - 2016. - 223 с.
60. Каган, А.В. Конструкция электрических машин: учебно-методический комплекс. - СПб.: Изд-во СЗТУ. - 2008. - 137 с.
61. Кацман, М.М. Расчёт и конструирование электрических машин: учебн. пособие для техникумов. - М.: Энергоатомиздат. - 1984. - 360 с.
62. Кашин, Я.М. Определение основных размеров аксиальных электрических машин [Текст] / Я.М. Кашин, А.Я. Кашин, А.С. Князев, Б.Н. Абзалов // Наука. Техника. Технологии. - 2016. – №1. – С. 111-122.
63. Кашин, Я.М. Анализ основных характеристик возобновляемых источников энергии [Текст] / Я.М. Кашин, А.Я. Кашин, А.С. Князев // Инновационные технологии в

образовательном процессе: материалы XIV Южно-Российской научно-практической конференции, г. Краснодар, 01-03 января 2012 г. / филиал ВУНЦ ВВС «ВВА». – Краснодар. – С. 133-137.

64. Кашин, Я.М. Перспективы использования возобновляемых источников энергии в России [Текст] / Я.М. Кашин, А.Я. Кашин, А.С. Князев // Технические и технологические системы: материалы IV международной научной конференции, г. Краснодар, 10-12 октября 2012 г. / филиал ВУНЦ ВВС «ВВА». - Краснодар. - С.40-45.

65. Кашин, Я.М. Стабилизированный аксиальный генератор переменного тока для автономной системы электроснабжения воздушных судов [Текст] / Я.М. Кашин, А.Я. Кашин, А.С. Князев // Актуальные вопросы исследований в авионике - теория, обслуживание, разработки «АВИАТОР»: сборник научных статей по материалам II Всероссийской научно-практической конференции, ВУНЦ ВВС «ВВА», г. Воронеж, 11-13 февраля 2015 г. – Том 1. – Воронеж. – С. 55-60.

66. Кашин, Я.М. Исследование зависимости мощности синхронных электрических машин от главных размеров и частоты вращения ротора [Текст] / Я.М. Кашин, А.Я. Кашин, А.С. Князев // Вестник Адыгейского государственного университета. Серия 4: Естественно-математические науки. – 2016. - Выпуск 3 (186). – С. 99-108.

67. Кашин, Я.М. Радиально-аксиальная двухходовая бесконтактная электрическая машина-генератор / Я.М. Кашин, А.Я. Кашин, А.С. Князев // Пат. 2585222 Российская Федерация: МПК H02K 19/38, H02K 19/00, H02K 21/12; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «КубГТУ» - №2015103506/07; заявл. 03.02.2015; опубл. 27.05.2016. Бюл. № 15.

68. Кашин, Я.М. Сквозное проектирование синхронных электрических машин с постоянными магнитами [Текст] / Я.М. Кашин, А.Я. Кашин, А.С. Князев // Вестник Адыгейского государственного университета, серия 4: Естественно-математические науки. – 2016. - Выпуск 3 (186). – С. 114-121.

69. Кашин, Я.М. Трёхходовая аксиальная генераторная установка / Я.М. Кашин, А.Я. Кашин, А.С. Князев // Пат. 2589730 Российская Федерация: МПК H02K 16/02, H02K 19/38, H02K 47/06, H02K 3/22; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «КубГТУ» - № 2015131666/07; заявл. 29.07.2015; опубл. 10.07.2016. Бюл. № 19.

70. Кашин, Я.М. Вентильный ветрогенератор постоянного тока / Я.М. Кашин, А.Я. Кашин, А.С. Князев // Пат. 2633356 Российская Федерация: МПК H02K 7/18, F03D 9/00; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «КубГТУ» - № 2016141374; заявл. 20.10.2016; опубл. 12.10.2017. Бюл. № 29.

71. Кашин, Я.М. Стабилизированная трёхходовая аксиальная генераторная установка / Я.М. Кашин, А.Я. Кашин, А.С. Князев // Пат. 2633359 Российская Федерация: МПК H02J 1/10; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «КубГТУ» - № 2016144946; заявл. 11.01.2017; опубл. 12.10.2017. Бюл. № 29.

72. Кашин, Я.М. Бесконтактный многофазный генератор переменного тока / Я.М. Кашин, А.Я. Кашин, А.С. Князев, А.В. Войнов // Пат. 2633374 Российская Федерация: МПК H02K 47/26, H02K 19/38; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «КубГТУ» - № 2016144946; заявл. 15.11.2016; опублик. 12.10.2017. Бюл. № 29.

73. Кашин, Я.М. Эквивалентные ЭМ. Исследование эквивалентных радиальных и аксиальных синхронных генераторов с постоянными магнитами [Текст] / Я.М. Кашин, А.Я. Кашин, А.С. Князев // Вести высших учебных заведений Черноземья. - 2016. - №1. - С. 3-12.

74. Кашин, Я.М. Программа расчета математической модели стабилизированного аксиального генератора постоянного тока с регулятором напряжения на магнитных усилителях / Я.М. Кашин, А.С. Князев, А.Я. Кашин, В.В. Салий, В.С. Сидоренко // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №2015610468 Российская Федерация. - Заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО «КубГТУ» - №2014661170; заявл. 05.11.2014; зарегистр. 12.01.2015.

75. Кашин, Я.М. Способы сложения энергии в двухвходовых электрических машинах [Текст] / Я.М. Кашин, А.Я. Кашин, А.С. Князев, А.В. Самородов, Р.С. Кравец // Технические и технологические системы: материалы VII международной научной конференции, г. Краснодар, 07-09 октября 2015 г. / КВВАУЛ им. А.К. Серова. - Краснодар. - С.5-8.

76. Кашин, Я.М. Массогабаритная оптимизация эквивалентных синхронных электрических машин [Текст] / Я.М. Кашин, А.Я. Кашин, А.С. Князев, Л.Е. Копелевич, А.В. Самородов // Вестник Адыгейского государственного университета, серия 4: Естественно-математические науки. – 2017. - Выпуск 1 (196). – С. 128-142.

77. Кашин, Я.М. Методика расчета синхронных электрических машин с возбуждением от постоянных магнитов для ветросолнечных генераторных установок [Текст] / Я.М. Кашин, А.Я. Кашин, А.С. Князев, Л.Е. Копелевич, А.В. Самородов // Вестник Адыгейского государственного университета, серия 4: Естественно-математические науки. – 2017. - Выпуск 1 (196). – С. 94-105.

78. Кашин, Я.М. Современное состояние аварийных авиационных турбин и их классификация [Текст] / Я.М. Кашин, А.Я. Кашин, А.С. Князев // Вестник Адыгейского государственного университета, серия 4: Естественно-математические науки. – 2017. - Выпуск 1 (196). – С. 111-121.

79. Кашин, Я.М. Универсальные главные размеры электрических машин [Текст] / Я.М. Кашин, А.Я. Кашин, А.С. Князев // Актуальные вопросы исследований в авионике - теория, обслуживание, разработки «АВИАТОР»: сборник научных статей по материалам IV Всероссийской научно-практической конференции, ВУНЦ ВВС «ВВА», г. Воронеж, 16-17 февраля 2017 г. – Воронеж. – С. 34-41.

80. Кашин, Я.М. Современное состояние аварийных авиационных электрогенераторов [Текст] / Я.М. Кашин, А.Я. Кашин, А.С. Князев, В.А. Бац // Актуальные вопросы исследований в авионике - теория, обслуживание, разработки «АВИАТОР»: сборник научных статей по материалам IV Всероссийской научно-практической конференции, ВУНЦ ВВС «ВВА», г. Воронеж, 16-17 февраля 2017 г. – Воронеж. – С. 41-50.

81. Кашин, Я.М. Результаты исследования эквивалентных радиальных и аксиальных синхронных генераторов с обмоткой возбуждения [Текст] / Я.М. Кашин, А.Я. Кашин, А.С. Князев, М.С. Христофоров // Энергосбережение и водоподготовка. – 2017. - Выпуск 5 (109). – С. 47-51.

82. Кашин, Я.М. Программа расчета автоматизированного проектирования синхронных генераторов с обмоткой возбуждения / Я.М. Кашин, А.С. Князев, А.Я. Кашин, Г.А. Кириллов // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №2017611945 Российская Федерация. - Заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО «КубГТУ» - №2016614182; заявл. 26.04.2016; зарегистр. 13.02.2017.

83. Кашин, Я.М. Программа расчета синхронной электрической машины с постоянными магнитами / Я.М. Кашин, А.С. Князев, А.Я. Кашин, А. Караджаев // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №2017618762 Российская Федерация. - Заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО «КубГТУ» - №2017616232; заявл. 27.06.2017; зарегистр. 08.08.2017.

84. Кашин, Я.М. Программа расчёта размеров магнитной системы эквивалентных электрических машин / Я.М. Кашин, А.С. Князев, А.Я. Кашин, В.А. Ким // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2017619234 Российская Федерация. - Заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО «КубГТУ» - № 2017616217; заявл. 27.06.2017; зарегистр. 17.08.2017.

85. Кашин, Я.М. Программа создания трёхмерной модели синхронной электрической машины с постоянными магнитами в «Ansys Maxwell 16» / Я.М. Кашин, А.С. Князев, А.Я. Кашин, В.А. Ким // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2017619235 Российская Федерация. - Заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО «КубГТУ» - № 2017616222; заявл. 27.06.2017; зарегистр. 17.08.2017.

86. Кислицын, А.Л. Синхронные машины: учебное пособие. - Ульяновск: УлГТУ. - 2000. - 108 с.

87. Китаев, В. Е. Электрические машины. Часть 1: учебное пособие для техникумов / В. Е. Китаев, Ю. М. Корхов, В. К. Свирин. – М.: Высш. Школа. - 1978. - 184 с.

88. Китаев, В. Е. Электрические машины. Часть 2: учебное пособие для техникумов / В. Е. Китаев, Ю. М. Корхов, В. К. Свирин. – М.: Высш. Школа. - 1978. - 184 с.

89. Князев, А.С. Эквивалентное преобразование электрических машин с коническим ротором [Текст] // Технические и технологические системы: материалы VII международной научной конференции, г. Краснодар, 07-09 октября 2015 г. / филиал ВУНЦ ВВС «ВВА». - Краснодар. - С. 127-132.

90. Князев, А.С. Метод замещения для расчета ЭДС в аксиальных электрических машинах при неравномерном распределении магнитной индукции в радиальном направлении [Текст] / А.С. Князев, А.Я. Кашин // Технические и технологические системы: материалы VI международной научной конференции, г. Краснодар, 10-12 октября 2014 г. / филиал ВУНЦ ВВС «ВВА». - Краснодар. - С. 129-132.

91. Князев, А.С. Общая характеристика возобновляемых источников энергии [Текст] / А.С. Князев, А.Я. Кашин // Инновационные технологии в образовательном процессе: материалы XIV Южно-Российской научно-практической конференции, г. Краснодар, 18 октября 2012 г. / филиал ВУНЦ ВВС «ВВА». – Краснодар. - С.131-133.

92. Князев, А.С. Программа и методика экспериментальных исследований аксиального бесконтактного генератора постоянного тока [Текст] / А.С. Князев, А.Я. Кашин, Д.В. Пауков // Технические и технологические системы: материалы VI международной научной конференции, г. Краснодар, 08-10 октября 2014 г. / филиал ВУНЦ ВВС «ВВА». - Краснодар. - С. 156-163.

93. Князев, А.С. Радиальные и аксиальные электрические машины как частный случай электрических машин с коническим ротором. Основные определения [Текст] / А.С. Князев, А.Я. Кашин // Технические и технологические системы: материалы VII международной научной конференции, г. Краснодар, 07-09 октября 2015 г. / филиал ВУНЦ ВВС «ВВА». - Краснодар. - С. 121-127.

94. Князев, А.С. Исследование математической модели стабилизированного аксиального генератора постоянного тока [Текст] / А.С. Князев, А.Я. Кашин, Е.В. Сидорова // Технические и технологические системы: материалы VI международной научной конференции, г. Краснодар, 08-10 октября 2014 г. / филиал ВУНЦ ВВС «ВВА». - Краснодар. – С. 132-144.

95. Коптев, А. Н. Авиационное и радиоэлектронное оборудование воздушных судов гражданской авиации [Электронный ресурс]: электрон. учеб. пособие / А.Н. Коптев // Минобрнауки России, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева (нац. исслед. ун-т). - Электрон. текстовые и граф. дан. (164 Мбайт). - Самара, 2011. - 1 эл. опт. диск (CD-ROM)

96. Копылов, И.П. Справочник по электрическим машинам. Том 1 / И.П. Копылов, Б.К. Клоков. - М.: Энергоатомиздат. - 1988. - 456 с.

97. Копылов, И.П. Справочник по электрическим машинам. Том 2 / И.П. Копылов, Б.К. Клоков. - М.: Энергоатомиздат. -1989. - 688 с.

98. Копылов, И.П. Математическое моделирование электрических машин: учебник для вузов. - 3е изд. - М.: Высш. шк. - 2001. - 327 с.
99. Копылов, И.П. Электрические машины: учебник для вузов. - М.: Высшая школа. - 2000. - 607 с.
100. Копылов, И.П. Электромеханические преобразователи энергии. - М.: Энергия. - 1973. - 400 с.
101. Копылов, И.П. Проектирование электрических машин: учебник для вузов / И.П. Копылов, Ф.А. Горяинов, Б.К. Клоков - 4е изд. перераб. и доп. - М.: Издательство Юрайт. - 2011. - 767 с.
102. Кривцов, В.С. Неисчерпаемая энергия. Книга 1. Ветроэлектрогенераторы / В.С. Кривцов, А.М. Олейников, А.И. Яковлев. - Севастополь: издание Севастопольский национальный технический университет. - 2003. - 400 с.
103. Кривцов, В.С. Неисчерпаемая энергия. Книга 2. Ветроэнергетика / В.С. Кривцов, А.М. Олейников, А.И. Яковлев. - Севастополь: издание Севастопольский национальный технический университет. - 2004.- 519 с.
104. Кулагин, Р.Н. Анализ конструкций тихоходных генераторов с постоянными магнитами // журнал Известия ВолГТУ. - Волгоград: ВолГТУ. - 2011. - №13. - С. 79-80.
105. Лаптев, Н.Н. Электроэнергетическая установка / Н.Н. Лаптев, А.В. Левин, В.М. Довгалёнок, Д.В. Левин // патент на изобретение RUS 2460203 23.12.2010.
106. Лаптев, Н.Н. Способ управления системой электроснабжения / Н.Н. Лаптев, А.В. Левин, В.М. Довгалёнок, М.Ф.Ходунов, Н.И. Маклецов // патент на изобретение RUS 2411622 27.11.2009.
107. Лаптев, Н.Н. Система генерирования электроэнергии / Н.Н. Лаптев, А.В. Левин, В.М. Довгалёнок, В.А. Хабаров // патент на полезную модель RUS 113892 28.10.2011
108. Лаптев, Н.Н. Система электроснабжения / Н.Н. Лаптев, А.В. Левин, В.М. Довгалёнок, М.Ф. Ходунов, Н.И. Маклецов // патент на полезную модель RUS 91488 27.11.2009.
109. Лаптев, Н.Н. Электроэнергетическая установка / Н.Н. Лаптев, А.В. Левин, В.М. Довгалёнок, М.Ф. Ходунов, М.А. Маслов // патент на полезную модель RUS 95919 29.01.2010.
110. Лаптев, Н.Н. Электроэнергетическая установка / Н.Н. Лаптев, А.В. Левин, В.М. Довгалёнок // патент на полезную модель RUS 97227 09.06.2010
111. Лаптев, Н.Н. Магнитоэлектрический генератор / Н.Н. Лаптев, А.В. Левин, В.М. Довгалёнок, М.Ф. Ходунов // патент на полезную модель RUS 81395 21.11.2008.

112. Лаптев, Н.Н. Магнитоэлектрическая машина / Н.Н. Лаптев, А.В. Левин, В.М. Довгалёнок, М.Ф. Ходунов // патент на полезную модель RUS 81397 21.11.2008.
113. Левин, А.В. Проектирование генератора с редкоземельными магнитами в системе электроснабжения летательных аппаратов / А.В. Левин, Д.В. Левин, Э.Я. Лившиц, Б.С. Зечихин. - Электричество. - 2009. № 10. - С. 41-47.
114. Легошин, Д.В. Экспериментальное определение характеристик синхронного генератора с возбуждением от постоянных магнитов // журнал Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. - Харьков: ХАИ. -2010. - № 45. - С. 298-303.
115. Ледовский, А.Н. Электрические машины с высококоэрцитивными постоянными магнитами. - Москва: Энергоатомиздат. - 1985. - 168 с.
116. Лифанов, В. А. Расчет электрических машин малой мощности с возбуждением от постоянных магнитов. - 2-е изд., перераб. и доп. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ. - 2010. - 164 с.
117. Лютер, Р.А. Расчёт синхронных машин. - Л.: Энергия. - 1979. - 272 с.
118. Макаричев, Ю.А. Синхронные машины: учебное пособие / Ю.А. Макаричев, В.Н. Овсянников. - Самара: Самар.гос.техн.ун-т. - 2010. - 156 с.
119. Мисютин, Р.Ю. Автоматизированное конструирование авиационных электрических генераторов с постоянными магнитами / Р.Ю. Мисютин, А.В. Левин, С.В. Журавлев, Б.С. Зечихин // Вестник Московского авиационного института. - 2013. - Т. 20. № 2. - С. 132-139.
120. Овчинников, Л.Е. Бесконтактные двигатели постоянного тока / Л.Е. Овчинников, Н.И. Лебедев. - Л.: Наука. - 1979. - 270 с.
121. Осин, И.Л. Электрические машины. Синхронные машины / Осин И.Л., Шакарян Ю.Г. - под ред. И.П. Копылова. - М.: Высшая школа. - 1990. - 303 с.
122. Осипов, М.И. Ветроустановки - Учеб. пособие - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. - 2007. - 36 с: ил.
123. Пахомин, С.А. Проектирование синхронных генераторов: учебное пособие к курсовому проекту по электромеханике. - Новочеркасск: ЮРГТУ. - 2007. - 91с.
124. Планёр Гимли [Электронный ресурс]: Официальный сайт. Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Планёр_Гимли (дата обращения: 06.03.2016 г.)
125. Ракетные исследования атмосферы [Электронный ресурс]: Официальный сайт. Режим доступа: <http://epizodsspace.airbase.ru/bibl/meteo-i-gidro/1957/rak-iss-at8.html> (дата обращения: 08.09.2017 г.)

126. Резка электротехнической стали прецизионным лазером сегменты статора и ротора [Электронный ресурс]: Официальный сайт. Режим доступа: <https://promex-cut.ru/rezka-elektrotexnicheskoj-stali> (дата обращения: 10.09.2017 г.)

127. Русаков, А. М. Определение размеров полюсной системы индукторов вентильных синхронных генераторов с возбуждением от постоянных магнитов / А. М. Русаков, А. М. Сугробов, Е. О. Казимиров, Н. А. Окунеева, А. Н. Соломин // Вестник МЭИ. - 2016, №4. – С. 44-50.

128. Ряшенцев, Н.П. Самотормозящийся асинхронный двигатель с конусным ротором / Н.П. Ряшенцев, С.А. Швец. – Новосибирск: Энергия. – 1973. – 74 с.

129. Самолет Л-39. Ч. 2. Авиационное и радиоэлектронное оборудование самолета. - М.: Военное издательство. - 1990. – 272 с.

130. Сергеев, В.П. Проектирование электрических машин / В.П. Сергеев, Н.В. Виноградов, Ф.А. Горяинов. - М.: Энергия. - 1969. - 632 с.

131. Сипайлов, Г.А. Математическое моделирование электрических машин / Г.А. Сипайлов, К.А. Хорьков - М.: Высшая школа. - 1980. - 175 с.

132. Сливинская, А.Г. Электромагниты и постоянные магниты: учебное пособие для вузов. - М.: Энергия. - 1972. - 248 с.

133. Сугробов, А.М. Проектирование электрических машин автономных объектов: учебное пособие / А. М. Сугробов, А. М. Русаков. // Электрон. текстовые дан. - М. : Издательский дом МЭИ. - 2012. - 304 с.

134. Суперджет (SSJ-100): Ветрогенератор [Электронный ресурс]: Официальный сайт. Режим доступа: <http://superjet100.info/wiki:rat> (дата обращения: 13.12.2016 г.)

135. Суперджет (SSJ-100): Система электроснабжения [Электронный ресурс]: Официальный сайт. Режим доступа: <http://superjet100.info/wiki:electric> (дата обращения: 13.12.2016 г.)

136. Тазов, Г.В. Автоматизированное проектирование электрических машин малой мощности: учебное пособие для вузов / Г.В. Тазов, В.В. Хрущёв. - Л.: Энергоатомиздат. - 1991. - 336 с.

137. Татевосян, А.А. Моделирование магнитного поля синхронного генератора с постоянными магнитами / А.А. Татевосян, В.С. Мищенко // журнал Омский научный вестник. - Омск: Омский государственный технический университет. - 2016. - №4. - С. 90-93.

138. Токарев, Б.Ф. Электрические машины: учебное пособие для вузов. - М.: Энергоатомиздат. - 1990. - 624 с.

139. Туровский Я. Электромагнитные расчёты элементов электрических машин. - Перевод с польского. - М.: Энергоатомиздат. - 1986. - 200 с.

140. Устройство ВУ-7,5// АС-DC преобразователи для авиационной техники. Каталог перспективных разработок УАПО. – 2006 г. – 8 с.
141. Фильц, Р.В. Математическое моделирование явнополюсных синхронных машин / Р.В. Фильц, Н.Н. Лябук. - Львов: Свит. - 1991. - 176 с.
142. Харитонов, В.П. Автономные ветроэлектрические установки. - Москва: ГНУ ВИ-ЭСХ. - 2006. - 280 с.
143. Ходунов, М.Ф. Система генерирования электрической энергии (варианты) / М.Ф. Ходунов, В.М. Довгалёнок, А.В. Левин, Н.Н. Лаптев // патент на полезную модель RUS 64832 02.04.2007.
144. Цепковский, Ю. Система автоматизированного проектирования электрических машин: сборник научных трудов / Ю. Цепковский, У. Шмуцер // Вестник НТУ ХПИ. Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика. - Харьков: Изд-во НТУ ХПИ. - 2010. - С. 434-435.
145. Шефтер, Я.И. Изобретателю о ветродвигателях и ветроустановках / Я.И. Шефтер, И.В. Рождественский. - Издательство министерства сельского хозяйства СССР. – Москва. - 1957. – 148 с.
146. Юхнин, М.М. Система генерирования стабильного напряжения переменного тока / М.М. Юхнин, А.В. Левин, Э.Я. Лившиц, В.Г. Пузанов, С.А. Харитонов // патент на полезную модель RUS 81609 05.12.2008.
147. Яковлев, А.И. Расчёт и проектирование ветроэлектрических установок с горизонтальноосевой ветротурбиной и синхронным генератором на постоянных магнитах / А.И. Яковлев, М.А. Затучная, В.Н. Меркушев, В.Н. Пашков. - Харьков: ХАИ. - 2003. - 125 с.
148. Яковлев, А. И. Аэродинамический расчет ветротурбин пропеллерного типа: учеб. пособие по курсовому проектированию. / А. И. Яковлев, М. А. Затучная. - Харьков: ХАИ. - 2001. — 78 с.
149. Янсон, Р.А. Ветроустановки: учеб. пособие. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. - 2007. - 36 с.
150. Ярослав, Кучера Обмотки электрических вращательных машин / Кучера Ярослав, Гапл Йозеф. - Прага: Издательство чехословацкой академии наук. - 1963. – 981 с.
151. Boeing 777 System Overview [Электронный ресурс]: Официальный сайт. Режим доступа: http://www.eaton.com/ecm/groups/public/%40pub/%40eaton/%40aero/documents/content/ct_194202.pdf (дата обращения: 13.12.2016 г.)
152. Chun-Yu, Hsiao Design of High Performance Permanent-Magnet Synchronous Wind Generators [Электронный ресурс] / Chun-Yu Hsiao, Sheng-Nian Yeh, Jonq-Chin Hwang //

Energies.– 2014. - №7. - P. 7105-7124. - Режим доступа: www.mdpi.com/journal/energies (дата обращения: 13.12.2016 г.)

153. Emergency Airplane RATs [Электронный ресурс]: Официальный сайт. Режим доступа: <http://www.ieee.rackoneup.net/rrvs/06/Emergency%20RATs%20Presentation.pdf> (дата обращения: 13.12.2016 г.)

154. Lyshevski, S. E. Electromechanical systems and devices. - CRC Press. -2008.– 584 p.

155. Lyshevski, S. E. Micromechatronics modeling, analysis, and design with MATLAB / by Victor Giurgiutiu and Sergey E. Lyshevski. - 2nd ed. - CRC Press. - 2009. - 948 p.

156. Me-163 Comet [Электронный ресурс]: Официальный сайт. Режим доступа: <http://www.airwar.ru/enc/fww2/me163.html> (дата обращения: 13.12.2016 г.)

157. Andrada, P. Fractional-slot permanent magnet synchronous generator for low voltage applications [Электронный ресурс] / P. Andrada, B. Blanqué, E. Martínez, M.Torrent, J.A. Sánchez, J.I. Perat. - Официальный сайт. Режим доступа: <http://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/20662/169-andrada.pdf?sequence=1> (дата обращения: 08.08.2016)

158. Prashant, Kumar S. Chinamalli Power loss minimization of permanent magnet synchronous generator using particle swarm optimization / Prashant Kumar S. Chinamalli, Naveen T. S., Shankar C. B. // International Journal of Modern Engineering Research (IJMER). – 2012. - Vol.2. - Issue.6, Nov-Dec. – pp. 4069-4076 .

159. Ram Air Turbine (RAT) Test Equipment [Электронный ресурс]: Официальный сайт. Режим доступа: https://www.tronair.com/media/1046/ram_air_turbine_test_equipment.pdf (дата обращения: 13.12.2016 г.)

160. Rui, Melício wind turbines with permanent magnet synchronous generator and full-power converters: modelling, control and simulation / Melício Rui, Victor M.F. Mendes and João P.S. Catalão // Wind Turbines. – InTech. - 2011. - 652 p.

161. VC10: Incidents and Accidents [Электронный ресурс]: Официальный сайт. Режим доступа: http://www.vc10.net/History/incidents_and_accidents.html (дата обращения: 13.12.2016 г.)

162. Vijayalakshmi, S. Modelling and control of a wind turbine using permanent magnet synchronous generator / S. Vijayalakshmi, S. Saikumar. // International Journal of Engineering Science and Technology (IJEST). - 2011. - Vol.3. - № 3. - P. 2377-2384.

ПРИЛОЖЕНИЕ А. Конструкция перспективного авиационного
ветроэнергетического комплекса



Рисунок А.1 - Общий вид перспективного авиационного ветроэнергетического
комплекса

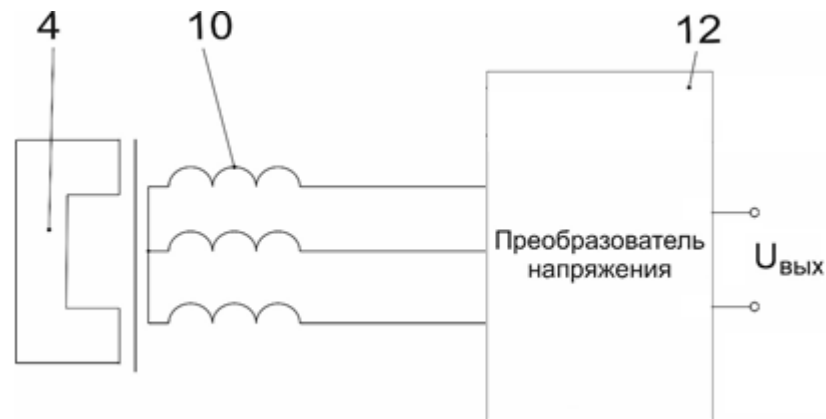


Рисунок А.2 - Электрическая схема перспективного авиационного ветроэнергетического
комплекса

ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Кривые размагничивания электротехнических сталей
49К2ФА и Somaloy

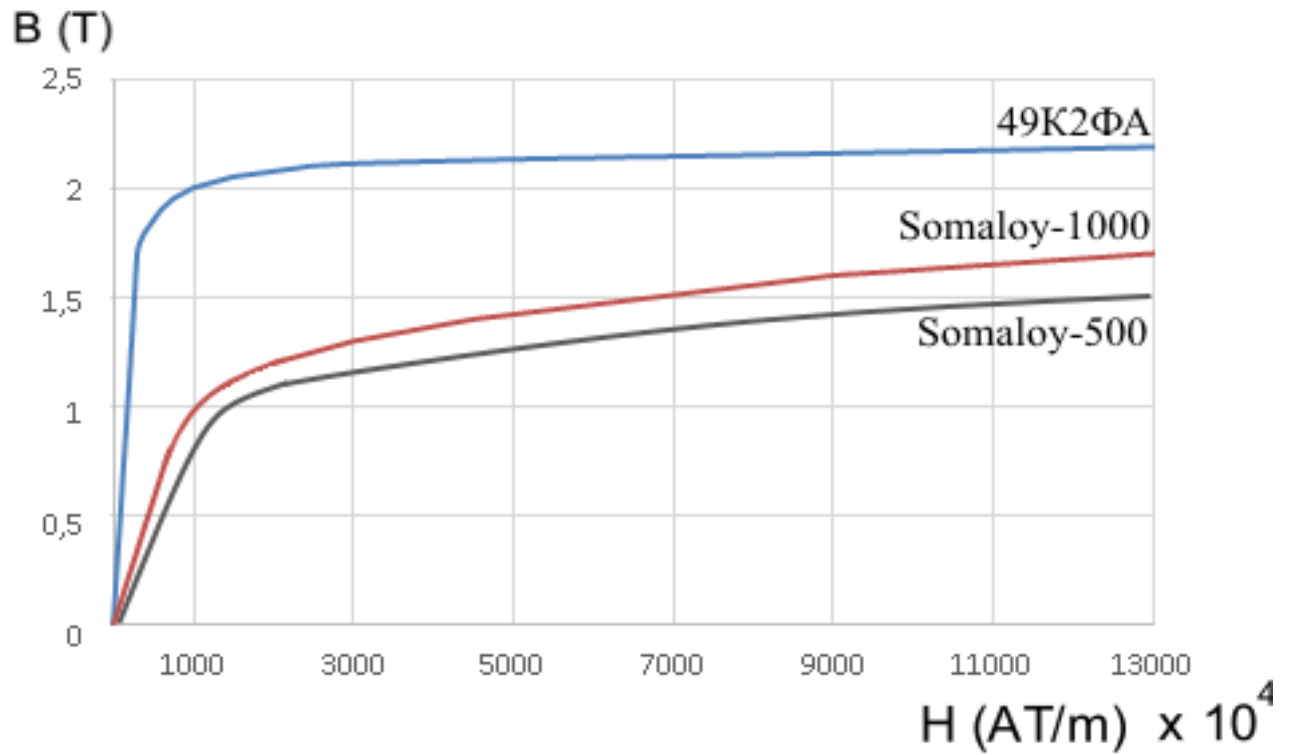


Рисунок Б.1 - Кривая размагничивания стали 49К2ФА и Somaloy

ПРИЛОЖЕНИЕ В. Кривая размагничивания неодимового магнита марки N35

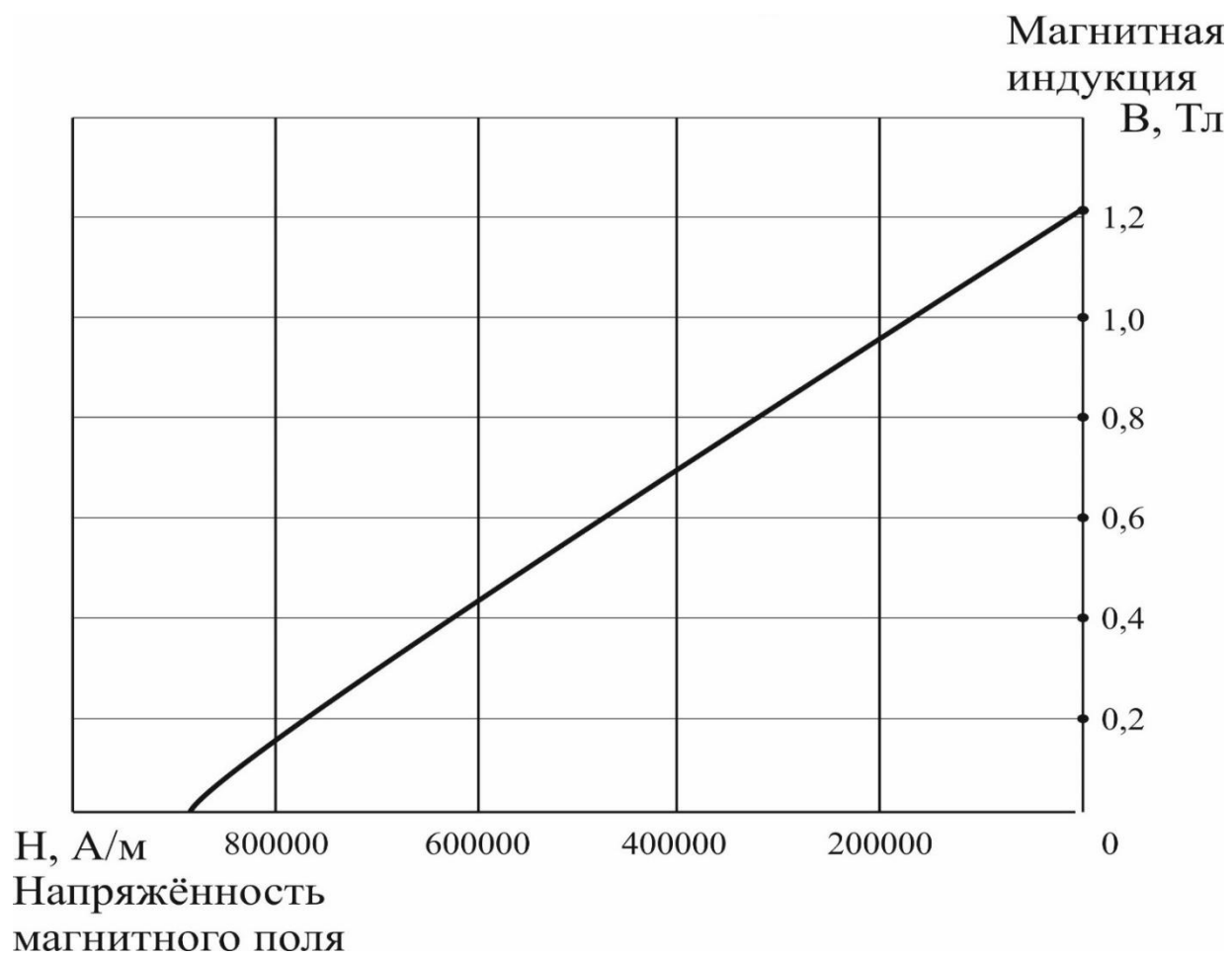


Рисунок В.1 - Кривая размагничивания неодимового магнита марки N35

ПРИЛОЖЕНИЕ Г. Расчёт параметров генератора с постоянными магнитами для
авиационного ветроэнергетического комплекса

В приложении представлена методика расчёта генератора с постоянными магнитами. В качестве примера выбран генератор конической формы, как наиболее нетипичный и затруднительный. Однако, по представленной ниже методике может быть также выполнен расчёт генератора с постоянными магнитами радиального и аксиального исполнения. Массогабаритная оптимизация параметров генератора в данном приложении не представлена.

Исходя из использования генератора АВЭК в качестве источника электроэнергии постоянного тока необходимо, чтобы на вход выпрямительных устройств поступала электроэнергия переменного тока, параметры которой совпадают или очень близки к параметрам электроэнергии основных генераторов. В связи с этим, на основе требований ГОСТ Р 54073-2010 выбраны следующие исходные данные: тип системы переменного тока – трёхфазная с выведенной нейтралью, номинальное фазное напряжение (под нагрузкой) - 115 В, частота - 400 Гц.

Для расчёта генератора с ПМ для АВЭК выбраны следующие исходные данные:

1. Номинальная мощность $P_{ном} = 15000 \text{ В} \cdot \text{А}$
2. Номинальное фазное напряжение $U_{\phi} = 115 \text{ В}$
3. Число фаз $m = 3$
4. Номинальная частота вращения $n = 4000 \text{ об/мин}$
5. Частота $f = 400 \text{ Гц}$
6. Коэффициент мощности при номинальной нагрузке $\cos(\varphi) = 0,84$
7. Предварительное значение линейной нагрузки $A_{лр} = 28000 \text{ А/м}$ (A по таблице Г.1)
8. Предварительное значение индукции в зазоре $B_{\delta лр} = 0,8 \text{ Тл}$ (B_{δ} по таблице Г.1)
9. Относительная ЭДС $E_{отн} = (1,05 \dots 1,25)$ - меньшее значение при большей мощности
Выберем $E_{отн} = 1,10$

Таблица Г.1 - Значения линейной нагрузки и индукции в воздушном зазоре

$P_{ном}$, кВ·А	20	30	40	60	80	90	100	Примечание
A , А/м	36000	40000	42000	45000	46000	47000	48000	Без перегрузки
A , А/м	30000	31000	32000	33000	35000	36000	38000	При двукратной перегрузке
B_{δ} , Тл	0,8	0,82	0,85	0,88	0,9	0,95	1,0	Без перегрузки
B_{δ} , Тл	0,82	0,85	0,88	0,91	0,95	1,0	1,1	При двукратной перегрузке

10. Коэффициент полюсного перекрытия $\alpha_k = (0,8...0,9)$

Выберем $\alpha_k = 0,85$

11. Остаточное значение магнитной индукции ПМ $B_r = (1,1...1,25)$, Тл

Выберем $B_r = 1,15$ Тл

12. Коэрцитивная сила ПМ $H_C = (840000...900000)$, А/м

Выберем $H_C = 880000$ А/м

13. Коэффициент перегрузки по току $k_{кз} = (2...3)$

Выберем $k_{кз} = 2$

Расчёт параметров генератора с постоянными магнитами

1. Расчёт основных параметров

1.1 Расчётная электромагнитная мощность, В·А

$$P_{ЭМ} = E_{ОТН} \cdot P_{НОМ} \quad (\text{Г.1})$$

$$P_{ЭМ} = 1,10 \cdot 15000 = 16500$$

1.2 Номинальный ток фазы, А

$$I_{НОМ} = \frac{P_{НОМ}}{m \cdot U_{\phi}} \quad (\text{Г.2})$$

$$I_{НОМ} = \frac{15000}{3 \cdot 115} = 43,48$$

1.3 Расчётный коэффициент полюсного перекрытия

$$\alpha_p = 0,185 + 0,8 \cdot \alpha_k \quad (\text{Г.3})$$

$$\alpha_p = 0,185 + 0,8 \cdot 0,85 = 0,865$$

1.4 Коэффициент формы ЭДС

$$k_\phi = 1,48 - 0,45 \cdot \alpha_p \quad (\text{Г.4})$$

$$k_\phi = 1,48 - 0,45 \cdot 0,865 = 1,09$$

1.5 Число пар полюсов

$$p = \frac{60 \cdot f}{n} \quad (\text{Г.5})$$

$$p = \frac{60 \cdot 400}{4000} = 6$$

1.6 Обмоточный коэффициент основной гармоники (предварительно)

$$k_{0_{\text{пр}}} = (0,90 \dots 0,96) \quad (\text{Г.6})$$

$$k_{0_{\text{пр}}} = 0,92$$

1.7 Коэффициент использования генератора, Дж/м³

$$k_{\text{исп_ген}} = 0,165 \cdot \alpha_p \cdot k_{0_{\text{пр}}} \cdot k_\phi \cdot A_{\text{ГПР}} \cdot B_{\delta_{\text{ГПР}}} \quad (\text{Г.7})$$

$$k_{\text{исп_ген}} = 0,165 \cdot 0,865 \cdot 0,92 \cdot 1,09 \cdot 28000 \cdot 0,8 = 3208,2$$

1.8 Угол наклона воздушного зазора к оси вращения ротора, град

Угол наклона воздушного зазора к оси вращения ротора α определяет форму ЭМ выбирается в зависимости от её конструктивного исполнения.

Например, $\alpha = 0^\circ$ - для радиального исполнения (индуктор расположен внутри якоря), $\alpha = 90^\circ$ - для аксиального исполнения (якорь и индуктор расположены рядом), $\alpha = 180^\circ$ - для радиального исполнения (якорь расположен внутри индуктора) (рис. Г.1) [67].

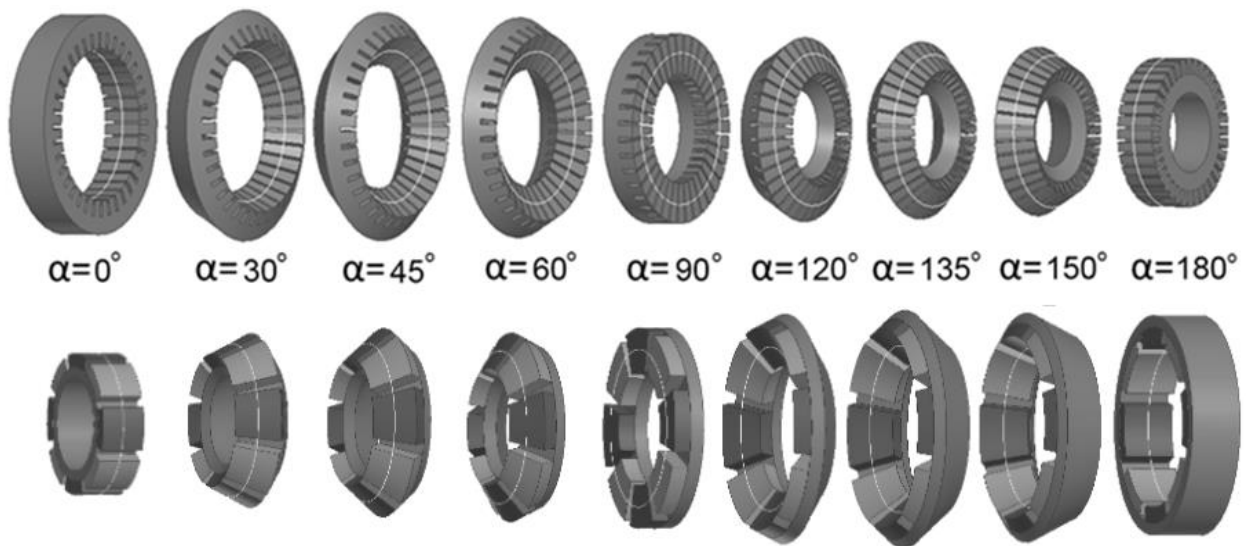


Рисунок Г.1 - Генераторы с ПМ с разным углом наклона воздушного зазора к оси вращения ротора

Исходя из положений, описанных в п. 1.4 угол раствора конуса, образующего форму магнитной системы генератора, равен 40° . Из рис. Г.1 следует, что когда ротор с постоянными магнитами является внешним, то при заданном угле раствора конуса угол наклона воздушного зазора к оси вращения ротора равен $\alpha = 180^\circ - 40^\circ = 140^\circ$ (рис. Г.2).

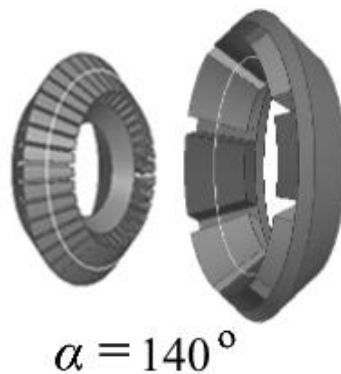


Рисунок Г.2 - Внешний вид якоря и индуктора генератора с ПМ при $\alpha = 140^\circ$

1.9 Конструктивный коэффициент для радиального исполнения ЭМ (предварительно) (радиальное исполнение рассчитывается как эталон, относительно которого определяются размеры эквивалентной ЭМ с любым углом наклона воздушного зазора к оси вращения ротора)

$$\lambda_{\text{рад}} = \frac{0,8}{\sqrt{p}} \quad (\text{Г.8})$$

$$\lambda_{\text{рад}} = \frac{0,8}{\sqrt{6}} = 0,326$$

1.10 Диаметр эталонной окружности для радиального исполнения ЭМ, м (радиальное исполнение рассчитывается как эталон, относительно которого далее определяются размеры эквивалентной ЭМ с выбранным углом наклона воздушного зазора к оси вращения ротора)

$$D_{0_рад} = \sqrt[3]{\frac{P_{\text{ЭМ}}}{k_{\text{исп_ген}} \cdot n \cdot \lambda_{\text{рад}}}} \quad (\text{Г.9})$$

$$D_{0_рад} = \sqrt[3]{\frac{16500}{3208,2 \cdot 4000 \cdot 0,326}} = 0,1579$$

1.11 Конструктивный коэффициент (рекомендуемое значение для эквивалентного генератора с выбранным углом наклона воздушного зазора к оси вращения ротора α)

$$\lambda_{\text{рек}} = \frac{0,8 - 0,3 \cdot \sin(\alpha)}{\sqrt{p}} \quad (\text{Г.10})$$

$$\lambda_{\text{рек}} = \frac{0,8 - 0,3 \cdot \sin(140^\circ)}{\sqrt{6}} = 0,240$$

Представленное уравнение даёт лишь ориентировочное значение при выборе оптимальной величины конструктивного коэффициента. Полученное из решения уравнения значение не является единственно верным, так как значение конструктивного коэффициента зависит от назначения ЭМ, её мощности, диаметра эталонной окружности, условий работы и охлаждения.

1.12 Конструктивный коэффициент (предварительно)

$\lambda_{\text{пр}}$ - выбирается самостоятельно, может отличаться от рекомендуемого значения (отклонение в пределах $\pm 20\%$ от рекомендуемого значения не приводит к заметному ухудшению характеристик генератора).

Выбираем $\lambda_{\text{пр}} = 0,240$

1.13 Диаметр эталонной окружности для эквивалентной ЭМ с выбранным углом наклона воздушного зазора к оси вращения ротора, м (формула расчёта D_0 выведена автором)

$$D_0 = D_{0_рад} \cdot \sqrt[3]{\frac{\lambda_{\text{рад}}}{\lambda_{\text{пр}}}} \quad (\text{Г.11})$$

$$D_0 = 0,1579 \cdot \sqrt[3]{\frac{0,326}{0,240}} = 0,1750$$

1.14 Окружная скорость точек эталонной окружности, м/с

$$V_0 = \frac{\pi \cdot D_0 \cdot n}{60} \quad (\text{Г.12})$$

$$V_0 = \frac{3,1415 \cdot 0,1750 \cdot 4000}{60} = 36,65$$

Если $V_0 > 85 + 15 \cdot \sin(\alpha)$ (м/с), то нужно увеличить $\lambda_{\text{пр}}$ (чтобы уменьшить D_0 и V_0) и повторить расчёт сначала

Если $V_0 < 85 + 15 \cdot \sin(\alpha)$ (м/с), то есть если окружная скорость находится в допустимых пределах, то продолжаем расчёт

1.15 Активная длина магнитопровода якоря, м

$$l_{\text{акт}} = \lambda_{\text{пр}} \cdot D_0 \quad (\text{Г.13})$$

$$l_{\text{акт}} = 0,240 \cdot 0,1750 = 0,0420$$

1.16 Полюсное деление, м

$$\tau = \frac{\pi \cdot D_0}{2 \cdot p} \quad (\text{Г.14})$$

$$\tau = \frac{3,1415 \cdot 0,1750}{2 \cdot 6} = 0,0458$$

1.17 Относительное синхронное индуктивное сопротивление якоря по продольной оси (ненасыщенное) (предварительно)

$X_{d_{\text{пр}}} = (1,6 \dots 2,0)$ для мощности 100...20 кВА соответственно (большее сопротивление для меньшей мощности)

Выберем $X_{d_{\text{пр}}} = 2,0$

1.18 Воздушный зазор, м

Выбираем воздушный зазор из диапазона

$$\delta = (0,5 \dots 1,5) \cdot 10^{-3}, \text{ м} \quad (\text{Г.15})$$

$$\delta = 0,0006$$

1.19 Число витков фазы

$$w_{\phi} = \frac{\pi \cdot A_{\text{пр}} \cdot D_0}{2 \cdot m \cdot I_{\text{ном}}} \quad (\text{Г.16})$$

$$w_{\phi} = \frac{3,1415 \cdot 28000 \cdot 0,1750}{2 \cdot 3 \cdot 43,48} = 59$$

1.20 Тип обмотки - двухслойная, волновая

1.21 Число пазов на полюс и фазу - q

Число пазов на полюс и фазу q должно быть целым ($2 \div 5$) или дробным вида:

$$q = b + \frac{c}{d} \quad (\Gamma.17)$$

где b – целое число, а $\frac{c}{d}$ – правильная несократимая дробь, причем d не кратно m и меньше p .

При $2p < 8$ чаще всего выбирают целое число $q = 3(2) - 5$ (большие значения для машин с меньшим числом полюсов).

При $2p > 8$ и малом τ можно выбирать обмотки с дробным $1,5 < q < 3$.

При целом q отношение $\frac{2p}{a_1}$ должно быть целым.

При дробном q должно быть целым числом отношение $\frac{2p}{a_1 d}$

Для уменьшения отрицательного влияния высших гармоник ЭДС желательно выбирать число пазов на полюс и фазу по возможности большим и дробным. В зависимости от числа пар полюсов для трёхфазной обмотки желательно выбирать значение q из следующих рядов

$$- 2p=4 - 3/2, 5/2, 7/2, 9/2, 11/2, 21/2, 31/2, 41/2, 51/2, \dots$$

$$- 2p=6 - 1/2, 3/2, 5/2, 7/2, 9/2, 11/2, 21/2, 31/2, 41/2, \dots$$

$$- 2p=8 - 3/2, 3/4, 5/4, 7/4, 9/4, 11/4, 11/2, 13/4, 21/4, 21/2, 31/4, \dots$$

$$- 2p=10 - 3/5, 4/5, 6/5, 7/5, 7/4, 8/5, 11/5, 12/5, 13/5, 14/5, 21/5, \dots$$

$$- 2p=12 - 3/4, 5/4, 11/4, 11/2, 13/4, 21/4, \dots$$

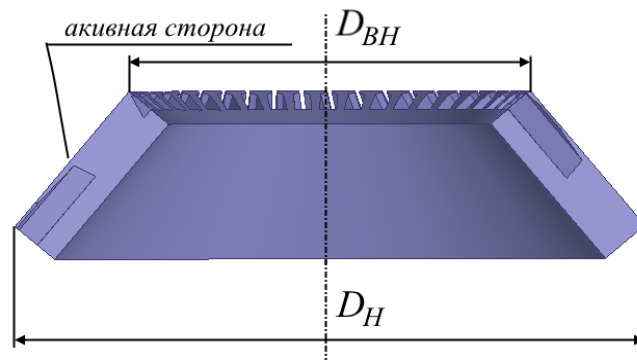
Для полученного числа пар полюсов $2p=12$ выберем $q=5/4=1,25$.

1.22 Число пазов якоря

$$Z = 2 \cdot p \cdot m \cdot q \quad (\Gamma.18)$$

$$Z = 2 \cdot 6 \cdot 3 \cdot 1,25 = 45$$

1.23 Определяем диаметры окружностей, проходящих через края активной длины (рис. Г.3) (внутренний диаметр $D_{вн}$ и наружный $D_{н}$, которые у радиальной ЭМ одинаковы и равны диаметру расточки якоря), м

Рисунок Г.3 - К определению диаметров D_{BH} и D_H

$$D_{1\text{як}} = D_0 + \delta \cdot \cos(\alpha) - l_{\text{акт}} \cdot \sin(\alpha) \quad (\text{Г.19})$$

$$D_{2\text{як}} = D_0 + \delta \cdot \cos(\alpha) + l_{\text{акт}} \cdot \sin(\alpha) \quad (\text{Г.20})$$

$$D_{1\text{як}} = 0,1750 + 0,0006 \cdot \cos(135^\circ) - 0,0420 \cdot \sin(140^\circ) = 0,1449$$

$$D_{2\text{як}} = 0,1750 + 0,0006 \cdot \cos(135^\circ) + 0,0420 \cdot \sin(140^\circ) = 0,2042$$

Если $D_{2\text{як}} > D_{1\text{як}}$ то $D_{BH} = D_{1\text{як}}$, $D_H = D_{2\text{як}}$, в противном случае $D_{BH} = D_{2\text{як}}$, $D_H = D_{1\text{як}}$

Так как $D_{2\text{як}} > D_{1\text{як}}$, то $D_{BH} = 0,1449$, $D_H = 0,2042$

1.24 Средний диаметр в центре активной длины магнитопровода якоря для ЭМ с любым углом наклона воздушного зазора к оси вращения ротора D_{CP} (для радиальных ЭМ D_{CP} равен диаметру расточки якоря), м

$$D_{CP} = D_0 + \delta \cdot \cos(\alpha) \quad (\text{Г.21})$$

$$D_{CP} = 0,1750 + 0,0006 \cdot \cos(135^\circ) = 0,1746$$

1.25 Зубцовое деление на среднем диаметре, м

$$t_{z_{CP}} = \frac{\pi \cdot D_{CP}}{Z} \quad (\text{Г.22})$$

$$t_{z_{CP}} = \frac{3,1415 \cdot 0,1746}{45} = 0,0122$$

Средний диаметр D_{CP} отличается от внутреннего D_{BH} и наружного D_H диаметров статора только у ЭМ с углом наклона воздушного зазора к оси вращения ротора $\alpha > 0^\circ$.

Для радиальных ЭМ: $\alpha = 0^\circ$, $D_{CP} = D_{BH} = D_H$.

1.26 Минимальное зубцовое деление (на внутреннем диаметре D_{BH}), м

$$t_{z_{\text{мин}}} = \frac{\pi \cdot D_{BH}}{Z} \quad (\text{Г.23})$$

$$t_{Z_{\text{мин}}} = \frac{3,1415 \cdot 0,1449}{45} = 0,0101$$

1.27 Максимально допустимая индукция в зубцах якоря, Тл

$B_{Z_{\text{макс}}}$ зависит от марки стали - для Somaloy-1000:

$$B_{Z_{\text{макс}}} = (1,1 - 1,2) \quad (\text{Г.24})$$

Выбираем $B_{Z_{\text{макс}}} = 1,2$ для стали Somaloy-1000 (приложение Б).

1.28 Коэффициент заполнения стали (якоря)

$k_{3C1} = 0,90$ если толщина листа стали равна 0,35 мм

$k_{3C1} = 0,95$ если толщина листа стали равна 0,50 мм

Выбираем толщину листа стали (якоря) равную 0,5 мм, при этом $k_{3C1} = 0,95$.

1.29 Ширина зубца якоря в минимальном сечении, м

$$b_{Z_{\text{мин}}} = \frac{B_{\delta_{\text{пр}}} \cdot t_{Z_{\text{мин}}}}{B_{Z_{\text{макс}}} \cdot k_{3C1}} \quad (\text{Г.25})$$

$$b_{Z_{\text{мин}}} = \frac{0,8 \cdot 0,0101}{1,2 \cdot 0,95} = 0,0071$$

Если ширина зубца якоря в минимальном сечении меньше минимально допустимой величины, т.е. если $b_{Z_{\text{мин}}} < b_{Z_{\text{мин, доп}}}$, определяемой исходя из условий прочности конструкции (как правило $b_{Z_{\text{мин, доп}}} \geq 1,5$ мм), то необходимо выбрать такое значение угла α наклона воздушного зазора к оси вращения ротора, которое не будет превышать критического значения $\alpha_{\text{кр}}$, определяемого по формуле:

$$\alpha_{\text{кр}} = \arcsin\left(\frac{\pi D_o - Z(b_{Z_{\text{мин, доп}}} + b_{\text{п}})}{\pi l}\right) \quad (\text{Г.26})$$

После определения $\alpha_{\text{кр}}$ необходимо повторить расчёт с пункта 1.8, соблюдая условие $\alpha \leq \alpha_{\text{кр}}$.

1.30 Ширина зубца якоря в среднем сечении, м

$$b_{Z_{\text{ср}}} = \frac{B_{\delta_{\text{пр}}} \cdot t_{Z_{\text{ср}}}}{B_{Z_{\text{макс}}} \cdot k_{3C1}} \quad (\text{Г.27})$$

$$b_{Z_{\text{ср}}} = \frac{0,8 \cdot 0,0122}{1,2 \cdot 0,95} = 0,0086$$

1.31 Высота усика, м (рис. Г.4)

$$h_{\text{УС}} = (0,5 \dots 1,0) \cdot 10^{-3} \quad (\text{Г.28})$$

Выбираем $h_{\text{УС}} = 0,0007$

1.32 Высота клина, м (рис. Г.4)

$$h_{\text{КЛ}} = (0,5 \dots 1,0) \cdot 10^{-3} \quad (\text{Г.29})$$

Выбираем $h_{\text{КЛ}} = 0,0005$

1.33 Толщина пазовой изоляции (на сторону), м

$$b_{\text{ИЗ}_\Pi} = (0,25 \dots 0,30) \cdot 10^{-3} \quad (\text{Г.30})$$

Выбираем $b_{\text{ИЗ}_\Pi} = 0,00030$

1.34 Толщина прокладки, м

$$b_{\text{ПР}} = (0,25 \dots 0,35) \cdot 10^{-3} \quad (\text{Г.31})$$

Выбираем $b_{\text{ПР}} = 0,0003$

1.35 Ширина паза, м

$$b_{\Pi} = \frac{\pi D_{\text{ВН}}}{Z} - b_{z_{\text{МИН}}} \quad (\text{Г.32})$$

$$b_{\Pi} = \frac{3,1415 \cdot 0,1449}{45} - 0,0071 = 0,0030$$

1.36 Ширина паза под обмотку, м

$$b_{\text{П}_\text{ОБМ}} = b_{\Pi} - 2 \cdot b_{\text{ИЗ}_\Pi} - 2 \cdot 10^{-4} \quad (\text{Г.33})$$

$$b_{\text{П}_\text{ОБМ}} = 0,0030 - 2 \cdot 0,00025 - 0,0002 = 0,00232$$

1.37 Число проводников в пазу

$$N_{\text{ПР}} = \frac{w_{\Phi}}{p \cdot q} \quad (\text{Г.34})$$

$$N_{\text{ПР}} = \frac{59}{6 \cdot 1,25} = 7,87$$

1.38 Уточнённое число проводников в пазу (должно быть чётным числом)

$N_{\text{УТ}}$ - ближайшее чётное число к $N_{\text{ПР}}$

$$N_{\text{УТ}} = 8$$

1.39 Число параллельных ветвей фазы a_1

Если $N_{\text{УТ}} < 2$, то должно быть $a_1 > 1$

Так как $N_{\text{УТ}} > 2$, то выбираем $a_1 = 1$

1.40 Максимально допустимая плотность тока в обмотке якоря, А/м^2

$$17 \cdot 10^6 < j_{\text{ЯК_МАКС}} < 22 \cdot 10^6 \quad (\text{Г.35})$$

Выбираем $j_{\text{ЯК_МАКС}} = 20 \cdot 10^6$

1.41 Сечение ветви фазы обмотки якоря, м^2

$$q_{\text{ЯК_ВЕТВ}} = \frac{I_{\text{НОМ}}}{j_{\text{ЯК_МАКС}} \cdot a_1} \quad (\text{Г.36})$$

$$q_{\text{ЯК_ВЕТВ}} = \frac{43,48}{20 \cdot 10^6 \cdot 1} = 2,17 \cdot 10^{-6}$$

1.42 Число параллельных проводников в одной ветви фазы по ширине паза - n_1

Выбирают $n_1 > 1$ при большом сечении провода и для удобства размещения его в пазу, в противном случае $n_1 = 1$

Выбираем $n_1 = 1$

1.43 Число параллельных проводников в одной ветви фазы по высоте паза - n_2

Выбирают $n_2 > 1$ при большом сечении провода и для удобства размещения его в пазу, в противном случае $n_2 = 1$

Выбираем $n_2 = 1$

1.44 Полное число проводников в пазу

$$N_{\text{ПОЛН}} = N_{\text{УТ}} \cdot a_1 \cdot n_1 \cdot n_2 \quad (\text{Г.37})$$

$$N_{\text{ПОЛН}} = 8 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = 8$$

1.45 Сечение элементарного проводника обмотки якоря, м^2

$$q_{\text{ЯК_ЭЛ_ПРОВ}} = \frac{I_{\text{НОМ}}}{j_{\text{ЯК_МАКС}} \cdot a_1 \cdot n_1 \cdot n_2} \quad (\text{Г.38})$$

$$q_{\text{ЯК_ЭЛ_ПРОВ}} = \frac{43,48}{20 \cdot 10^6 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1} = 2,17 \cdot 10^{-6}$$

1.46 Размер 'a' элементарного проводника обмотки якоря, м^2 (ГОСТ 26615-85, ГОСТ 434-78), м

$a_{\text{ЭЛ_ПРОВ}}$ - по таблице из ГОСТа

Из ГОСТ 434-78 для $q_{\text{ЯК_ЭЛ_ПРОВ}} = 2,17 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$ выбираем $a_{\text{ЭЛ_ПРОВ}} = 0,00100 \text{ м}$

1.47 Размер 'b' элементарного проводника обмотки якоря, м² (ГОСТ 26615-85, ГОСТ 434-78), м

$b_{\text{ЭЛ_ПРОВ}}$ - по таблице из ГОСТа

Из ГОСТ 434-78 для $q_{\text{ЯК_ЭЛ_ПРОВ}} = 2,17 \cdot 10^{-6}$ м² выбираем $b_{\text{ЭЛ_ПРОВ}} = 0,00250$ м

1.48 Изоляция провода

Выбирается тип изоляции, по справочным данным определяется толщина изоляции $\Delta_{\text{ИЗ}}$ для провода с выбранными размерами

Например:

ПНЭТП - рабочая температура 250 °С, $\Delta_{\text{ИЗ}} = (0,12 \dots 0,18) \cdot 10^{-3}$ м;

ППЭТ - рабочая температура 250 °С, $\Delta_{\text{ИЗ}} = (0,12 \dots 0,18) \cdot 10^{-3}$ м;

ППСДК - рабочая температура 250...400 °С, $\Delta_{\text{ИЗ}} = (0,20 \dots 0,30) \cdot 10^{-3}$ м;

ПНСДКТ - рабочая температура 250...400 °С, $\Delta_{\text{ИЗ}} = (0,20 \dots 0,30) \cdot 10^{-3}$ м;

Выбираем изоляцию ПНЭТП, для которой $\Delta_{\text{ИЗ}} = 0,00015$ м

1.49 Размер 'a_из' изолированного элементарного проводника обмотки якоря, м

$$a_{\text{ИЗ_ЭЛ_ПРОВ}} = a_{\text{ЭЛ_ПРОВ}} + \Delta_{\text{ИЗ}} \quad (\text{Г.39})$$

$$a_{\text{ИЗ_ЭЛ_ПРОВ}} = 0,00100 + 0,00015 = 0,00115$$

1.50 Размер 'b_из' изолированного элементарного проводника обмотки якоря, м

$$b_{\text{ИЗ_ЭЛ_ПРОВ}} = b_{\text{ЭЛ_ПРОВ}} + \Delta_{\text{ИЗ}} \quad (\text{Г.40})$$

$$b_{\text{ИЗ_ЭЛ_ПРОВ}} = 0,00250 + 0,00015 = 0,00265$$

1.51 Уточненное сечение элементарного проводника обмотки якоря, м²

$$q_{\text{ЯК_ЭЛ_ПРОВ_УТ}} = a_{\text{ЭЛ_ПРОВ}} \cdot b_{\text{ЭЛ_ПРОВ}} \quad (\text{Г.41})$$

$$q_{\text{ЯК_ЭЛ_ПРОВ_УТ}} = 0,00100 \cdot 0,00250 = 2,5 \cdot 10^{-6}$$

1.52 Уточненная плотность тока, А/мм²

$$j_{\text{ЯК_УТ}} = \frac{I_{\text{НОМ}}}{q_{\text{ЯК_ЭЛ_ПРОВ_УТ}} \cdot a_1 \cdot n_1 \cdot n_2} \quad (\text{Г.42})$$

$$j_{\text{ЯК_УТ}} = \frac{43,48}{2,5 \cdot 10^{-6} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1} = 17,39 \cdot 10^6$$

Уточненная плотность тока должна находиться в пределах от $17 \cdot 10^6$ до $23 \cdot 10^6$ А/м², в противном случае нужно выбрать другие значения $a_{\text{эл_пров}}$ и $b_{\text{эл_пров}}$ по ГОСТу и повторить расчёт.

Полученное значение уточнённой плотности тока находится в допустимых пределах, поэтому продолжаем расчёт с $j_{\text{як_ут}} = 18,3 \cdot 10^6$ А/м².

1.53 Толщина зазора для изоляции в пазу, м

$$b_{\text{зз_из_п}} = (0,2 \dots 0,3) \cdot 10^{-3} \quad (\text{Г.43})$$

$$b_{\text{зз_из_п}} = 0,0003$$

1.54 Число проводников по ширине паза

$$N_{b_{\text{п}}} = \frac{b_{\text{п_обм}}}{a_{\text{из_эл_пров}}} \quad (\text{Г.44})$$

$$N_{b_{\text{п}}} = \frac{0,00232}{0,00115} = 2,01$$

1.55 Уточнённое число проводников по ширине паза

$$N_{b_{\text{п_ут}}} - \text{ближайшее целое число к } N_{b_{\text{п}}}$$

$$N_{b_{\text{п_ут}}} = 2$$

1.56 Число проводников по высоте паза

$$N_{h_{\text{п}}} = \frac{N_{\text{полн}}}{N_{b_{\text{п_ут}}}} \quad (\text{Г.45})$$

$N_{h_{\text{п}}}$ округляем до ближайшего чётного числа

$$N_{h_{\text{п}}} = \frac{8}{2} = 4$$

1.57 Уточненное значение полного числа проводников в пазу

$$N_{\text{полн_ут}} = N_{h_{\text{п}}} \cdot N_{b_{\text{п_ут}}} \quad (\text{Г.46})$$

$$N_{\text{полн_ут}} = 2 \cdot 4 = 8$$

1.58 Дальнейший расчёт зависит от уточненного значения полного числа проводников в пазу $N_{\text{полн_ут}}$ (рис. Г.4).

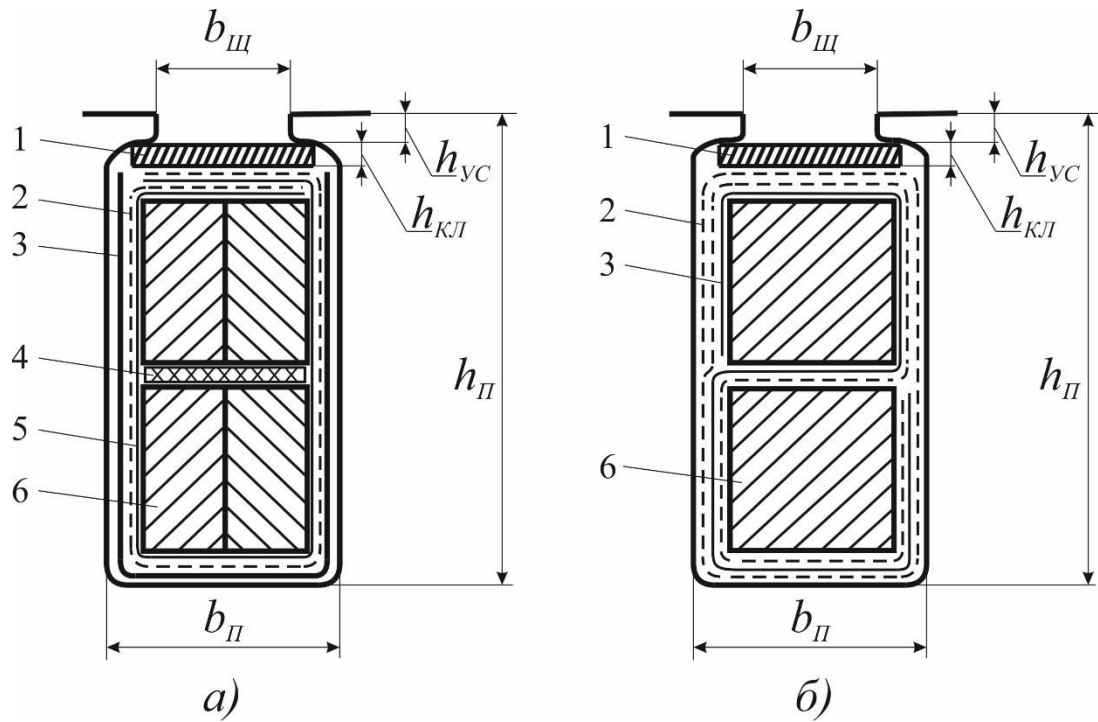


Рисунок Г.4 - Варианты расположения проводников в пазу и изоляции паза

а) – укладка проводников через щель: 1 – стеклотекстолит 0,5-0,65 мм, 2 – стеклослюденит формовочный 0,1-0,12 мм, 3 – стеклослюденит гибкий 0,1000-0,1025 мм, 4 – стекломиканит 0,22-0,27 мм, 5 – пленка 0,040-0,045 мм, 6 – провод марки ПНЭТП;

б) – торцевая укладка проводников: 1 – стеклотекстолит 0,35 мм, 2 – стеклослюденит 0,1 мм, 3 – пленка 0,04 мм, 4 – провод марки ПНЭТП.

В данном случае $N_{\text{полн.ут}} > 2$

а) Если $N_{\text{полн.ут}} > 2$ (рис. Г.4, а), тогда

1.59 Число проводников по ширине паза

$$N_{b_{\text{п}}} = \frac{b_{\text{п.обм}}}{a_{\text{из.эл.пров}}} \quad (\text{Г.47})$$

$$N_{b_{\text{п}}} = \frac{0,00232}{0,00115} = 2,01$$

1.60 Уточнённое число проводников по ширине паза

$N_{b_{\text{п.ут}}}$ - ближайшее целое число к $N_{b_{\text{п}}}$

$$N_{b_{\text{п.ут}}} = 2$$

1.61 Число проводников по высоте паза

$$N_{h_{\Pi}} = \frac{N_{\text{полн}_{\text{УГ}}}}{N_{b_{\Pi\text{УГ}}}} \quad (\text{Г.48})$$

$N_{h_{\Pi}}$ округляется до ближайшего чётного числа

$$N_{h_{\Pi}} = \frac{8}{2} = 4$$

1.62 Уточнённое значение высоты паза, м

$$h_{\Pi} = N_{h_{\Pi}} \cdot b_{\text{из_эл_пров}} + h_{\text{ус}} + h_{\text{кл}} + 2 \cdot b_{\text{из_п}} + b_{\text{пр}} + (0,3\dots 0,4) \cdot 10^{-3} \quad (\text{Г.49})$$

$$h_{\Pi} = 4 \cdot 0,00265 + 0,0007 + 0,0005 + 2 \cdot 0,00025 + 0,0003 + 0,00035 = 0,0125$$

1.63 Уточненное значение ширины паза, м

$$b_{\Pi\text{УГ}} = N_{b_{\Pi\text{УГ}}} \cdot a_{\text{из_эл_пров}} + 2 \cdot b_{\text{из_п}} + b_{\text{заз_из_п}} \quad (\text{Г.50})$$

$$b_{\Pi\text{УГ}} = 2 \cdot 0,00115 + 2 \cdot 0,00030 + 0,00030 = 0,0032$$

1.64 Отношение высоты паза к его ширине

Если $1,2 \leq \frac{h_{\Pi}}{b_{\Pi\text{УГ}}} \leq 4$, то продолжаем расчёт, в противном случае выбираем

другие значения $a_{\text{эл_пров}}$ и $b_{\text{эл_пров}}$ по ГОСТу для того же сечения проводника

В данном случае соотношение $\frac{h_{\Pi}}{b_{\Pi\text{УГ}}} = 3,9$ находится в допустимых преде-

лах, поэтому продолжаем расчёт.

1.65 Ширина щели, м (рис. Г.4)

$$b_{\text{щ}} = a_{\text{из_эл_пров}} + 2 \cdot b_{\text{из_п}} + 2 \cdot 10^{-4} \quad (\text{Г.51})$$

$$b_{\text{щ}} = 0,00115 + 2 \cdot 0,0003 + 0,0002 = 0,00195$$

б) Если $N_{\text{полн}_{\text{УГ}}} = 2$ (рис. Г.4,б) (не соответствует рассматриваемому случаю, приводится здесь для полноты методики расчёта), тогда

1.59 Число проводников по ширине паза

$$N_{b_{\Pi}} = 1 \quad (\text{Г.52})$$

1.60 Уточнённое число проводников по ширине паза

$$N_{b_{\Pi\text{УГ}}} = N_{b_{\Pi}} = 1 \quad (\text{Г.53})$$

1.61 Число проводников по высоте паза

$$N_{h_{\Pi}} = N_{\text{полн}_{\text{УГ}}} = 2 \quad (\text{Г.54})$$

1.62 Уточнённое значение высоты паза, м

$$h_{\text{П}} = N_{h_{\text{П}}} \cdot b_{\text{из_эл_пров}} + h_{\text{ус}} + h_{\text{кл}} + 3 \cdot b_{\text{из_п}} + (0,3 \dots 0,4) \cdot 10^{-3} \quad (\text{Г.55})$$

1.63 Уточненное значение ширины паза, м

$$b_{\text{Пут}} = a_{\text{из_эл_пров}} + 2 \cdot b_{\text{из_п}} + b_{\text{заз_из_п}} \quad (\text{Г.56})$$

1.64 Отношение высоты паза к его ширине

Если $1,5 \leq \frac{h_{\text{П}}}{b_{\text{Пут}}} \leq 4$, то продолжаем расчёт, в противном случае выбираем

другие значения $a_{\text{эл_пров}}$ и $b_{\text{эл_пров}}$ по ГОСТу для того же сечения проводника

1.65 Ширина щели, м (рис. Г.4)

$$b_{\text{щ}} = (0,6 \dots 1,0) \cdot 10^{-3} \quad (\text{Г.57})$$

1.66 Уточненное значение числа витков в фазе

$$w_{\text{фут}} = \frac{N_{\text{полнфут}} \cdot p \cdot q}{a_1 \cdot n_1 \cdot n_2} \quad (\text{Г.58})$$

$$w_{\text{фут}} = \frac{8 \cdot 6 \cdot 1,25}{1 \cdot 1 \cdot 1} = 60$$

1.67 Уточненное значение линейной нагрузки, А/м

$$A_{\text{ут}} = \frac{2 \cdot m \cdot w_{\text{фут}} \cdot I_{\text{ном}}}{\pi \cdot D_{\text{ср}}} \quad (\text{Г.59})$$

$$A_{\text{ут}} = \frac{2 \cdot 3 \cdot 60 \cdot 43,48}{3,1415 \cdot 0,1746} = 28542$$

1.68 Уточненное значение линейной нагрузки (не должно отличаться от предварительно выбранного больше, чем на 15%)

Если $\left| \frac{A_{\text{пр}} - A_{\text{ут}}}{A_{\text{пр}}} \right| \leq 0,15$, то продолжаем расчёт, в противном случае необходимо ввести новое значение линейной нагрузки, либо выбрать другой конструктивный коэффициент $\lambda_{\text{пр}}$ или число пазов на полюс и фазу q и повторить расчёт сначала.

В данном случае $\left| \frac{A_{\text{пр}} - A_{\text{ут}}}{A_{\text{пр}}} \right| = \left| \frac{28000 - 28542}{28000} \right| = 0,019$, условие $\left| \frac{A_{\text{пр}} - A_{\text{ут}}}{A_{\text{пр}}} \right| \leq 0,15$ выполняется, поэтому продолжаем расчёт.

1.69 Уточненный конструктивный коэффициент

$$\lambda_{\text{ут}} = \lambda_{\text{пр}} \cdot \frac{A_{\text{пр}}}{A_{\text{ут}}} \quad (\text{Г.60})$$

$$\lambda_{\text{YT}} = 0,24 \cdot \frac{28000}{28542} = 0,235$$

1.70 Уточненная активная длина машины, м

$$l_{\text{акт YT}} = \lambda_{\text{YT}} \cdot D_{\text{эТ_окр}} \quad (\text{Г.61})$$

$$l_{\text{акт YT}} = 0,235 \cdot 0,1750 = 0,0412$$

1.71 Магнитный поток в воздушном зазоре, Вб

$$\Phi_{\delta} = \frac{E_{\text{отн}} \cdot U_{\phi}}{4 \cdot k_{\phi} \cdot k_{0\text{IP}} \cdot f \cdot w_{\phi\text{YT}}} \quad (\text{Г.62})$$

$$\Phi_{\delta} = \frac{1,1 \cdot 115}{4 \cdot 1,09 \cdot 0,92 \cdot 400 \cdot 60} = 0,00131$$

1.72 Магнитная индукция в воздушном зазоре, Тл

$$B_{\delta\text{YT}} = \frac{\Phi_{\delta}}{l_{\text{акт YT}} \cdot \alpha_p \cdot \tau} \quad (\text{Г.63})$$

$B_{\delta\text{YT}}$ должна соответствовать принятой в начале расчёта

$$B_{\delta\text{YT}} = \frac{0,00131}{0,0412 \cdot 0,865 \cdot 0,0458} = 0,8044$$

Если полученное значение $B_{\delta\text{YT}}$ отличается от принятого в начале расчёта больше, чем на 5%, то значение конструктивного коэффициента необходимо скорректировать при неизменном диаметре эталонной окружности D_0 и повторить расчёт сначала, т.е.

должно выполняться условие $\left| \frac{B_{\delta\text{IP}} - B_{\delta\text{YT}}}{B_{\delta\text{IP}}} \right| \leq 0,05$.

В данном случае $\left| \frac{B_{\delta\text{IP}} - B_{\delta\text{YT}}}{B_{\delta\text{IP}}} \right| = \left| \frac{0,8 - 0,8044}{0,8} \right| = 0,0055$, условие $\left| \frac{B_{\delta\text{IP}} - B_{\delta\text{YT}}}{B_{\delta\text{IP}}} \right| \leq 0,05$ вы-

полняется, поэтому продолжаем расчёт.

1.73 Уточненное значение максимальной индукции в зубце якоря на среднем диаметре, Тл

$$B_{Z_{\text{макс YTCP}}} = \frac{B_{\delta\text{YT}} \cdot t_{Z_{\text{CP}}}}{b_{Z_{\text{CP}}}} \quad (\text{Г.64})$$

$$B_{Z_{\text{макс YTCP}}} = \frac{0,8044 \cdot 0,0122}{0,0086} = 1,14$$

Для выбранной стали при $1,0 \leq B_{Z_{\text{макс YTCP}}} \leq 1,2$ Тл продолжаем расчёт, в противном случае:

если $B_{Z_{\max} \text{ уТср}} > 1,2$ Тл, то следует уменьшить ширину паза b_{Π} за счёт выбора других значений $a_{\text{эл_пров}}$ и $b_{\text{эл_пров}}$ по ГОСТу для того же сечения проводника, либо увеличить плотность тока $j_{\text{ЯК уТ}}$ или уменьшить число пазов на полюс и фазу q ,

если $B_{Z_{\max} \text{ уТср}} < 1,0$ Тл, то следует увеличить ширину паза b_{Π} за счёт выбора других значений $a_{\text{эл_пров}}$ и $b_{\text{эл_пров}}$ по ГОСТу для того же сечения проводника или увеличить число пазов на полюс и фазу q .

1.74 Выбираем минимально допустимую ширину зубца якоря на минимальном сечении, м

$$b_{Z_{\min} \text{ доП}} \geq 0,002 \quad (\text{Г.65})$$

Выбираем $b_{Z_{\min} \text{ доП}} = 0,002$

1.75 Ширина зубца якоря на меньшем диаметре $D_{\text{ВН}}$ (рис. Г.3) активной поверхности, м

$$b_{Z_{\text{ВН}}} = \frac{\pi D_{\text{ВН}}}{Z} - b_{\text{П уТ}} \quad (\text{Г.66})$$

$$b_{Z_{\text{ВН}}} = \frac{3,1415 \cdot 0,1449}{45} - 0,0032 = 0,0069$$

Если $b_{Z_{\text{ВН}}} > b_{Z_{\min} \text{ доП}}$, то продолжаем расчёт, в противном случае необходимо уменьшить конструктивный коэффициент $\lambda_{\text{ПР}}$ или число пазов на полюс и фазу q и повторить расчёт.

В данном случае условие $b_{Z_{\text{ВН}}} > b_{Z_{\min} \text{ доП}}$ выполняется, поэтому продолжаем расчёт.

1.76 Ширина зубца якоря на большем диаметре $D_{\text{Н}}$ (рис. Г.3) активной поверхности, м

$$b_{Z_{\text{Н}}} = \frac{\pi D_{\text{Н}}}{Z} - b_{\text{П уТ}} \quad (\text{Г.67})$$

$$b_{Z_{\text{Н}}} = \frac{3,1415 \cdot 0,2042}{45} - 0,0032 = 0,0110$$

1.77 Выбираем допустимую индукцию в ярме якоря $B_{\text{ЯР як}}$ в зависимости от марки стали, Тл

Для стали Somaloy-1000:

$$B_{\text{ЯР як}} = (1,1 \dots 1,2) \quad (\text{Г.68})$$

Выбираем $B_{\text{ЯР}_{\text{ЯК}}} = 1,2$.

1.78 Высота ярма якоря, м

$$h_{\text{ЯР}_{\text{ЯК}}} = \frac{\Phi_{\delta}}{2 \cdot l_{\text{акт}_{\text{УТ}}} \cdot B_{\text{ЯР}_{\text{ЯК}}} \cdot k_{\text{ЗС1}}} \quad (\text{Г.69})$$

$$h_{\text{ЯР}_{\text{ЯК}}} = \frac{0,00131}{2 \cdot 0,0412 \cdot 1,2 \cdot 0,95} = 0,0140$$

1.79 Высота магнитопровода якоря, м

$$h_{\text{ЯК}} = h_{\text{ЯР}_{\text{ЯК}}} + h_{\text{П}} \quad (\text{Г.70})$$

$$h_{\text{ЯК}} = 0,0140 + 0,0125 = 0,0265$$

1.80 Алгоритм определения основных размеров магнитопровода якоря генератора

1). Определение значений требуемых величин:

$$D_0 = 0,1750 \text{ м}, \delta = 0,0006 \text{ м}, l_{\text{акт}_{\text{УТ}}} = 0,0412 \text{ м}, h_{\text{ЯК}} = 0,0265 \text{ м}$$

2). Определение основных размеров магнитопровода якоря генератора, м (рис.

Г.5) (формулы расчёта основных размеров магнитопровода якоря выведены автором)

$$D_{1\text{ЯК}} = D_0 + \delta \cdot \cos(\alpha) - l_{\text{акт}_{\text{УТ}}} \cdot \sin(\alpha) \quad (\text{Г.71})$$

$$D_{2\text{ЯК}} = D_0 + \delta \cdot \cos(\alpha) + l_{\text{акт}_{\text{УТ}}} \cdot \sin(\alpha) \quad (\text{Г.72})$$

$$D_{3\text{ЯК}} = D_0 + 2 \cdot \left(h_{\text{ЯК}} + \frac{\delta}{2} \right) \cdot \cos(\alpha) + l_{\text{акт}_{\text{УТ}}} \cdot \sin(\alpha) \quad (\text{Г.73})$$

$$D_{4\text{ЯК}} = D_0 + 2 \cdot \left(h_{\text{ЯК}} + \frac{\delta}{2} \right) \cdot \cos(\alpha) - l_{\text{акт}_{\text{УТ}}} \cdot \sin(\alpha) \quad (\text{Г.74})$$

$D_{\text{МИН}}$ - минимальный диаметр магнитопровода якоря, наименьший из $D_{1\text{ЯК}}, D_{2\text{ЯК}},$

$D_{3\text{ЯК}}, D_{4\text{ЯК}}$

$D_{\text{МАКС}}$ - максимальный диаметр магнитопровода якоря, наибольший из $D_{1\text{ЯК}}, D_{2\text{ЯК}},$

$D_{3\text{ЯК}}, D_{4\text{ЯК}}$

$\frac{D_{\text{МИН}}}{D_{\text{МАКС}}}$ - соотношение минимального и максимального диаметров магнитопро-

вода якоря

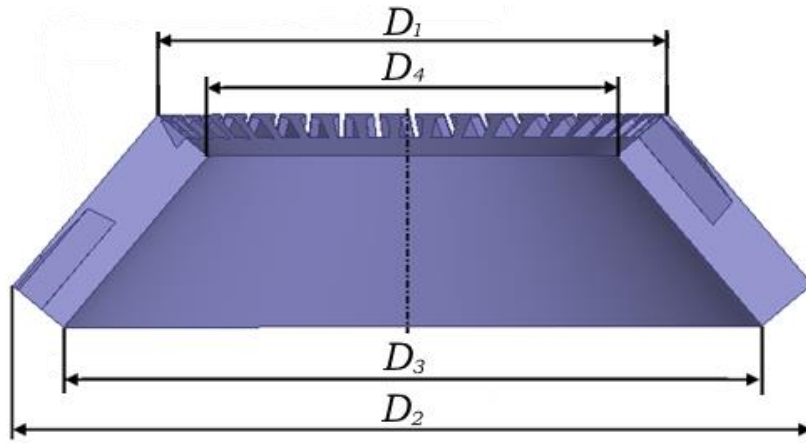


Рисунок Г.5 - Основные размеры якоря генератора

$$D_{1\text{як}} = 0,1750 + 0,0006 \cdot \cos(140^\circ) - 0,0412 \cdot \sin(140^\circ) = 0,1449$$

$$D_{2\text{як}} = 0,1750 + 0,0006 \cdot \cos(140^\circ) + 0,0412 \cdot \sin(140^\circ) = 0,2042$$

$$D_{3\text{як}} = 0,1750 + 2 \cdot \left(0,0265 + \frac{0,0006}{2}\right) \cdot \cos(140^\circ) + 0,0412 \cdot \sin(140^\circ) = 0,1650$$

$$D_{4\text{як}} = 0,1750 + 2 \cdot \left(0,0265 + \frac{0,0006}{2}\right) \cdot \cos(140^\circ) - 0,0412 \cdot \sin(140^\circ) = 0,1058$$

$$D_{\text{МИН}} = D_{4\text{як}} = 0,1058 \text{ м}, \quad D_{\text{МАКС}} = D_{2\text{як}} = 0,2042 \text{ м}.$$

$$\frac{D_{\text{МИН}}}{D_{\text{МАКС}}} = \frac{0,1058}{0,2042} = 0,52$$

2. Расчёт параметров обмотки якоря и обмоточных коэффициентов основной гармоники

2.1 Относительный шаг обмотки

$$y_{\text{отн}} = (0,66 \dots 1,0) \quad (\text{Г.75})$$

Выбираем $y_{\text{отн}} = 0,8$

2.2 Выбираем минимально допустимый зазор между лобовыми частями соседних витков обмотки якоря, м

$$\Delta_{\text{мин,доп}} \geq 0,0015 \quad (\text{Г.76})$$

Выбираем $\Delta_{\text{мин,доп}} = 0,0015$

2.3 Число пазов на полюсном делении

$$\tau_z = \frac{Z}{2 \cdot p} \quad (\text{Г.77})$$

$$\tau_z = \frac{45}{2 \cdot 6} = 3,75$$

2.4 Шаг секции по пазам

$$y_z = y_{\text{отн}} \cdot \tau_z \quad (\text{Г.78})$$

y_z округляется до ближайшего целого числа

$$y_z = 0,8 \cdot 3,75 = 3$$

2.5 Уточнённый относительный шаг обмотки

$$y_{\text{отнУТ}} = \frac{y_z}{\tau_z} \quad (\text{Г.79})$$

$$y_{\text{отнУТ}} = \frac{3}{3,75} = 0,8$$

2.6 Высота изолированных проводников в одном слое обмотки, м

$$h_{\text{из}} = \frac{b_{\text{из_эл_пров}} \cdot N_{h_{\text{П}}}}{2} \quad (\text{Г.80})$$

$$h_{\text{из}} = \frac{0,00265 \cdot 4}{2} = 0,0053$$

2.7 Определение вылета лобовых частей обмотки якоря (рисунки Г.5-Г.8) (подпункты 2.7.1-2.7.11)

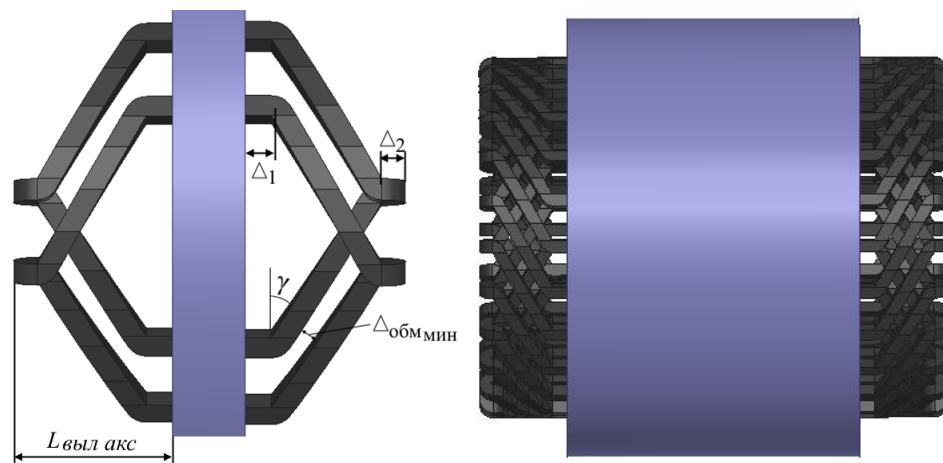


Рисунок Г.6 - К расчёту лобовой части обмотки якоря генератора радиального исполнения ($\alpha = 0^\circ$ или $\alpha = 180^\circ$)

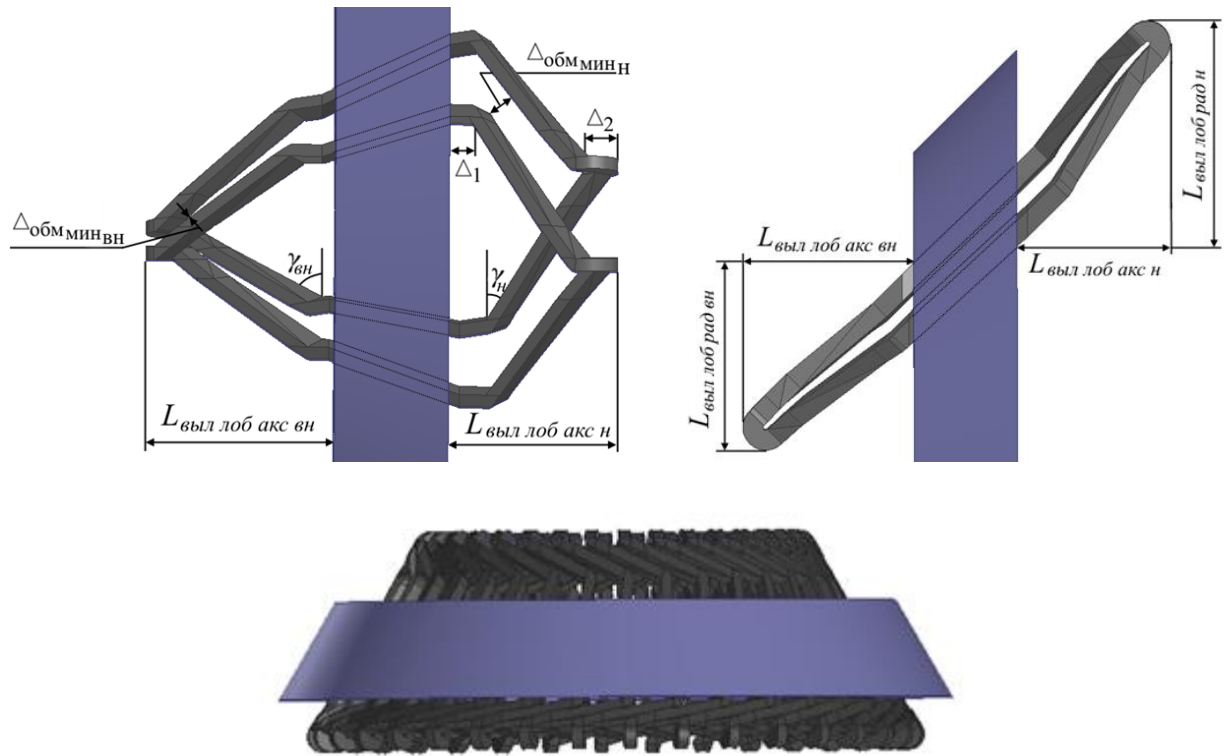


Рисунок Г.7 - К расчёту лобовой части обмотки якоря генератора конического исполнения ($0^\circ < \alpha < 90^\circ$ или $90^\circ < \alpha < 180^\circ$)

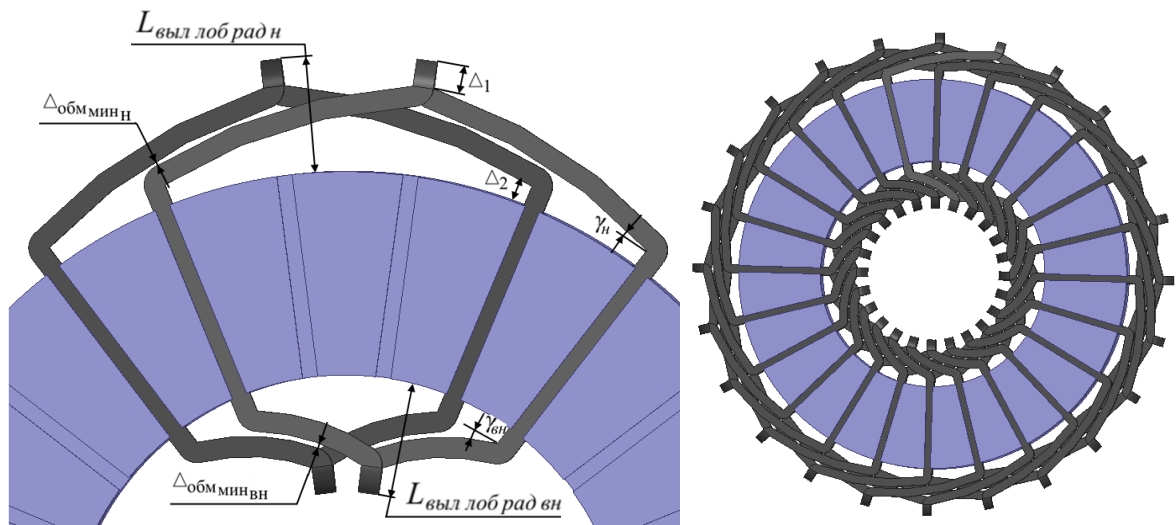


Рисунок Г.8 - К расчёту лобовой части обмотки якоря генератора аксиального исполнения ($\alpha=90^\circ$)

При $\alpha=140^\circ$ рассматривается случай, представленный на рис. Г.7.

2.7.1 Вылет прямого участка обмотки из магнитопровода, м

$$\Delta_1 = (0,001 \dots 0,003) \quad (\text{Г.81})$$

Выберем $\Delta_1=0,001$

2.7.2 Длина прямого участка соединения проводников, м

$$\Delta_2 = 1,5 \cdot b_{\text{из_эл_пров}} \quad (\text{Г.82})$$

$$\Delta_2 = 1,5 \cdot 0,00265 = 0,004$$

2.7.3 Угол между проводником секции и торцевой стороной магнитопровода якоря на меньшем диаметре, град (формула расчёта $\gamma_{\text{вн}}$ выведена автором)

$$\gamma_{\text{вн}} = \arcsin\left(\frac{\Delta_{\text{миндоп}}}{b_{Z_{\text{вн}}} + b_{\text{Пут}}}\right) \quad (\text{Г.83})$$

$$\gamma_{\text{вн}} = \arcsin\left(\frac{0,0025}{0,0069 + 0,0032}\right) = 18,6^0$$

2.7.4 Угол между проводником секции и торцевой стороной магнитопровода якоря на большем диаметре, град (формула расчёта $\gamma_{\text{н}}$ выведена автором)

$$\gamma_{\text{н}} = \arcsin\left(\frac{\Delta_{\text{миндоп}}}{b_{Z_{\text{н}}} + b_{\text{Пут}}}\right) \quad (\text{Г.84})$$

$$\gamma_{\text{н}} = \arcsin\left(\frac{0,0025}{0,0110 + 0,0032}\right) = 7,9^0$$

Примечание. Для радиального исполнения $\gamma_{\text{вн}} = \gamma_{\text{н}} = \gamma$

2.7.5 Длина лобовой части секции $L_{\text{лобвн}}$ на меньшем диаметре $D_{\text{вн}}$ (формула расчёта $L_{\text{лобвн}}$ выведена автором), м

$$L_{\text{лобвн}} = \Delta_1 + \Delta_2 + \frac{0,5 \cdot y_Z \cdot (b_{Z_{\text{вн}}} + b_{\text{Пут}})}{\cos(\gamma_{\text{вн}})} + \pi \cdot a_{\text{из_эл_пров}} \cdot N_{b_{\text{Пут}}} \cdot \frac{0,5 \cdot \pi - \frac{\gamma_{\text{вн}} \cdot \pi}{180}}{2 \cdot \pi} + \frac{\pi \cdot h_{\text{из}}}{4} + 2 \cdot 10^{-3} \quad (\text{Г.85})$$

$$L_{\text{лобвн}} = 0,001 + 0,004 + \frac{0,5 \cdot 3 \cdot (0,0069 + 0,0032)}{\cos(18,6^0)} + 3,1415 \cdot 0,00115 \cdot 2 \cdot \frac{0,5 \cdot 3,1415 - \frac{18,6 \cdot 3,1415}{180}}{2 \cdot 3,1415} + \frac{3,1415 \cdot 0,0053}{4} + 0,002 = 0,0109$$

2.7.6 Длина лобовой части секции $L_{\text{лобн}}$ на большем диаметре $D_{\text{н}}$ (формула расчёта $L_{\text{лобн}}$ выведена автором), м

$$L_{\text{лобн}} = \Delta_1 + \Delta_2 + \frac{0,5 \cdot y_Z \cdot (b_{Z_{\text{н}}} + b_{\text{Пут}})}{\cos(\gamma_{\text{н}})} + \pi \cdot a_{\text{из_эл_пров}} \cdot N_{b_{\text{Пут}}} \cdot \frac{0,5 \cdot \pi - \frac{\gamma_{\text{н}} \cdot \pi}{180}}{2 \cdot \pi} + \frac{\pi \cdot h_{\text{из}}}{4} + 2 \cdot 10^{-3} \quad (\text{Г.86})$$

$$L_{\text{лобн}} = 0,001 + 0,004 + \frac{0,5 \cdot 3 \cdot (0,0110 + 0,0032)}{\cos(7,9^0)} + 3,1415 \cdot 0,00115 \cdot 2 \cdot \frac{0,5 \cdot 3,1415 - \frac{7,9 \cdot 3,1415}{180}}{2 \cdot 3,1415} + \frac{3,1415 \cdot 0,0053}{4} + 0,002 = 0,0091$$

Примечание. Для радиального исполнения $L_{\text{лобВН}} = L_{\text{лобВН}} = L_{\text{лоб}}$

2.7.7 Длина вылета лобовой части в аксиальном направлении (вдоль оси вращения ротора) на меньшем диаметре, м (формула расчёта $L_{\text{ВЫЛ}_{\text{лобВН}}_{\text{АКС}}}$ выведена автором)

$$L_{\text{ВЫЛ}_{\text{лобВН}}_{\text{АКС}}} = L_{\text{лобВН}} \cdot \cos(\alpha) \quad (\text{Г.87})$$

$$L_{\text{ВЫЛ}_{\text{лобВН}}_{\text{АКС}}} = 0,0109 \cdot \cos(140^\circ) = 0,0077$$

2.7.8 Длина вылета лобовой части в аксиальном направлении (вдоль оси вращения ротора) на большем диаметре, м (формула расчёта $L_{\text{ВЫЛ}_{\text{лобВН}}_{\text{АКС}}}$ выведена автором)

$$L_{\text{ВЫЛ}_{\text{лобВН}}_{\text{АКС}}} = L_{\text{лобВН}} \cdot \cos(\alpha) \quad (\text{Г.88})$$

$$L_{\text{ВЫЛ}_{\text{лобВН}}_{\text{АКС}}} = 0,0091 \cdot \cos(140^\circ) = 0,0064$$

Примечание. Для радиального исполнения $L_{\text{ВЫЛ}_{\text{лобВН}}_{\text{АКС}}} = L_{\text{ВЫЛ}_{\text{лобВН}}_{\text{АКС}}} = L_{\text{ВЫЛ}_{\text{лоб}}_{\text{АКС}}}$,

для аксиального исполнения $L_{\text{ВЫЛ}_{\text{лобВН}}_{\text{АКС}}} = L_{\text{ВЫЛ}_{\text{лобВН}}_{\text{АКС}}} = 0$

2.7.9 Длина вылета лобовой части в радиальном направлении на меньшем диаметре, м (формула расчёта $L_{\text{ВЫЛ}_{\text{лобВН}}_{\text{РАД}}}$ выведена автором)

$$L_{\text{ВЫЛ}_{\text{лобВН}}_{\text{РАД}}} = L_{\text{лобВН}} \cdot \sin(\alpha) \quad (\text{Г.89})$$

$$L_{\text{ВЫЛ}_{\text{лобВН}}_{\text{РАД}}} = 0,0109 \cdot \sin(140^\circ) = 0,0077$$

2.7.10 Длина вылета лобовой части в радиальном направлении на большем диаметре, м (формула расчёта $L_{\text{ВЫЛ}_{\text{лобВН}}_{\text{РАД}}}$ выведена автором)

$$L_{\text{ВЫЛ}_{\text{лобВН}}_{\text{РАД}}} = L_{\text{лобВН}} \cdot \sin(\alpha) \quad (\text{Г.90})$$

$$L_{\text{ВЫЛ}_{\text{лобВН}}_{\text{РАД}}} = 0,0091 \cdot \sin(140^\circ) = 0,0064$$

Примечание. Для радиального исполнения $L_{\text{ВЫЛ}_{\text{лобВН}}_{\text{РАД}}} = L_{\text{ВЫЛ}_{\text{лобВН}}_{\text{РАД}}} = 0$

2.7.11 Минимальный зазор между лобовыми частями проводников соседних секций на меньшем диаметре, м (формула расчёта $\Delta_{\text{обм}_{\text{минВН}}}$ выведена автором)

$$\Delta_{\text{обм}_{\text{минВН}}} = \left(\frac{\pi \cdot (D_{\text{ВН}} - 0,5 \cdot L_{\text{лобВН}} \cdot \sin(\alpha))}{Z} - b_{\text{из_эл_пров}} \right) \cdot \sin(\gamma_{\text{ВН}}) \quad (\text{Г.91})$$

$$\Delta_{\text{обм}_{\text{минВН}}} = \left(\frac{3,1415 \cdot (0,1449 - 0,5 \cdot 0,0109 \cdot \sin(140^\circ))}{45} - 0,00265 \right) \cdot \sin(18,6^\circ) = 0,0023$$

2.7.12 Минимальный зазор между лобовыми частями проводников соседних секций на большем диаметре, м (формула расчёта $\Delta_{\text{обм}_{\text{мин}}_{\text{нн}}}$ выведена автором)

$$\Delta_{\text{обм}_{\text{мин}}_{\text{нн}}} = \left(\frac{\pi \cdot (D_{\text{н}} - 0,5 \cdot L_{\text{лоб}_{\text{н}}}) \cdot \sin(\alpha)}{Z} - b_{\text{из_эл_пров}} \right) \cdot \sin(\gamma_{\text{н}}) \quad (\text{Г.92})$$

$$\Delta_{\text{обм}_{\text{мин}}_{\text{нн}}} = \left(\frac{3,1415 \cdot (0,2042 - 0,5 \cdot 0,0091 \cdot \sin(140^{\circ}))}{45} - 0,00265 \right) \cdot \sin(7,9^{\circ}) = 0,0016$$

Примечание. Для радиального исполнения $\Delta_{\text{обм}_{\text{мин}}_{\text{вн}}} = \Delta_{\text{обм}_{\text{мин}}_{\text{нн}}} = \Delta_{\text{обм}_{\text{мин}}}$

Если $\Delta_{\text{обм}_{\text{мин}}_{\text{вн}}} < \Delta_{\text{мин}_{\text{доп}}}$, то $\gamma_{\text{вн}}$ необходимо увеличить на 1° (учитывая, что $\gamma_{\text{вн}}$ не может быть больше 90°) и пересчитать зазор $\Delta_{\text{обм}_{\text{мин}}_{\text{вн}}}$

Если $\Delta_{\text{обм}_{\text{мин}}_{\text{нн}}} < \Delta_{\text{мин}_{\text{доп}}}$, то $\gamma_{\text{н}}$ необходимо увеличить на 1° (учитывая, что $\gamma_{\text{н}}$ не может быть больше 90°) и пересчитать зазор $\Delta_{\text{обм}_{\text{мин}}_{\text{нн}}}$

Если при достижении равенства $\gamma_{\text{вн}} = 90^{\circ}$ или $\gamma_{\text{н}} = 90^{\circ}$ хотя бы одно из условий

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta_{\text{обм}_{\text{мин}}_{\text{вн}}} \geq \Delta_{\text{мин}_{\text{доп}}} \\ \Delta_{\text{обм}_{\text{мин}}_{\text{нн}}} \geq \Delta_{\text{мин}_{\text{доп}}} \end{array} \right. \quad (\text{Г.93})$$

не соблюдается, то это значит, что расстояние между лобовыми частями обмотки будет меньше допустимого (проводники соседних секций будут соприкасаться). В этом случае необходимо уменьшить конструктивный коэффициент $\lambda_{\text{тп}}$ или число пазов на полюс и фазу q и повторить расчёт.

2.8 Средняя длина витка секции, м

$$l_{\text{вср}} = 2 \cdot l_{\text{акт}_{\text{ут}}} + L_{\text{лоб}_{\text{вн}}} + L_{\text{лоб}_{\text{н}}} \quad (\text{Г.94})$$

$$l_{\text{вср}} = 2 \cdot 0,0412 + 0,0109 + 0,0091 = 0,225$$

2.9 Активное сопротивление фазы (при температуре 20°C), Ом

$$R_{\text{як}} = \frac{w_{\text{фут}} \cdot l_{\text{вср}}}{57 \cdot q_{\text{як}_{\text{эл_пров}_{\text{ут}}}} \cdot a_1 \cdot n_1 \cdot n_2} \quad (\text{Г.95})$$

$$R_{\text{як}} = \frac{60 \cdot 0,225}{57 \cdot 2,5 \cdot 10^{-6} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1} = 0,0947$$

2.10 Рабочая температура обмотки, $^{\circ}\text{C}$

$$t_{\text{раб}} = (80 \dots 220)^{\circ}\text{C} \quad (\text{Г.96})$$

Выберем $t_{\text{раб}} = 120$

2.11 Активное сопротивление фазы при рабочей температуре, Ом

$$R_{\text{ЯК}t_{\text{раб}}} = R_{\text{ЯК}} \cdot (1 + 3,8 \cdot 10^{-3} \cdot (t_{\text{раб}} - 20)) \quad (\text{Г.97})$$

$$R_{\text{ЯК}t_{\text{раб}}} = 0,0947 \cdot (1 + 3,8 \cdot 10^{-3} \cdot (120 - 20)) = 0,1308$$

2.12 Относительное значение активного сопротивления фазы

$$R_{\text{ЯК} \text{отн}} = \frac{R_{\text{ЯК}t_{\text{раб}}} \cdot I_{\text{ном}}}{U_{\phi}} \quad (\text{Г.98})$$

$$R_{\text{ЯК} \text{отн}} = \frac{0,1308 \cdot 43,48}{115} = 0,0494$$

2.13 Проводимость рассеяния паза

$$\Lambda_{\text{П}} = \frac{(N_{h_{\text{П}}} \cdot b_{\text{из_эл_пров}} + 0,00025) \cdot (7 + 9 \cdot y_{\text{отнУГ}})}{48 \cdot b_{\text{ПУГ}}} + \left(\frac{0,00025}{b_{\text{ПУГ}}} + \frac{3 \cdot h_{\text{кл}}}{b_{\text{ПУГ}} + 2 \cdot b_{\text{щ}}} + \frac{h_{\text{ус}}}{b_{\text{щ}}} \right) \times \frac{1 + 3 \cdot y_{\text{отнУГ}}}{4} \quad (\text{Г.99})$$

$$\Lambda_{\text{П}} = \frac{(4 \cdot 0,00265 + 0,00025) \cdot (7 + 9 \cdot 0,8)}{48 \cdot 0,0032} + \left(\frac{0,00025}{0,0032} + \frac{3 \cdot 0,0005}{0,0032 + 2 \cdot 0,00195} + \frac{0,0007}{0,00195} \right) \times \frac{1 + 3 \cdot 0,8}{4} = 1,6527$$

2.14 Проводимость рассеяния по коронкам зубцов

$$\Lambda_{\text{Кз}} = \frac{\alpha_{\text{к}}}{\frac{b_{\text{щ}}}{\delta} + 0,8} \quad (\text{Г.100})$$

$$\Lambda_{\text{Кз}} = \frac{0,85}{\frac{0,00195}{0,0006} + 0,8} = 0,2189$$

2.15 Коэффициент проводимости обмотки

$k = 0,334$ для 3-х фазной двухслойной обмотки

2.16 Проводимость рассеяния лобовых частей обмотки

$$\Lambda_{\text{ЛОБ}} = k \cdot \left(\frac{L_{\text{лобВН}} + L_{\text{лобН}}}{2} - 0,64 \cdot y_{\text{отнУГ}} \cdot \vartheta \cdot \frac{q}{l_{\text{актУГ}}} \right) \quad (\text{Г.101})$$

$$\Lambda_{\text{ЛОБ}} = 0,334 \cdot \left(\frac{0,0109 + 0,0091}{2} - 0,64 \cdot 0,8 \cdot 0,0458 \right) \cdot \frac{1,25}{0,0412} = 0,4851$$

2.17 Суммарная проводимость рассеяния обмотки якоря

$$\Lambda_{\text{Собм_ЯК}} = \Lambda_{\text{П}} + \Lambda_{\text{Кз}} + \Lambda_{\text{ЛОБ}} \quad (\text{Г.102})$$

$$\Lambda_{S_{\text{ОБМ_ЯК}}} = 1,6527 + 0,2189 + 0,4851 = 2,3566$$

2.18 Индуктивное сопротивление фазы обмотки якоря, Ом

$$X_S = 63 \cdot \left(\frac{w_{\text{ФУГ}}}{100} \right)^2 \cdot \frac{f}{400} \cdot \frac{l_{\text{акт.УГ}}}{p \cdot q} \cdot \Lambda_{S_{\text{ОБМ_ЯК}}} \quad (\text{Г.103})$$

$$X_S = 63 \cdot \left(\frac{60}{100} \right)^2 \cdot \frac{400}{400} \cdot \frac{0,0412}{6 \cdot 1,25} \cdot 2,3566 = 0,2936$$

2.19 Относительное значение индуктивного сопротивления фазы обмотки якоря

$$X_{S_{\text{отн}}} = \frac{X_S \cdot I_{\text{НОМ}}}{U_{\phi}} \quad (\text{Г.104})$$

$$X_{S_{\text{отн}}} = \frac{0,2936 \cdot 43,48}{115} = 0,111$$

2.20 Относительное значение ЭДС при нагрузке (уточненное)

$$E_{\text{отн.УГ}} = \sqrt{(\cos(\varphi) + R_{\text{ЯК}_{\text{отн}}})^2 + (\sin(\varphi) + X_{S_{\text{отн}}})^2} \quad (\text{Г.105})$$

$$\cos(\varphi) = 0,8 \text{ (из исходных данных)}, \quad \sin(\varphi) = \sqrt{1 - \cos^2(\varphi)} = \sqrt{1 - 0,8^2} = 0,6$$

$$E_{\text{отн.УГ}} = \sqrt{(0,8 + 0,0494)^2 + (0,6 + 0,1110)^2} = 1,1037$$

Если уточненное значение $E_{\text{отн.УГ}}$ отличается от принятого в начале расчёта $E_{\text{отн}}$ больше, чем на 5%, то значение конструктивного коэффициента $\lambda_{\text{ПР}}$ необходимо скорректировать при неизменном диаметре эталонной окружности D_0 и повторить расчёт сначала, т.е. должно выполняться условие $\left| \frac{E_{\text{отн}} - E_{\text{отн.УГ}}}{E_{\text{отн}}} \right| \leq 0,05$.

$$\text{В данном случае } \left| \frac{E_{\text{отн}} - E_{\text{отн.УГ}}}{E_{\text{отн}}} \right| = \left| \frac{1,10 - 1,1037}{1,10} \right| = 0,003, \text{ условие } \left| \frac{E_{\text{отн}} - E_{\text{отн.УГ}}}{E_{\text{отн}}} \right| \leq 0,05$$

выполняется, поэтому продолжаем расчёт.

2.21 Коэффициент распределения обмотки (для трёхфазной двухслойной обмотки)

$$k_p = \frac{1}{2 \cdot q' \cdot \sin\left(\frac{\pi}{6 \cdot q'}\right)} \quad (\text{Г.106})$$

где q' - числитель неправильной дроби: при $q = a + \frac{b}{c}$ имеем $q' = ac + b$.

$$\text{В данном случае } q = 1 + \frac{1}{4} = \frac{5}{4}, \text{ поэтому } q' = 5.$$

$$k_p = \frac{1}{2 \cdot 5 \cdot \sin\left(\frac{3,1415}{6 \cdot 5}\right)} = 0,9511$$

2.22 Коэффициент укорочения обмотки

$$k_y = \sin\left(\frac{y_{\text{отнУГ}} \cdot \pi}{2}\right) \quad (\text{Г.107})$$

$$k_y = \sin\left(\frac{0,8 \cdot 3,1415}{2}\right) = 0,9619$$

2.23 Скос пазов в долях зубцового деления

$$k_{\text{СК}_z} = (0,5 \dots 1) \quad (\text{Г.108})$$

Выберем $k_{\text{СК}_z} = 1$

2.24 Скос пазов по дуге окружности якоря, м

$$k_{\text{СК}_{\text{ОКР}}} = k_{\text{СК}_z} \cdot t_{z\text{CP}} \quad (\text{Г.109})$$

$$k_{\text{СК}_{\text{ОКР}}} = 1 \cdot 0,0122 = 0,0122$$

2.25 Коэффициент скоса пазов

$$k_{\text{СК}_{\text{II}}} = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{k_{\text{СК}_{\text{ОКР}}}}{\tau}\right)}{\frac{\pi}{2} \cdot \frac{k_{\text{СК}_{\text{ОКР}}}}{\tau}} \quad (\text{Г.110})$$

$$k_{\text{СК}_{\text{II}}} = \frac{\sin\left(\frac{3,1415}{2} \cdot \frac{0,0122}{0,0458}\right)}{\frac{3,1415}{2} \cdot \frac{0,0122}{0,0458}} = 0,9712$$

2.26 Обмоточный коэффициент основной гармоники

$$k_{0_{\text{УГ}}} = k_p \cdot k_y \cdot k_{\text{СК}_{\text{II}}} \quad (\text{Г.111})$$

$$k_{0_{\text{УГ}}} = 0,9511 \cdot 0,9619 \cdot 0,9712 = 0,89$$

Если полученное значение $k_{0_{\text{УГ}}}$ отличается от принятого в начале расчёта больше, чем на 5%, то значение конструктивного коэффициента $k_{\text{ПР}}$ необходимо скорректировать при неизменном диаметре эталонной окружности D_0 и повторить расчёт сначала,

т.е. должно выполняться условие $\left| \frac{k_{0_{\text{ПР}}} - k_{0_{\text{УГ}}}}{k_{0_{\text{ПР}}}} \right| \leq 0,05$

В данном случае $\left| \frac{k_{0\text{пр}} - k_{0\text{ут}}}{k_{0\text{пр}}} \right| = \left| \frac{0,92 - 0,89}{0,92} \right| = 0,032$, условие $\left| \frac{k_{0\text{пр}} - k_{0\text{ут}}}{k_{0\text{пр}}} \right| \leq 0,05$ выполняется, поэтому продолжаем расчёт.

3. Расчёт магнитной цепи на один полюс

3.1 Расчёт магнитной цепи якоря

3.1.1 Уточнённый поток в воздушном зазоре, Вб

$$\Phi_{\delta_{\text{ут}}} = \frac{E_{\text{отн ут}} \cdot U_{\phi}}{4 \cdot k_{\phi} \cdot k_{0\text{ут}} \cdot f \cdot w_{\phi_{\text{ут}}}} \quad (\text{Г.112})$$

$$\Phi_{\delta_{\text{ут}}} = \frac{1,10 \cdot 115}{4 \cdot 1,09 \cdot 0,89 \cdot 400 \cdot 60} = 0,00136$$

3.1.2 Уточнённая индукция в воздушном зазоре, Тл

$$B_{\delta_{\text{ут}}} = \frac{\Phi_{\delta_{\text{ут}}}}{l_{\text{акт ут}} \cdot \alpha_p \cdot \tau} \quad (\text{Г.113})$$

$$B_{\delta_{\text{ут}}} = \frac{0,00136}{0,0412 \cdot 0,865 \cdot 0,0458} = 0,83$$

3.1.3 Коэффициент воздушного зазора

$$k_{\delta} = \frac{t_{\text{ЗСР}}}{\left(\frac{b_{\text{ш}}}{\delta} \right)^2 \cdot \delta - \frac{t_{\text{ЗСР}}}{5 + \frac{b_{\text{ш}}}{\delta}}} \quad (\text{Г.114})$$

$$k_{\delta} = \frac{0,0122}{0,0122 - \frac{\left(\frac{0,00195}{0,0006} \right)^2 \cdot 0,0006}{5 + \frac{0,00195}{0,0006}}} = 1,07$$

3.1.4 Расчётная длина воздушного зазора, м

$$l_{\delta} = \delta \cdot k_{\delta} \quad (\text{Г.115})$$

$$l_{\delta} = 0,0006 \cdot 1,07 = 0,00064$$

3.1.5 Падение магнитного потенциала в воздушном зазоре, А

$$U_{\delta} = 0,8 \cdot l_{\delta} \cdot B_{\delta_{\text{ут}}} \cdot 10^6 \quad (\text{Г.116})$$

$$U_{\delta} = 0,8 \cdot 0,00064 \cdot 0,83 \cdot 10^6 = 426,7$$

3.1.6 Расчётная ширина зубца якоря (на расстоянии 1/3 от узкого сечения), м

$$b_{Z_{\frac{1}{3}}} = (D_{CP} + \frac{2 \cdot h_{П}}{3} \cdot \cos(\alpha)) \cdot \frac{\pi}{Z} - b_{П_{УТ}} \quad (\text{Г.117})$$

$$b_{Z_{\frac{1}{3}}} = (0,1746 + \frac{2 \cdot 0,0125}{3} \cdot \cos(135^{\circ})) \cdot \frac{3,1415}{45} - 0,0032 = 0,0086$$

3.1.7 Индукция в зубце якоря (в расчётном сечении), Тл

$$B_{Z_{\frac{1}{3}}} = \frac{B_{\delta_{УТ}} \cdot t_{Z_{CP}}}{b_{Z_{\frac{1}{3}}} \cdot k_{ЗС1}} \quad (\text{Г.118})$$

$$B_{Z_{\frac{1}{3}}} = \frac{0,83 \cdot 0,0122}{0,0086 \cdot 0,95} = 1,20$$

3.1.8 Напряженность магнитного поля в зубцах якоря, А/м

H_Z выбирается по кривой размагничивания для марки стали магнитопровода якоря в зависимости от значения индукции в зубце якоря (в расчётном сечении) $B_{Z_{\frac{1}{3}}}$

По кривой размагничивания стали Somaloy-1000 (приложение Б) для $B_{Z_{\frac{1}{3}}} = 1,20$ Тл выбираем $H_Z = 2400$ А/м

3.1.9 Падение магнитного потенциала в зубце якоря, А

$$U_Z = H_Z \cdot h_{П} \quad (\text{Г.119})$$

$$U_Z = 2400 \cdot 0,0125 = 30$$

3.1.10 Индукция в ярме якоря, Тл

$$B_{ЯР_{ЯК}} = \frac{\Phi_{\delta_{УТ}}}{2 \cdot l_{акт_{УТ}} \cdot h_{ЯР_{ЯК}} \cdot k_{ЗС1}} \quad (\text{Г.120})$$

$$B_{ЯР_{ЯК}} = \frac{0,00136}{2 \cdot 0,0412 \cdot 0,0140 \cdot 0,95} = 1,20$$

3.1.11 Напряженность магнитного поля в ярме якоря, А/м

$H_{ЯР_{ЯК}}$ выбирается по кривой размагничивания для марки стали магнитопровода якоря в зависимости от значения индукции в ярме якоря $B_{ЯР_{ЯК}}$

По кривой размагничивания стали Somaloy-1000 (приложение Б) для спинки якоря при $B_{ЯР_{ЯК}} = 1,20$ Тл выбираем $H_{ЯР_{ЯК}} = 2400$ А/м

3.1.12 Длина магнитной силовой линии в ярме якоря, м

$$l_{m_{\text{яр.як}}} = \frac{\pi \cdot (D_{\text{ср}} + (2 \cdot h_{\text{п}} + h_{\text{яр.як}})) \cdot \cos(\alpha)}{4 \cdot p} \quad (\text{Г.121})$$

$$l_{m_{\text{яр.як}}} = \frac{3,1415 \cdot (0,1746 + (2 \cdot 0,0125 + 0,0140)) \cdot \cos(140^{\circ})}{4 \cdot 6} = 0,0383$$

3.1.13 Падение магнитного потенциала в ярме якоря, А

$$U_{\text{яр.як}} = H_{\text{яр.як}} \cdot l_{m_{\text{яр.як}}} \quad (\text{Г.122})$$

$$U_{\text{яр.як}} = 2400 \cdot 0,0383 = 91,7$$

3.1.14 Падение магнитного потенциала в якоре, А

$$F_{a_{\text{як}}} = 2 \cdot U_{\delta} + 2 \cdot U_{\text{з}} + U_{\text{яр.як}} \quad (\text{Г.123})$$

$$F_{a_{\text{як}}} = 426,7 + 30 + 91,7 = 548,4$$

3.1.15 Коэффициент магнитной цепи якоря, А

$$k_s = \frac{F_{a_{\text{як}}}}{U_{\delta}} \quad (\text{Г.124})$$

$$k_s = \frac{548,4}{426,7} = 1,28$$

3.2 Расчёт индуктивных сопротивлений якоря и реакции якоря

3.2.1 Магнитодвижущая сила (МДС) реакции якоря (на полюс), А

$$F_{\text{як.пол}} = 0,45 \cdot k_{0_{\text{ут}}} \cdot \tau A_{\text{ут}} \quad (\text{Г.125})$$

$$F_{\text{як.пол}} = 0,45 \cdot 0,89 \cdot 0,0458 \cdot 28542 = 522,67$$

3.2.2 Коэффициенты приведения МДС реакции якоря к МДС постоянного магнита:

а) по продольной оси

$$k_d = \frac{\alpha_k \cdot \pi + \sin(\alpha_k \cdot \pi)}{4 \cdot \sin\left(\frac{\alpha_k \cdot \pi}{2}\right)} \quad (\text{Г.126})$$

$$k_d = \frac{0,85 \cdot 3,1415 + \sin(0,85 \cdot 3,1415)}{4 \cdot \sin\left(\frac{0,85 \cdot 3,1415}{2}\right)} = 0,8033$$

б) по поперечной оси

$$k_q = \frac{\alpha_k \cdot \pi + 2 \cdot \cos\left(\frac{\alpha_k \cdot \pi}{2}\right)}{3} - \frac{\sin(\alpha_k \cdot \pi)}{4 \cdot \sin\left(\frac{\alpha_k \cdot \pi}{2}\right)} \quad (\text{Г.127})$$

$$k_q = \frac{0,85 \cdot 3,1415 + 2 \cdot \cos\left(\frac{0,85 \cdot 3,1415}{2}\right)}{3} - \frac{\sin(0,85 \cdot 3,1415)}{4 \cdot \sin\left(\frac{0,85 \cdot 3,1415}{2}\right)} = 0,6098$$

3.2.3 Относительное продольное индуктивное сопротивление реакции якоря для ненасыщенной магнитной цепи

$$X_{d_{\text{як}}} = \frac{k_d \cdot F_{\text{якпол}}}{U_\delta} \quad (\text{Г.128})$$

$$X_{d_{\text{як}}} = \frac{0,8033 \cdot 522,67}{426,7} = 0,984$$

3.2.4 Относительное поперечное индуктивное сопротивление реакции якоря:

а) для ненасыщенной магнитной цепи

$$X_{q_{\text{як}}} = \frac{k_q \cdot F_{\text{якпол}}}{U_\delta} \quad (\text{Г.129})$$

$$X_{q_{\text{як}}} = \frac{0,6098 \cdot 522,67}{426,7} = 0,747$$

б) для насыщенной магнитной цепи

$$X_{q_{\text{якНАС}}} = \frac{X_{q_{\text{як}}}}{1 + (k_s - 1) \cdot \frac{k_q}{k_d}} \quad (\text{Г.130})$$

$$X_{q_{\text{якНАС}}} = \frac{0,747}{1 + (1,28 - 1) \cdot \frac{0,6098}{0,8033}} = 0,367$$

3.2.5 Относительные синхронные индуктивные сопротивления якоря:

а) по продольной оси (ненасыщенное)

$$X_d = X_{d_{\text{як}}} + X_{S_{\text{отн}}} \quad (\text{Г.131})$$

$$X_d = 0,984 + 0,111 = 1,095$$

б) по поперечной оси (насыщенное)

$$X_{q_{\text{НАС}}} = X_{q_{\text{як}}} + X_{S_{\text{отн}}} \quad (\text{Г.132})$$

$$X_{q_{\text{НАС}}} = 0,747 + 0,111 = 0,858$$

3.2.6 Тангенс угла (между ЭДС и током)

$$\text{tg}(\psi) = \frac{\sin(\varphi) + X_{q_{\text{НАС}}}}{\cos(\varphi) + R_{\text{якотн}}} \quad (\text{Г.133})$$

$$\operatorname{tg}(\psi) = \frac{0,6 + 0,858}{0,8 + 0,0494} = 1,71$$

3.2.7 Продольная составляющая реакции якоря, А

$$F_{d_{\text{як}}} = F_{\text{ЯКПОЛ}} \cdot k_d \cdot \sin(\psi) \quad (\text{Г.134})$$

$$F_{d_{\text{як}}} = 522,67 \cdot 0,8033 \cdot 1,71 = 717,96$$

3.3 Расчёт магнитной цепи индуктора

3.3.1 Коэффициент рассеяния потока полюса

$$k_{\text{РАС}} = (1,15 \dots 1,3) \quad (\text{Г.135})$$

Выберем $k_{\text{РАС}} = 1,15$

3.3.2 Коэффициент заполнения стали (индуктора)

$$k_{\text{ЗС2}} = 0,90 \text{ если толщина листа стали равна } 0,35 \text{ мм}$$

$$k_{\text{ЗС2}} = 0,95 \text{ если толщина листа стали равна } 0,50 \text{ мм}$$

Выбираем толщину листа стали (индуктора) равную 0,5 мм, при этом $k_{\text{ЗС2}} = 0,95$.

3.3.3 Поток полюса, Вб

$$\Phi_{\text{ПОЛ}} = k_{\text{РАС}} \cdot \Phi_{\delta_{\text{УТ}}} \quad (\text{Г.136})$$

$$\Phi_{\text{ПОЛ}} = 1,15 \cdot 0,00136 = 0,001564$$

3.3.4 Индукция в нейтральном сечении магнита при холостом ходе, Тл

$$B_{0_{\text{МАГН}}} = 0,85 \cdot B_r \quad (\text{Г.137})$$

$$B_{0_{\text{МАГН}}} = 0,85 \cdot 1,15 = 0,9775$$

3.3.5 Напряженность поля в магните при установившемся режиме, А/м

$$H_{k_{\text{МАГН}}} = 0,55 \cdot H_C \quad (\text{Г.138})$$

$$H_{k_{\text{МАГН}}} = 0,55 \cdot 880000 = 484000$$

3.3.6 Коэффициент, учитывающий падение магнитного напряжения в магнитной цепи в долях МДС реакции якоря

$$b_i = (1,1 \dots 1,5) \quad (\text{Г.139})$$

Выберем $b_i = 1,2$

3.3.7 Коэффициент приведения МДС якоря по продольной оси к МДС возбужде-

ния

$$(\text{Г.140})$$

$$k_{ad} = (0.85 \dots 0.86)$$

Выберем $k_{ad} = 0,85$

3.3.8 Коэффициент рассеяния магнита

$$k_{РАСмагн} = (1,05 \dots 1,15) \quad (\text{Г.141})$$

Выберем $k_{РАСмагн} = 1,05$

В качестве индуктора в рассматриваемом случае необходимо использовать постоянные магниты нестандартной формы, как показано на рис. Г.9.

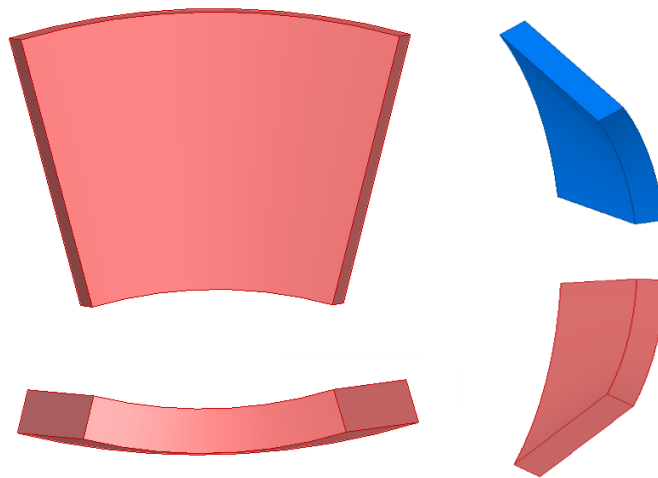


Рисунок Г.9 - Форма постоянных магнитов индуктора

Форма представленных постоянных магнитов является сочетанием сегментной и радиальной форм.

3.3.9 Объём постоянного магнита, м³

$$V_{\text{магн}} = \frac{0,225 \cdot P_{\text{ЭМ}} \cdot b_i \cdot k_{РАСмагн} \cdot k_{ad} \cdot k_{кз}}{B_{0\text{МАГН}} \cdot H_{k\text{МАГН}} \cdot k_{\phi} \cdot f \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{\cos(\varphi)}{k_{кз}}\right) - \frac{\sin(\varphi)}{k_{кз}}}} \quad (\text{Г.142})$$

$$V_{\text{магн}} = \frac{0,225 \cdot 16500 \cdot 1,2 \cdot 1,05 \cdot 0,85 \cdot 2}{0,9775 \cdot 484000 \cdot 1,09 \cdot 400 \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{0,8}{2}\right) - \frac{0,6}{2}}} = 0,0000506$$

3.3.10 Ширина одного магнита, м

$$b_{\text{магн}} = \alpha_p \cdot \tau \quad (\text{Г.143})$$

$$b_{\text{магн}} = 0,865 \cdot 0,0458 = 0,0396$$

3.3.11 Максимально допустимое значение индукции в ярме индуктора, Тл

$$B_{\text{яр инд макс}} \leq 1,2 \quad (\text{Г.144})$$

Выберем $B_{\text{яр инд макс}} = 1,2$

3.3.12 Длина магнита принимается больше активной длины магнитопровода ярма для снижения влияния краевого эффекта (ослабления рабочего магнитного потока у края постоянного магнита), м

$$l_{\text{магн}} = l_{\text{акт ут}} + 0,002 \quad (\text{Г.145})$$

$$l_{\text{магн}} = 0,0412 + 0,002 = 0,0432$$

3.3.13 Высота магнита, м

$$h_{\text{магн}} = \frac{V_{\text{магн}}}{b_{\text{магн}} \cdot l_{\text{магн}}} \quad (\text{Г.146})$$

$$h_{\text{магн}} = \frac{0,0000506}{0,0396 \cdot 0,0432} = 0,0296$$

3.3.14 Высота ярма индуктора, м

$$h_{\text{яр инд}} = \frac{\Phi_{\text{пол}}}{2 \cdot B_{\text{яр инд макс}} \cdot k_{\text{ЗС2}} \cdot l_{\text{магн}}} \quad (\text{Г.147})$$

$$h_{\text{яр инд}} = \frac{0,001564}{2 \cdot 1,2 \cdot 0,95 \cdot 0,0432} = 0,0159$$

3.3.15 Высота индуктора, м

$$h_{\text{инд}} = h_{\text{магн}} + h_{\text{яр инд}} \quad (\text{Г.148})$$

$$h_{\text{инд}} = 0,0296 + 0,0159 = 0,0455$$

3.3.16 Алгоритм расчёта основных размеров индуктора

1). Определение значений требуемых величин:

$$D_0 = 0,1750 \text{ м}, \delta = 0,0006 \text{ м}, l_{\text{магн}} = 0,0432 \text{ м}, h_{\text{инд}} = 0,0455 \text{ м}$$

2). Определение основных размеров индуктора, м (рис. Г.10)

$$D_{1\text{инд}} = D_0 + \delta \cdot \cos(\alpha + 180^\circ) - l_{\text{магн}} \cdot \sin(\alpha + 180^\circ) \quad (\text{Г.149})$$

$$D_{2\text{инд}} = D_0 + \delta \cdot \cos(\alpha + 180^\circ) + l_{\text{магн}} \cdot \sin(\alpha + 180^\circ) \quad (\text{Г.150})$$

$$D_{3\text{инд}} = D_0 + 2 \cdot \left(h_{\text{инд}} + \frac{\delta}{2} \right) \cdot \cos(\alpha + 180^\circ) + l_{\text{магн}} \cdot \sin(\alpha + 180^\circ) \quad (\text{Г.151})$$

$$D_{4\text{инд}} = D_0 + 2 \cdot \left(h_{\text{инд}} + \frac{\delta}{2} \right) \cdot \cos(\alpha + 180^\circ) - l_{\text{магн}} \cdot \sin(\alpha + 180^\circ) \quad (\text{Г.152})$$

$$D_{1\text{инд}} = 0,1750 + 0,0006 \cdot \cos(140^\circ + 180^\circ) - 0,0432 \cdot \sin(140^\circ + 180^\circ) = 0,2051$$

$$D_{2\text{инд}} = 0,1687 + 0,00055 \cdot \cos(140^\circ + 180^\circ) + 0,0466 \cdot \sin(140^\circ + 180^\circ) = 0,1457$$

$$D_{3\text{инд}} = 0,1687 + 2 \cdot \left(0,036 + \frac{0,00055}{2}\right) \cdot \cos(140^\circ + 180^\circ) + 0,0466 \cdot \sin(140^\circ + 180^\circ) = 0,1848$$

$$D_{4\text{инд}} = 0,1687 + 2 \cdot \left(0,036 + \frac{0,00055}{2}\right) \cdot \cos(140^\circ + 180^\circ) - 0,0466 \cdot \sin(140^\circ + 180^\circ) = 0,2442$$

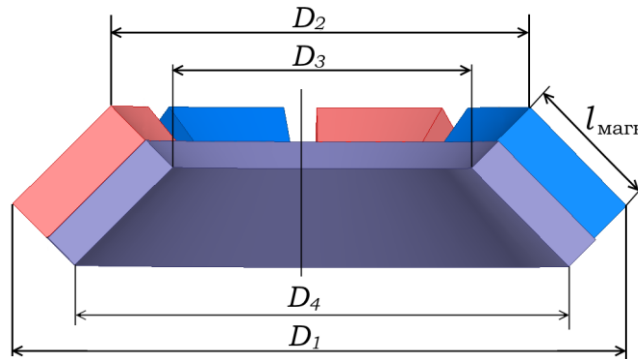


Рисунок Г.10 - К определению размеров магнитопровода индуктора

3.4 Расчёт потоков рассеяния

3.4.1 Максимальное и минимальное расстояния между соседними магнитами, м

$$\Delta_1 = \frac{(1 - \alpha_k) \cdot \pi \cdot (D_0 + \delta \cdot \cos(\frac{\alpha \cdot \pi}{180} + \pi))}{2 \cdot p} \quad (\text{Г.153})$$

$$\Delta_2 = \frac{(1 - \alpha_k) \cdot \pi \cdot (D_0 + (2 \cdot h_{\text{магн}} + \delta) \cdot \cos(\frac{\alpha \cdot \pi}{180} + \pi))}{2 \cdot p} \quad (\text{Г.154})$$

$$\Delta_1 = \frac{(1 - 0,85) \cdot 3,1415 \cdot (0,1750 + 0,0006 \cdot \cos(140^\circ + 180^\circ))}{2 \cdot 6} = 0,00689$$

$$\Delta_2 = \frac{(1 - 0,85) \cdot 3,1415 \cdot (0,1750 + (2 \cdot 0,0296 + 0,0006) \cdot \cos(140^\circ + 180^\circ))}{2 \cdot 6} = 0,00853$$

Если $\Delta_1 < \Delta_2$, то минимальное расстояние между магнитами на среднем диаметре равно $\Delta_{\text{магн_МИН}} = \Delta_1$, минимальное расстояние между магнитами на среднем диаметре

равно $\Delta_{\text{магн_МАКС}} = \Delta_2$, в противном случае наоборот - если $\Delta_1 > \Delta_2$, то $\Delta_{\text{магн_МИН}} = \Delta_2$,

$$\Delta_{\text{магн_МАКС}} = \Delta_1.$$

Так как $\Delta_1 < \Delta_2$, то $\Delta_{\text{магн_МИН}} = \Delta_1 = 0,00664$, $\Delta_{\text{магн_МАКС}} = \Delta_2 = 0,00827$.

3.4.2 Собственная проводимость рассеяния магнита

$$\Lambda_{\text{РАС}} = \left(\frac{5 \cdot l_{\text{магн}} \cdot h_{\text{магн}}}{\varphi_a \cdot \Delta_{\text{магн_МАКС}}} + 1,6 \cdot h_{\text{магн}} \cdot \varphi_b \right) \cdot 10^{-6}$$

$$\Lambda_{\text{РАС}} = \left(\frac{5 \cdot 0,0486 \cdot 0,0272}{0,5367 \cdot 0,00827} + 1,6 \cdot 0,0272 \cdot 10,13 \right) \cdot 10^{-6} = 1,14 \cdot 10^{-6}$$

где φ_a и φ_b определяются из выражений:

$$\varphi_a = \frac{\Delta_{\text{магн_МАКС}}}{\Delta_{\text{магн_МАКС}} - \Delta_{\text{магн_МИН}}} \cdot \left[\frac{1 - \Delta_{\text{магн_МИН}} \cdot \ln\left(\frac{\Delta_{\text{магн_МАКС}}}{\Delta_{\text{магн_МИН}}}\right)}{\Delta_{\text{магн_МАКС}} - \Delta_{\text{магн_МИН}}} \right] \quad (\text{Г.155})$$

$$\varphi_b = \frac{\pi \cdot b_{\text{магн}}}{2 \cdot \Delta_{\text{магн_МАКС}}} + \ln\left(1 + \frac{\pi \cdot b_{\text{магн}}}{2 \cdot \Delta_{\text{магн_МАКС}}}\right) \cdot \left(\frac{\pi \cdot b_{\text{магн}}}{2 \cdot \Delta_{\text{магн_МАКС}}}\right)^2 \cdot \ln\left(1 + \frac{2 \cdot \Delta_{\text{магн_МАКС}}}{\pi \cdot b_{\text{магн}}}\right) \quad (\text{Г.156})$$

$$\varphi_a = \frac{0,00827}{0,00827 - 0,00664} \cdot \left[\frac{1 - 0,00664 \cdot \ln\left(\frac{0,00827}{0,00664}\right)}{0,00827 - 0,00664} \right] = 0,5367$$

$$\varphi_b = \frac{3,1415 \cdot 0,0382}{2 \cdot 0,00827} + \ln\left(1 + \frac{3,1415 \cdot 0,0382}{2 \cdot 0,00827}\right) \cdot \left(\frac{3,1415 \cdot 0,0382}{2 \cdot 0,00827}\right)^2 \cdot \ln\left(1 + \frac{2 \cdot 0,00827}{3,1415 \cdot 0,0382}\right) = 10,13$$

3.4.3 Коэффициент ослабления потока рассеяния

$$k_{\text{осл_рас}} = (0,15 \dots 0,70)$$

$k_{\text{осл_рас}}$ зависит от геометрии взаимного расположения магнитов, расстояния

между магнитами, от размеров магнитов и других параметров

Выбираем $k_{\text{осл_рас}} = 0,7$

3.4.4 Проводимость рассеяния между магнитами

$$\Lambda_{SM} = k_{\text{осл_рас}} \cdot \Lambda_{\text{РАС}} \quad (\text{Г.157})$$

$$\Lambda_{SM} = 0,7 \cdot 1,14 \cdot 10^{-6} = 0,802 \cdot 10^{-6}$$

3.4.5 Поток рассеяния магнита, Вб

$$\Phi_{\text{РАС}} = 0,5 \cdot F_{d_{\text{як}}} \cdot \Lambda_{SM} \quad (\text{Г.158})$$

$$\Phi_{\text{РАС}} = 0,5 \cdot 218,19 \cdot 0,802 \cdot 10^{-6} = 0,0000757$$

3.4.6 Уточнённый коэффициент рассеяния полюса

$$k_{\text{РАС_УТ}} = 1 + \frac{\Phi_{\text{РАС}}}{\Phi_{\delta_{\text{УТ}}}} \quad (\text{Г.159})$$

$$k_{\text{РАС}_{\text{УТ}}} = 1 + \frac{0,0001857}{0,00140} = 1,13$$

3.4.7 Индукция в стыке магнита, Тл

$$B_{\text{МАГН}_{\text{СТ}}} = \frac{\Phi_{\delta_{\text{УТ}}} \cdot k_{\text{РАС}_{\text{УТ}}}}{b_{\text{МАГН}} \cdot l_{\text{МАГН}}} \quad (\text{Г.160})$$

$$B_{\text{МАГН}_{\text{СТ}}} = \frac{0,00140 \cdot 1,13}{0,0382 \cdot 0,0486} = 0,864$$

3.4.8 Падение магнитного потенциала в стыках магнита, А

$$U_{\text{МАГН}} = 1,6 \cdot B_{\text{МАГН}_{\text{СТ}}} \cdot 50 \quad (\text{Г.161})$$

$$U_{\text{МАГН}} = 1,6 \cdot 0,864 \cdot 50 = 69,11$$

3.4.9 Уточненная индукция в ярме индуктора, Тл

$$B_{\text{ЯР}_{\text{ПОЛ}}} = \frac{\Phi_{\text{ПОЛ}}}{2 \cdot l_{\text{МАГН}} \cdot h_{\text{ЯР}_{\text{ИНД}}} \cdot k_{\text{ЗС2}}} \quad (\text{Г.162})$$

$$B_{\text{ЯР}_{\text{ПОЛ}}} = \frac{0,00163}{2 \cdot 0,0486 \cdot 0,00883 \cdot 0,95} = 1,2$$

3.4.10 Напряженность магнитного поля в ярме полюса, А/м

$H_{\text{ЯР}_{\text{ПОЛ}}}$ выбирается по кривой размагничивания для марки стали магнитопровода

якоря в зависимости от значения индукции в ярме полюса $B_{\text{ЯР}_{\text{ПОЛ}}}$

По кривой размагничивания стали Somaloy-1000 (приложение Б) для $B_{\text{ЯР}_{\text{ПОЛ}}} = 1,25$

Тл выбираем $H_{\text{ЯР}_{\text{ПОЛ}}} = 260$ А/м

3.4.11 Длина магнитной силовой линии в ярме полюса, м

$$l_{m\text{ЯР}_{\text{ПОЛ}}} = \frac{\pi \cdot (D_0 - (2 \cdot h_{\text{МАГН}} + h_{\text{ЯР}_{\text{ИНД}}} + \delta)) \cdot \cos(\alpha)}{4 \cdot p} \quad (\text{Г.163})$$

$$l_{m\text{ЯР}_{\text{ПОЛ}}} = \frac{3,1415 \cdot (0,1687 - (2 \cdot 0,0272 + 0,00883 + 0,00055 \cdot \cos(140^\circ)))}{4 \cdot 6} = 0,02847$$

3.4.12 Падение магнитного потенциала в ярме полюса, А

$$U_{\text{ЯР}_{\text{ПОЛ}}} = l_{m\text{ЯР}_{\text{ПОЛ}}} \cdot H_{\text{ЯР}_{\text{ПОЛ}}} \quad (\text{Г.164})$$

$$U_{\text{ЯР}_{\text{ПОЛ}}} = 0,02847 \cdot 260 = 28,47$$

3.4.13 Падение магнитного потенциала в индукторе, А

$$F_{\text{ИНД}} = U_{\text{МАГН}} + U_{\text{ЯР}_{\text{ПОЛ}}} \quad (\text{Г.165})$$

$$F_{\text{ИНД}} = 69,11 + 28,47 = 97,58$$

3.4.14 МДС при холостом ходе и ЭДС E, A

$$F_{\text{ХОЛ_ХОД}} = F_{a_{\text{ЯК}}} + F_{\text{ИНД}} \quad (\text{Г.166})$$

$$F_{\text{ХОЛ_ХОД}} = 277,18 + 97,58 = 374,76$$

3.4.15 МДС при нагрузке, A

$$F_{\text{НАГР}} = F_{\text{ХОЛ_ХОД}} + F_{d_{\text{ЯК}}} \quad (\text{Г.167})$$

$$F_{\text{НАГР}} = 374,76 + 218,19 = 592,95$$

3.4.16 Коэффициент насыщения магнитной цепи при нагрузке

$$k_{\text{НАС_НАГР}} = \frac{F_{\text{ХОЛ_ХОД}}}{U_{\delta}} \quad (\text{Г.168})$$

$$k_{\text{НАС_НАГР}} = \frac{374,76}{264,09} = 1,419$$

3.5 Построение рабочей диаграммы магнита

Магнитная цепь ЭМ с высококоэрцитивными ПМ практически линейна, что позволяет независимо рассматривать магнитное поле, создаваемое ПМ и обмоткой якоря.

Распределение магнитного поля при холостом ходе, т.е. поля, создаваемого постоянным магнитом, определяет ЭДС и мощность ЭМ, характеризует степень использования объёма ПМ, в значительной степени определяет форму кривой выходного напряжения и пульсации выпрямленного напряжения ЭМ в генераторном режиме [89, с. 97-98].

Независимость вектора намагничённости высококоэрцитивных постоянных магнитов от напряжённости внешнего размагничивающего поля позволяет использовать аналитические методы расчёта магнитной цепи и характеристик генератора.

Кривая размагничивания высококоэрцитивного постоянного магнита имеет линейный характер. А зависимость индукции от напряжённости магнитного поля для кривой размагничивания (приложение В) описывается уравнением:

$$B = \left(1 - \frac{H}{H_c}\right) B_r \quad (\text{Г.169})$$

где $H_c = 880000$ А/м – коэрцитивная сила постоянного магнита, $B_r = 1,15$ Тл – остаточная индукция постоянного магнита

Для определения рабочей точки постоянного магнита в осях магнитного потока и МДС строится кривая размагничивания постоянного магнита, на которой точка Φ_r , соответствующая остаточному магнитному потоку, определяется по формуле:

$$\Phi_r = B_r S_M = B_r \cdot b_M \cdot l_M \quad (\text{Г.170})$$

где S_M – поперечное сечение постоянного магнита, B_r – остаточная индукция постоянного магнита, l_M – активная длина постоянного магнита, b_M – ширина магнита.

$$\Phi_r = 1,15 \cdot 0,0382 \cdot 0,0486 = 0,00213$$

Коэрцитивная МДС

$$F_c = 2 \cdot h_{\text{магн}} \cdot H_c \quad (\text{Г.171})$$

$$F_c = 2 \cdot 0,0272 \cdot 880000 = 47872$$

Кривая $\Phi_{\delta 0} = f(F)$ представляет собой характеристику внешней магнитной цепи, которая при отсутствии насыщения (что характерно для ЭМ с высококоэрцитивными магнитами) изображается в виде прямой линии. При насыщении магнитопровода зависимость $\Phi_{\delta 0} = f(F)$ становится нелинейной (пунктирная линия на рис. Г.11). При синусоидальном характере изменения магнитного поля в зазоре:

$$\Phi_{\delta 0} = \frac{D_0}{p} L_M B_{M0} k_z \quad (\text{Г.172})$$

$$F = \frac{2k_z k_F B_{M0} \delta}{\mu_0} \quad (\text{Г.173})$$

Кривая $\Phi_S = f(F)$ представляет собой характеристику потока рассеяния постоянного магнита и определяется по формуле:

$$\Phi_S = G_S F \quad (\text{Г.174})$$

где G_S – проводимость потока рассеяния.

Как видно из диаграммы магнита (рис. Г.11), магнитный поток Φ_M , создаваемый магнитом, складывается из потока рассеяния Φ_S и рабочего потока $\Phi_{\delta 0}$, проходящего через воздушный зазор.

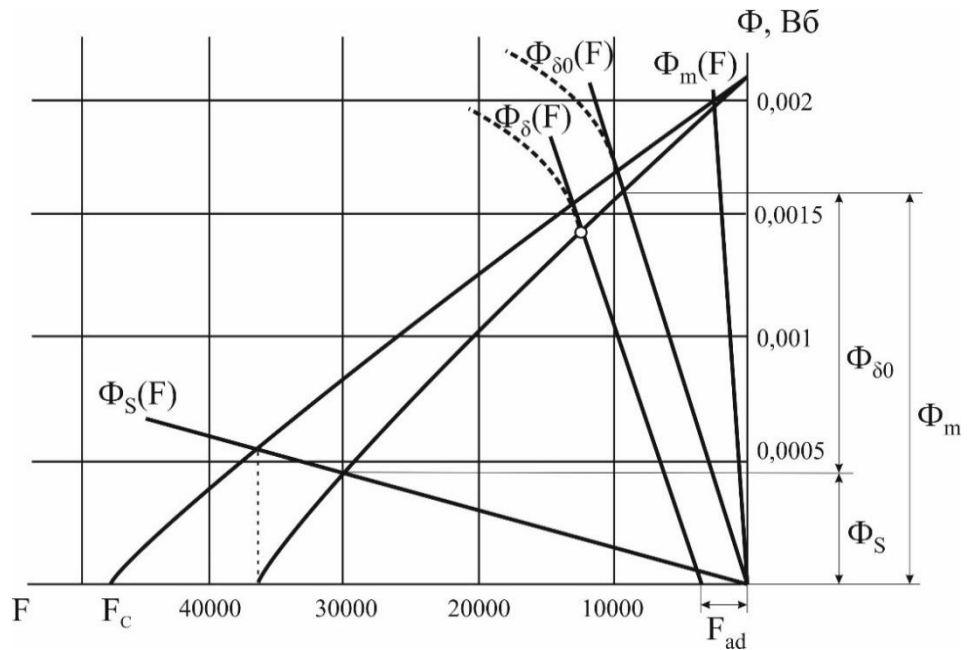


Рисунок Г.11 - Рабочая диаграмма высококоэрцитивного постоянного магнита

Из рабочей диаграммы магнита определяется функция ЭДС от потока продольной реакции якоря $E=f(F_d)$ (рис. Г.12). Для каждого значения потока Φ на характеристике магнита определяем величину ЭДС и для каждого значения МДС определяем значение потока по продольной оси F_d . По полученным точкам строится кривая $E=f(F_d)$.

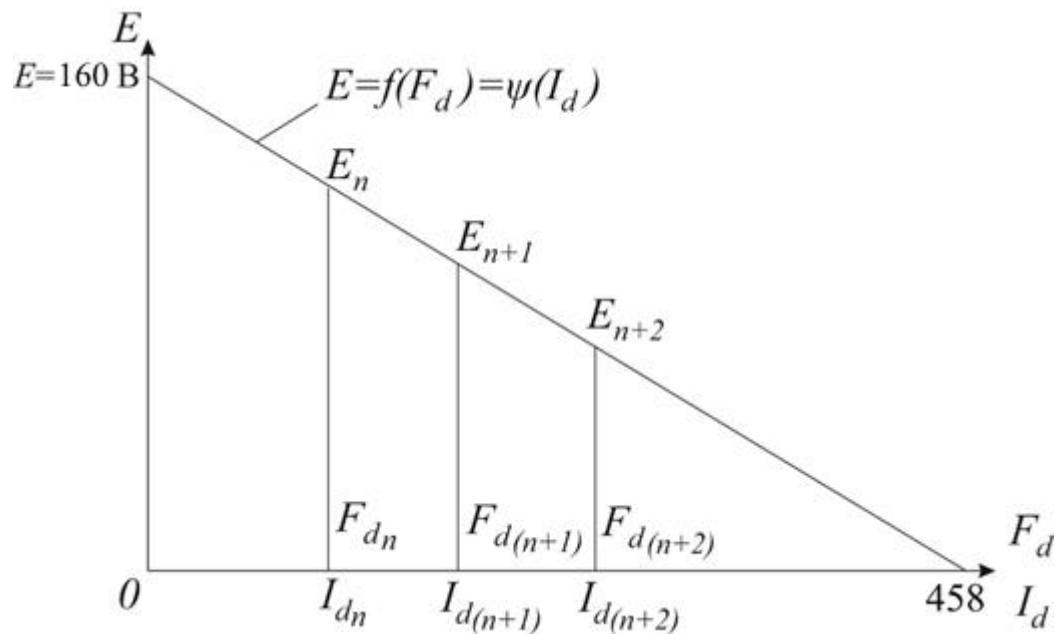


Рисунок Г.12 - Зависимость $E = \psi(I_d)$ для расчета характеристик генератора

4. Расчёт массы машины

4.1 Площадь поперечного сечения паза, m^2

$$Q_{II} = (h_{II} - h_{YC}) \cdot b_{IIYT} \quad (\text{Г.175})$$

$$Q_{II} = (0,00713 - 0,0007) \cdot 0,00554 = 0,00003562$$

4.2 Масса зубцов якоря, кг (формула расчёта $m_{Z_{ЯК}}$ выведена автором)

$$m_{Z_{ЯК}} = (\pi \cdot (D_0 + (h_{II} + \delta) \cdot \cos(\alpha)) \cdot h_{II} - Q_{II} \cdot Z) \cdot l_{акт_{YT}} \cdot k_{3С1} \cdot \rho_{СТ} \quad (\text{Г.176})$$

где $\rho_{СТ} = 7800 \text{ кг/м}^3$ - плотность стали

$$m_{Z_{ЯК}} = (3,1415 \cdot (0,1687 + (0,00713 + 0,00055) \cdot \cos(135^0)) \cdot 0,00713 - 0,0003562 \cdot 45) \cdot 0,0446 \cdot 0,95 \cdot 7800 = 0,6927$$

4.3 Масса ярма якоря, кг (формула расчёта $m_{ЯР_{ЯК}}$ выведена автором)

$$m_{ЯР_{ЯК}} = \pi(D_0 + (2 \cdot h_{II} + h_{ЯР_{ЯК}} + \delta) \cdot \cos(\alpha)) \cdot h_{ЯР_{ЯК}} \cdot l_{акт_{YT}} \cdot k_{3С2} \cdot \rho_{СТ} \quad (\text{Г.177})$$

$$m_{ЯР_{ЯК}} = 3,1415 \cdot (0,1687 + (2 \cdot 0,00713 + 0,0081 + 0,00055) \cdot \cos(140^0)) \cdot 0,0081 \cdot 0,0446 \cdot 0,95 \cdot 7800 = 1,269$$

4.4 Масса магнитов, кг

$$m_{МАГН} = \pi \rho_{МАГН} l_{МАГН} h_{МАГН} a_p (D_0 - (h_{МАГН} + \delta) \cdot \cos(\alpha)) \quad (\text{Г.178})$$

где $\rho_{МАГН} = 7800 \text{ кг/м}^3$ - плотность магнита

$$m_{МАГН} = 3,14 \cdot 7800 \cdot 0,0486 \cdot 0,0272 \cdot 0,85(0,1687 - (0,0272 + 0,00055) \cdot \cos(140^0)) = 4,735$$

4.5 Масса ярма индуктора, кг

$$m_{ЯР_{ИНД}} = \pi(D_0 + (2 \cdot h_{МАГН} + h_{ЯР_{ИНД}} + \delta) \cdot \cos(\alpha)) \cdot h_{ЯР_{ИНД}} \cdot l_{МАГН} \cdot k_{3С2} \cdot \rho_{СТ} \quad (\text{Г.179})$$

$$m_{ЯР_{ИНД}} = 3,1415 \cdot (0,1687 + (2 \cdot 0,0272 + 0,00883 + 0,00055) \cdot \cos(140^0)) \cdot 0,00883 \cdot 0,0486 \cdot 0,95 \cdot 7800 = 1,1756$$

4.6 Масса обмотки якоря, кг

$$m_{обм_{ЯК}} = w_{ФУТ} \cdot m \cdot q_{ЯК_{эл.проеУТ}} \cdot l_{БСР} \cdot 8900 \cdot 1,05 \quad (\text{Г.180})$$

$$m_{обм_{ЯК}} = 60 \cdot 3 \cdot 2,37 \cdot 10^{-6} \cdot 0,1993 \cdot 8900 \cdot 1,05 = 0,7958$$

4.7 Масса активных материалов, кг

$$m_{АКТ_{МАТ}} = m_{Z_{ЯК}} + m_{ЯР_{ЯК}} + m_{МАГН} + m_{ЯР_{ИНД}} + m_{обм_{ЯК}} \quad (\text{Г.181})$$

$$m_{АКТ_{МАТ}} = 0,6637 + 1,2455 + 4,7348 + 1,1756 + 0,7958 = 8,6154$$

4.8 Конструктивный коэффициент (коэффициент привеса)

$k_M = (1,2 \dots 1,5)$ зависит от мощности ЭМ, её типа, конструктивного исполнения,

угла наклона воздушного зазора к оси вращения ротора

Выберем $k_M = 1,25$

4.9 Полная масса машины, кг

$$m_{\text{ПОЛН}} = m_{\text{АКТ_МАТ}} \cdot k_{\text{М}} \quad (\text{Г.182})$$

$$m_{\text{ПОЛН}} = 8,6154 \cdot 1,25 = 10,77$$

5. Расчёт потерь и КПД - начало

5.1 Потери в обмотке якоря, Вт

$$P_{\text{ОБМ_ЯК}} = I_{\text{НОМ}}^2 \cdot m \cdot R_{\text{ЯК}t_{\text{РАБ}}} \quad (\text{Г.183})$$

$$P_{\text{ОБМ_ЯК}} = 41,67^2 \cdot 3 \cdot 0,1219 = 634,90$$

5.2 Удельные потери в стали, Вт/кг

Значение зависит от марки стали, например, для стали Somaloy-1000, составляет

$$P_{\text{уд_СТ}} = 40 \text{ Вт/кг}$$

5.3 Коэффициент увеличения потерь в зубцах якоря после механической обработки

$$k_{t_z} = 2$$

5.4 Коэффициент увеличения потерь в ярме якоря после механической обработки

$$k_{t_{\text{ЯР}}} = 1,4$$

5.5 Потери в стали якоря, Вт

$$P_{\text{СТ_ЯК}} = P_{\text{уд_СТ}} \cdot \left(\frac{f}{400}\right)^{1,4} \cdot \left[\left(\frac{B_{Z_1}}{1,8}\right)^2 \cdot m_{Z_{\text{ЯК}}} \cdot k_{t_z} + \left(\frac{B_{\text{ЯР_ЯК}}}{1,8}\right)^2 \cdot m_{\text{ЯР_ЯК}} \cdot k_{t_{\text{ЯР}}} \right] \quad (\text{Г.184})$$

$$P_{\text{СТ_ЯК}} = 40 \cdot \left(\frac{400}{400}\right)^{1,4} \cdot \left[\left(\frac{1,67}{1,8}\right)^2 \cdot 0,6637 \cdot 2 + \left(\frac{2,07}{1,8}\right)^2 \cdot 1,2455 \cdot 1,4 \right] = 150,17$$

5.6 Коэффициент механических потерь

$$k_{P_{\text{МЕХ}}} = (0,02 \dots 0,05) \quad (\text{Г.185})$$

Выберем $k_{P_{\text{МЕХ}}} = 0,03$

5.7 Механические потери (трения в подшипниках) и вентиляционные, Вт

$$P_{\text{МЕХ}} = k_{P_{\text{МЕХ}}} \cdot P_{\text{НОМ}} \cdot \cos(\varphi) \quad (\text{Г.186})$$

$$P_{\text{МЕХ}} = 0,03 \cdot 15000 \cdot 0,8 = 378,0$$

5.8 Коэффициент добавочных потерь

$$k_{P_{\text{ДОБ}}} = (0,01 \dots 0,02) \quad (\text{Г.187})$$

Выберем $k_{P_{\text{доб}}} = 0,015$

5.9 Добавочные потери, Вт

$$P_{\text{доб}} = k_{P_{\text{доб}}} \cdot P_{\text{ном}} \cdot \cos(\varphi) \quad (\text{Г.188})$$

$$P_{\text{доб}} = 0,015 \cdot 15000 \cdot 0,8 = 126,0$$

5.10 Сумма потерь, Вт

$$P_{\text{ПОЛН_ПОТ}} = P_{\text{ОБМ_ЯК}} + P_{\text{СТ_ЯК}} + P_{\text{МЕХ}} + P_{\text{ДОБ}} \quad (\text{Г.189})$$

$$P_{\text{ПОЛН_ПОТ}} = 634,90 + 150,11 + 378,0 + 126,0 = 1292,07$$

5.11 Коэффициент полезного действия

$$\eta = \frac{P_{\text{ном}} \cdot \cos(\varphi)}{P_{\text{ном}} \cdot \cos(\varphi) + P_{\text{ПОЛН_ПОТ}}} \quad (\text{Г.190})$$

$$\eta = \frac{15000 \cdot 0,8}{15000 \cdot 0,8 + 1292,07} = 0,90$$

Построение внешней характеристики генератора

Насыщение магнитной цепи электрических машин с высококоэрцитивными постоянными магнитами незначительно, поэтому внешняя характеристика описывается системой уравнений:

$$\begin{cases} E_{\text{Ф0}} = U_{\text{ф.н}} \cos(\psi - \varphi_{\text{н}}) + I_{\text{ф.н}} x_d \sin(\psi) + I_{\text{ф.н}} R_{\text{ф}} \cos(\psi) \\ 0 = U_{\text{ф.н}} \sin(\psi - \varphi_{\text{н}}) + I_{\text{ф.н}} x_q \cos(\psi) + I_{\text{ф.н}} R_{\text{ф}} \sin(\psi) \end{cases} \quad (\text{Г.191})$$

где x_d, x_q – полные индуктивные сопротивления по продольной и поперечной осям, $E_{\text{Ф0}}$ – ЭДС холостого хода, $I_{\text{ф.н}}, U_{\text{ф.н}}$ – фазные ток и напряжение на нагрузке, $R_{\text{ф}}$ – активное сопротивление обмотки якоря, $\varphi_{\text{н}}$ – фазовый угол между током и напряжением на нагрузке.

Системе уравнений (Г.191) соответствует векторная диаграмма напряжений, представленная на рис. Г.13.

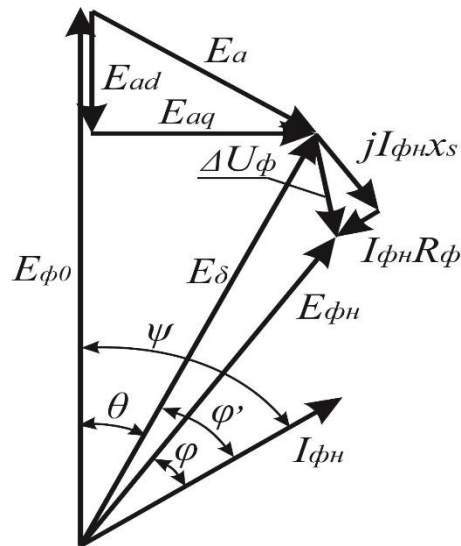


Рисунок Г.13 - Векторная диаграмма напряжений генератора с ПМ

На рис. Г.13 обозначены:

$E_{\phi 0}$ – ЭДС холостого хода,

$E_{ad} = I_{\phi n} x_{ad} \sin(\psi)$ – ЭДС реакции якоря по продольной оси

$E_{aq} = I_{\phi n} x_{aq} \sin(\psi)$ – ЭДС реакции якоря по поперечной оси

E_{δ} – внутренняя ЭДС (ЭДС в воздушном зазоре)

$j I_{\phi n} x_s$ – падение ЭДС на индуктивном сопротивлении рассеяния

$I_{\phi n} R_{\phi}$ – падение напряжения на активном сопротивлении обмотки якоря

$\Delta U_{\phi} = I_{\phi n} \sqrt{x_s^2 + R_{\phi}^2}$ – падение напряжения на внутреннем сопротивлении нагрузки

$E_{\phi n}$ – напряжение на нагрузке, которое соответствует ЭДС, создаваемой магнитным полем машины при нагрузке в обмотке якоря.

Исходя из расчётных данных построены внешние характеристики генератора с постоянными магнитами (рис. Г.14) и частотная характеристика (рис. Г.15).

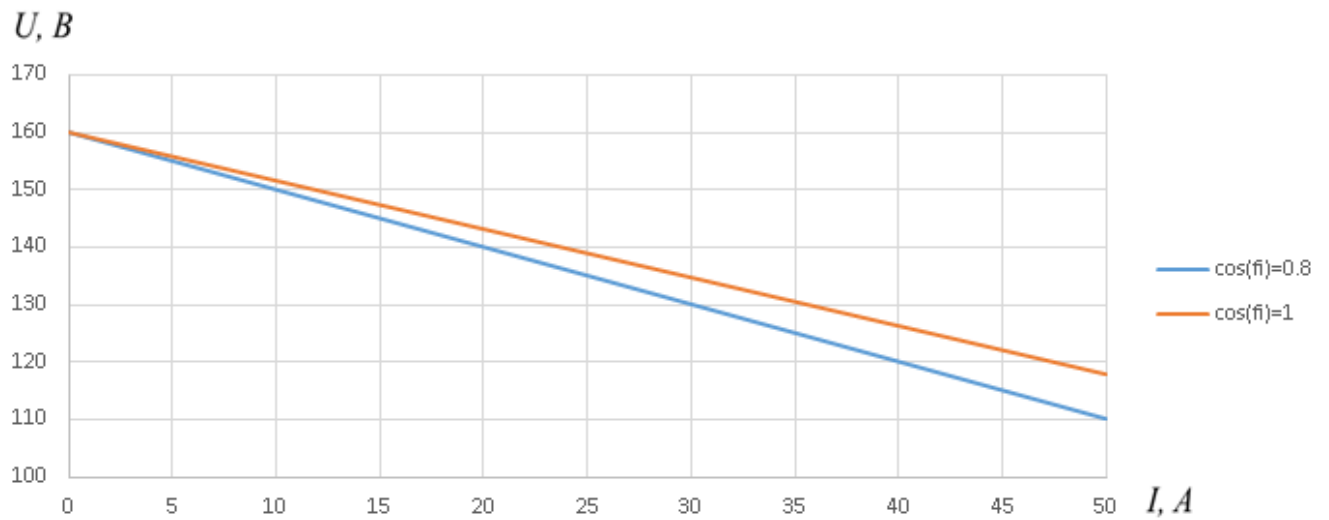


Рисунок Г.14 - Внешние характеристики конического генератора с ПМ

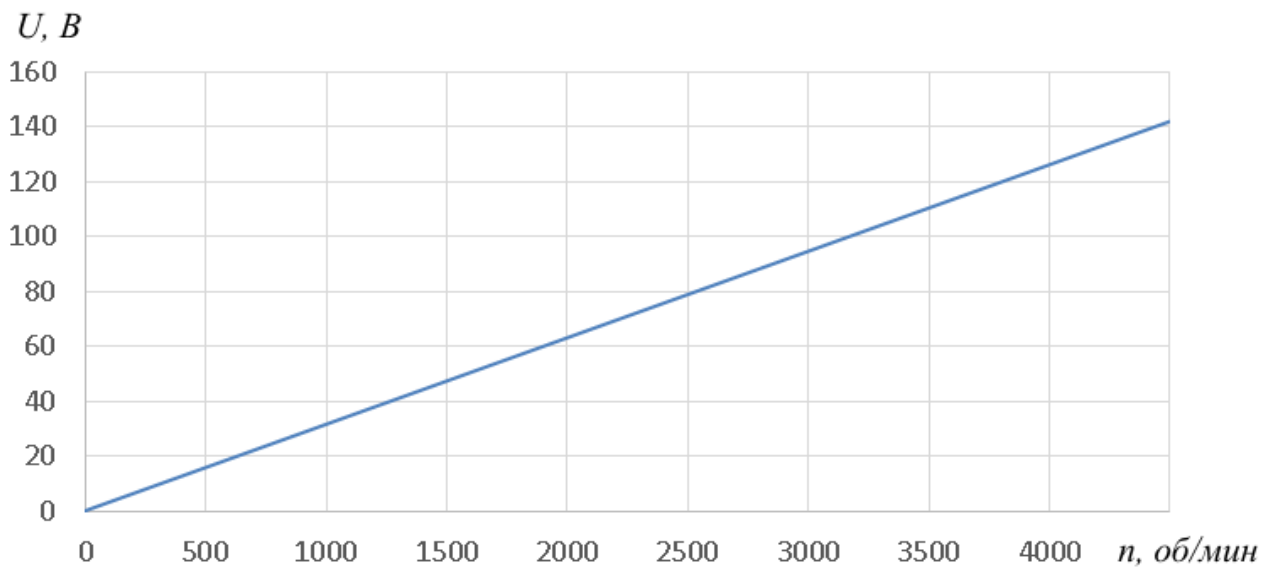


Рисунок Г.15 - Частотная характеристика конического генератора с ПМ

Тепловой и вентиляционный расчёт

Для теплового расчёта статора генератора используется метод эквивалентных схем замещения. На рис. Г.16 представлена упрощенная тепловая схема замещения якоря при охлаждении продувом.

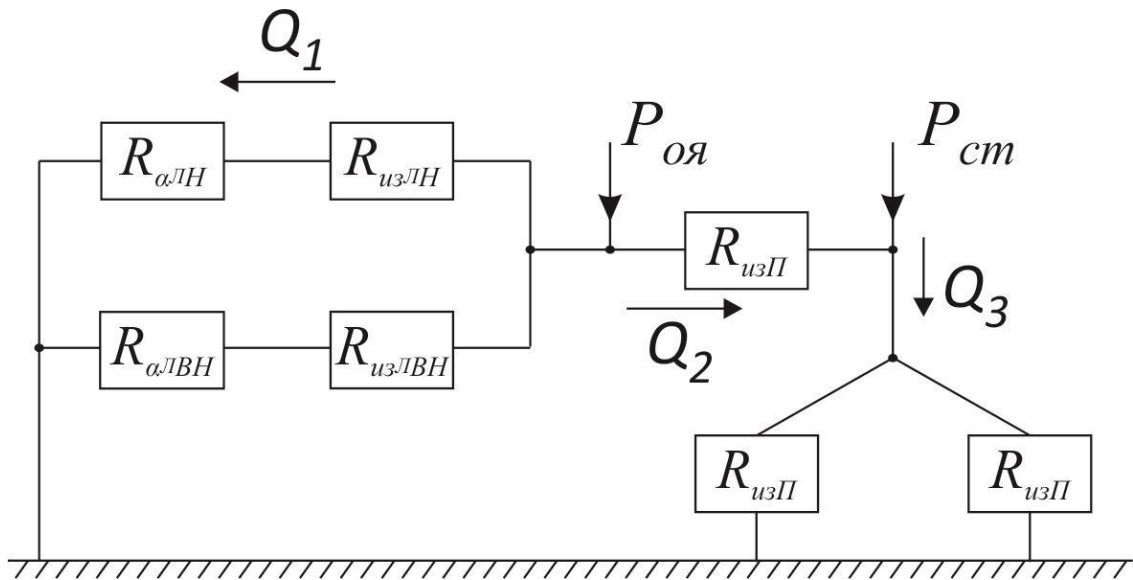


Рисунок Г.16 - Тепловая схема замещения якоря

В тепловой схеме не учитываются: перепад температуры по стали, перепад температуры по длине проводника, теплоотдача с торцов обмотки якоря, теплоотдача с поверхности корпуса.

Источниками тепловой энергии в якоря являются потери в его обмотке (в лобовой и пазовой частях обмотки) и потери в стали (в зубцах и ярме якоря). Пути тепловых потоков представлены на рис. Г.17.

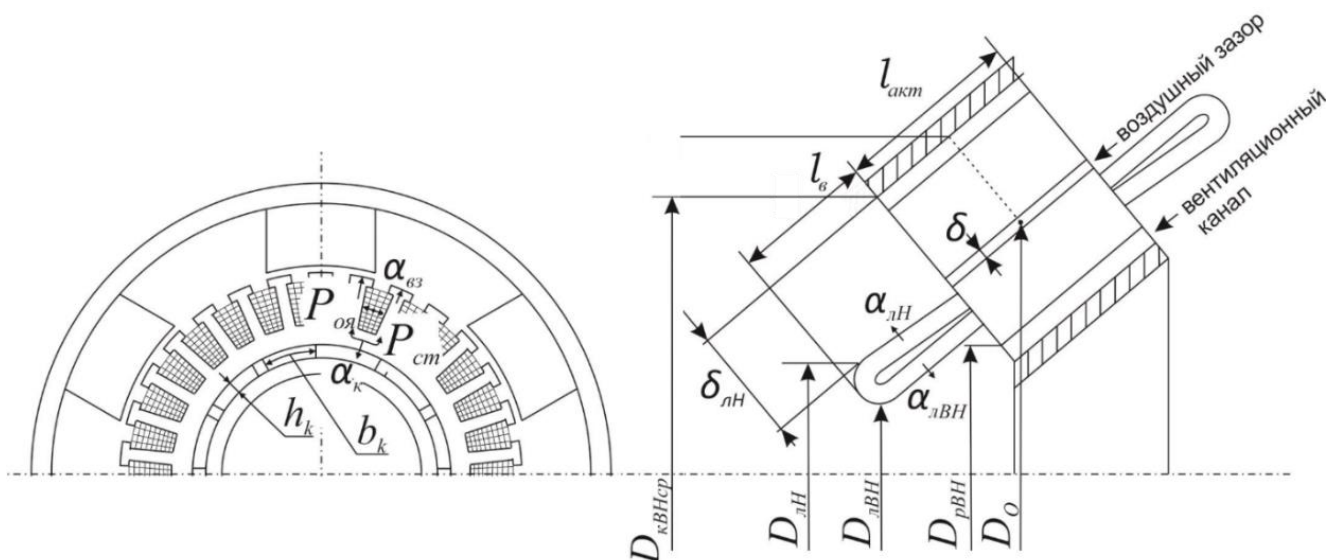


Рисунок Г.17 - Пути тепловых потоков

В тепловой схеме приняты следующие сокращения:

$R_{изП}$ – сопротивление пазовой изоляции,

$R_{из.лН}, R_{из.лВН}$ – сопротивления изоляции лобовых частей обмотки якоря с наружной и внутренней поверхностей соответственно,

$R_{авз}$ – сопротивление, обусловленное теплоотдачей с поверхности воздушного зазора,

R_k – сопротивление теплоотдачи с поверхности канала,

$R_{олН}, R_{олВН}$ – сопротивления теплоотдачи с наружной и внутренней поверхностей лобовой части соответственно.

Тепловой расчёт

6.1 Расчёт тепловых сопротивлений

6.1.1 Эквивалентная толщина изоляции проводника, м

$$\delta_{и.пр.э} = \frac{(\delta_{и.а} + \delta_{и.б})}{2} \quad (Г.192)$$

$$\delta_{и.пр.э} = \frac{(0,00015 + 0,00015)}{2} = 0,00015$$

где $\delta_{и.а}$ и $\delta_{и.б}$ - односторонняя толщина изоляции по ширине и высоте проводника соответственно

6.1.2 Сопротивление изоляции проводов в пазу, °С/Вт

$$R_{и.пр} = \frac{\delta_{и.пр.э}}{Z \cdot \Pi \cdot l \cdot \lambda_{и.пр}} \quad (Г.193)$$

$$R_{и.пр} = \frac{0,00015}{45 \cdot 0,01976 \cdot 0,0446 \cdot 0,13} = 0,029$$

где $\Pi = 2 \cdot h_{\Pi} + b_{\Pi_{ут}} = 2 \cdot 0,00713 + 0,0055 = 0,01976$ - периметр паза, м

$\lambda_{и.пр}$ - коэффициент теплопроводности изоляции провода (по таблице Г.2)

Таблица Г.2 - Коэффициенты теплопроводности изоляции паза и катушек возбуждения

Марка провода	$\lambda_{и.пр}, \text{Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{С})$	Допустимая температура обмотки якоря, °С
ПЭТ-155	0,13	180
ПНЭТ имид, ПНЭТП	0,13	250
ПСДКТ	0,157	250-350

6.1.3 Сопротивление пазовой изоляции, °C/Вт

$$R_{и.п} = \frac{1}{Z \cdot \Pi \cdot l} \sum_i \frac{\delta_{и.п_i}}{\lambda_{и.п_i}} \quad (\text{Г.194})$$

где $\delta_{и.п_i}$ - односторонняя толщина изоляции паза, м; $\lambda_{и.п_i}$ - коэффициент теплопроводности изоляции паза, Вт/(м·°C); i – число слоёв изоляции паза

$$R_{и.п} = \frac{1}{45 \cdot 0,01976 \cdot 0,0446} \sum_2 \frac{0,0001}{0,4} = 0,0126$$

6.1.4 Сопротивление воздушной прослойки, °C/Вт

$$R_B = \frac{\delta_B}{2 \cdot Z \cdot \Pi \cdot l \cdot \lambda_B} \quad (\text{Г.195})$$

$$R_B = \frac{0,00026}{2 \cdot 45 \cdot 0,01976 \cdot 0,0446 \cdot 0,026} = 0,126$$

где $\delta_B = b_{\text{Пут}} - 2 \cdot \sum \delta_{и.п} - a_{из} \cdot N_b = 0,0055 - 2 \cdot \sum_2 0,0001 - 0,00121 \cdot 4 = 0,00026$,

λ_B - коэффициент теплопроводности воздуха (по таблице Г.3);

Таблица Г.3 - Основные физические свойства охлаждающей среды (воздух)

$t, ^\circ\text{C}$	$\gamma, \text{кг/м}^3$	$C_p,$ Дж/(кг·°C)	$\lambda_B,$ Вт/(м·°C)	$\nu \cdot 10^{-6},$ м ² /с	Pr
0	1,29	1010	0,0244	13,28	0,722
10	1,25	1010	0,0251	14,16	0,722
20	1,205	1000	0,026	15,06	0,722
30	1,165	1000	0,0268	16,00	0,722
40	1,13	1000	0,0276	16,95	0,722
50	1,093	1000	0,0283	17,95	0,722
60	1,06	1000	0,029	18,97	0,722
70	1,03	1000	0,0297	20,02	0,722
80	1,0	1000	0,0305	21,09	0,722
90	0,97	1000	0,0313	22,10	0,722
100	0,946	1000	0,0321	28,13	0,722
120	0,898	1000	0,0334	25,45	0,722

6.1.5 Суммарное сопротивление изоляции проводов и пазовой изоляции, °С/Вт

$$R_{\text{изП}} = R_{\text{и.пр}} + R_{\text{и.П}} + R_{\text{В}} \quad (\text{Г.196})$$

$$R_{\text{изП}} = 0,029 + 0,0126 + 0,126 = 0,1676$$

6.1.6 Поверхности теплоотдачи лобовых частей обмотки, м²

Наружная:

$$F_{\text{лН}} = \pi \cdot D_{\text{лН}} \cdot l_{\text{В}} \quad (\text{Г.197})$$

$$F_{\text{лН}} = 3,1415 \cdot 0,121 \cdot 0,025 = 0,0095$$

Внутренняя:

$$F_{\text{лВН}} = \pi \cdot D_{\text{лВН}} \cdot l_{\text{В}} \quad (\text{Г.198})$$

$$F_{\text{лВН}} = 3,1415 \cdot 0,114 \cdot 0,025 = 0,0089$$

где $l_{\text{В}}$ - длина вылета лобовой части, м

6.1.7 Сопротивление изоляции лобовых частей обмотки, °С/Вт:

а). с наружной поверхности

$$R_{\text{из.лН}} = \frac{1}{2 \cdot F_{\text{лН}}} \left(\frac{\sum \delta_{\text{и.л}_i}}{\lambda_{\text{и.л}}} + \frac{\sum \delta_{\text{и.пр}_э}}{\lambda_{\text{и.пр}}} \right) \quad (\text{Г.199})$$

$$R_{\text{из.лН}} = \frac{1}{2 \cdot 0,0095} \left(\frac{\sum 0,0001}{0,9} + \frac{\sum 0,00015}{0,13} \right) = 0,133$$

б). с внутренней поверхности

$$R_{\text{из.лВН}} = \frac{1}{2 \cdot F_{\text{лВН}}} \left(\frac{\sum \delta_{\text{и.л}_i}}{\lambda_{\text{и.л}}} + \frac{\sum \delta_{\text{и.пр}_э}}{\lambda_{\text{и.пр}}} \right) \quad (\text{Г.200})$$

$$R_{\text{из.лВН}} = \frac{1}{2 \cdot 0,0089} \left(\frac{\sum 0,0001}{0,9} + \frac{\sum 0,00015}{0,13} \right) = 0,142$$

где $\sum \delta_{\text{и.л}}$ и $\sum \delta_{\text{и.пр}_э}$ - суммарная односторонняя толщина изоляции лобовой части и проводников, $\lambda_{\text{и.л}}$ - коэффициент теплопроводности изоляции лобовой части обмотки якоря (по таблице Г.4).

Таблица Г.4 - Коэффициенты теплопроводности изоляции паза и обмотки якоря

Материал	$\lambda_{ип}, \lambda_{ил}$ Вт/(м·°С)	$\delta_{ип}$, м	Примечание
Слюда	0,465 – 0,58		
Бакелитовый лак	0,292		Пропитка обмотки якоря
Эпоксидный компаунд	0,64 – 0,68		
Стеклотекстолит	0,45 – 0,46	$(0,5 \dots 1) \cdot 10^{-3}$	Пазовый клин
Стеклолакоткань	0,8 – 1,0	$0,15 \cdot 10^{-3}$	Изоляция паза
Фторопласт	0,24 – 0,26	$0,04 \cdot 10^{-3}$	Изоляция паза
Стекломиколента	0,53	$0,2 \cdot 10^{-3}$	Изоляция паза
Стеглослюденит	0,37 – 0,53	$0,1 \cdot 10^{-3}$	Изоляция паза
Стеклолакоткань	0,23	$0,15 \cdot 10^{-3}$	Изоляция паза
Кремнийорганический лак	0,23		Пропитка лобовых частей обмотки якоря
Полиимидная пленка	0,29	$0,04 \cdot 10^{-3}$	Изоляция паза
Стеглолента	0,9	$0,1 \cdot 10^{-3}$	Изоляция лобовых частей обмотки якоря

Вентиляционный расчёт

6.1.8 Суммарный массовый расход охлаждающей среды через статор, кг/с

$$G = G_{уд} \cdot P_{стат} \quad (\text{Г.201})$$

$$G = 0,05 \cdot 10^{-3} \cdot 759,06 = 0,038$$

где $G_{уд} = (0,033 \div 0,060) \cdot 10^{-3}$ кг/(с·Вт) – удельный массовый расход воздуха

$P_{стат} \approx P_{оя} + P_{ст} = 124,16 + 634,9 = 759,06$ - поверхностные потери в статоре, Вт

6.1.9 Плотность охлаждающей среды, кг/м³

$$\gamma = \gamma_0 \frac{T_0}{T_2} \frac{P_2}{P_0} \quad (\text{Г.202})$$

$$\gamma = 0,465 \frac{405}{333} = 0,565$$

где $\gamma_0 \frac{T_0}{P_0} = 1,205 \cdot \frac{273 + 20}{760} = 0,465$; P_2 – давление окружающего воздуха, мм.рт.ст. (по

таблице Г.5); $T_2 = T_{ср} = \frac{T_{нач} + T_{кон}}{2} = 333$ - средняя температура охлаждающей среды, К;

$T_{\text{нач}} = 273 + (50 \dots 80) = 323$ - начальная температура охлаждающей среды, К;

$\Delta t = \frac{1}{C_p \cdot G_{\text{уд}}} = \frac{1}{1,005 \cdot 0,05} = 20$ - подогрев воздуха, °С; C_p - удельная теплоёмкость

охлаждающей среды; $T_{\text{кон}} = T_{\text{нач}} + \Delta t = 323 + 20 = 343$ - конечная температура охлаждающей среды, К

Таблица Г.5 - Зависимость давления окружающего воздуха от высоты

H, км	0	2	5	10
P, мм. рт. ст.	760	600	405	200

6.1.10 Суммарный объёмный расход охлаждающей среды через статор, м³/с

$$\vartheta = \frac{G}{\gamma} \quad (\text{Г.203})$$

$$\vartheta = \frac{0,038}{0,565} = 0,067$$

6.2 Аэродинамические сопротивления

6.2.1 Канал над статором:

6.2.1.1 Сопротивление трения канала

$$Z_{\text{ТРк}} = \frac{\lambda_T l_k \gamma}{d_{\text{эк}} 2g Q_K^2} \quad (\text{Г.204})$$

$$Z_{\text{ТРк}} = \frac{0,06 \cdot 0,0446 \cdot 0,218}{0,0032 \cdot 2 \cdot 9,8 \cdot 0,000096^2} = 4,6 \cdot 10^6$$

где $l_k = l$ - длина канала, м; $Q_K = N_K h_K b_K = 6 \cdot 0,002 \cdot 0,008 = 0,0001$ - сечение каналов, м²;

$d_{\text{эк}} = \frac{2 \cdot h_K b_K}{(h_K + b_K)} = \frac{2 \cdot 0,002 \cdot 0,008}{0,002 + 0,008} = 0,0032$ - эквивалентный диаметр канала, м; N_K - число

каналов; $\lambda_T = 0,06$ - коэффициент трения о воздух (таблица Г.6); $g = 9,81$ м/с².

6.2.1.2 Сопротивление изменения сечения при входе и выходе из канала над статором

$$Z_{\text{ВХк}} = \frac{\xi_1 \gamma}{2g Q_{K \min}^2} \quad (\text{Г.205})$$

$$Z_{\text{ВЫХ}_K} = \frac{\xi_2 \gamma}{2gQ_{K\min}^2} \quad (\text{Г.206})$$

где Q_{\min} – минимальное сечение из Q_K и $Q_{\text{ЛН}}$,

$$Q_{\text{ЛН}} = 0,785(D_{\text{КВН}}^2 - D_{\text{ЛН}}^2) = 0,785 \cdot (0,1662^2 - 0,121^2) = 0,01 \text{ - сечение канала над лобовыми ча-}$$

стями обмотки якоря, м; ξ_1 и ξ_2 определяются по рисунку Г.18 для $\frac{Q_{\min}}{Q_{\max}}$.

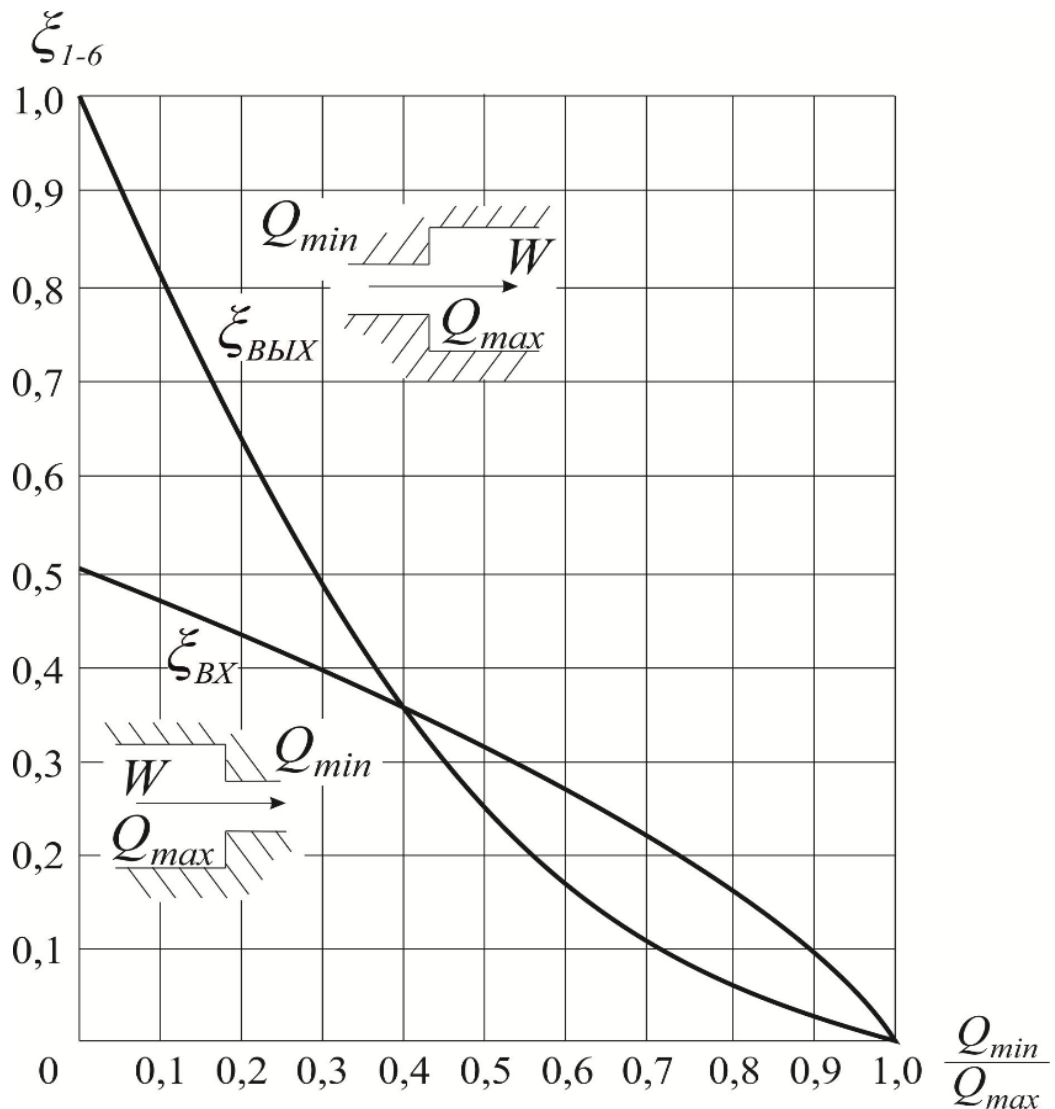


Рисунок Г.18 - Коэффициенты сопротивления изменения сечения

Для $\frac{Q_{\min}}{Q_{\max}} = 0,046$ определяем по рисунку 4.19: $\xi_1 = 0,98$, $\xi_2 = 0,50$

$$Z_{\text{ВХ}_K} = \frac{0,98 \cdot 0,565}{2 \cdot 9,81 \cdot 9,2 \cdot 10^{-9}} = 2,85 \cdot 10^6$$

$$Z_{\text{ВЫХ}_K} = \frac{0,50 \cdot 0,565}{2 \cdot 9,81 \cdot 9,2 \cdot 10^{-9}} = 1,5 \cdot 10^6$$

Таблица Г.6 - Коэффициент трения воздушного потока

Тип канала	λ_T
Воздушный зазор	0,03
Канал с гладкой поверхностью	0,0247
Канал с шихтованной поверхностью	0,0955
Квадратный канал с одной шихтованной поверхностью	0,0433
Удлиненный канал с одной шихтованной поверхностью	0,06

6.2.2 Канал над лобовыми частями обмотки якоря:

6.2.2.1 Сопротивление трения канала

$$Z_{\text{ТРЛН}} = \frac{\lambda_T l_B \gamma}{d_{\text{ЭЛН}} 2gQ_{\text{ЛН}}^2} \quad (\text{Г.207})$$

где l_B - вылет лобовой части, м; $d_{\text{ЭЛН}} = D_{\text{КВН}} - D_{\text{ЛН}} = 0,166 - 0,121 = 0,045$ - эквивалентный диаметр канала над лобовой частью

$$Z_{\text{ТРЛН}} = \frac{0,06 \cdot 0,025 \cdot 0,565}{0,045 \cdot 2 \cdot 9,81 \cdot 0,01^2} = 9,6$$

6.2.2.2 Сопротивление изменения сечения при входе и выходе из канала над лобовой частью обмотки якоря

$$Z_{\text{ВХ}_Л} = \frac{\xi_3 \gamma}{2gQ_{\text{ЛН}}^2} \quad (\text{Г.208})$$

$$Z_{\text{ВЫХ}_Л} = \frac{\xi_4 \gamma}{2gQ_{\text{ЛН}}^2} \quad (\text{Г.209})$$

где ξ_3 и ξ_4 определяются по рисунку Г.18 для $\frac{Q_{\text{ЛН}}}{Q_1}$;

$Q_1 = 0,785(D_{\text{КВН}}^2 - D_{\text{ЛН}}^2) = 0,785(0,166^2 - 0,114^2) = 0,0087$ - сечение канала перед лобовыми частями обмотки якоря, м².

$$\text{Для } \frac{Q_{\text{ЛН}}}{Q_1} = \frac{0,01}{0,087} = 0,11 \text{ определяем по рисунку Г.18: } \xi_3 = 0,80, \xi_4 = 0,47$$

$$Z_{\text{ВХ}_Л} = \frac{0,80 \cdot 0,565}{2 \cdot 9,81 \cdot 0,01^2} = 230,38$$

$$Z_{\text{ВЫХ}_Л} = \frac{0,50 \cdot 0,565}{2 \cdot 9,81 \cdot 0,01^2} = 143,99$$

6.2.3 Канал в воздушном зазоре:

6.2.3.1 Сопротивление трения канала

$$Z_{\text{ТР}_ВЗ} = \frac{\lambda_T l \gamma}{d_{\text{Э}_ВЗ} 2gQ_{ВЗ}^2} \quad (\text{Г.210})$$

где $Q_{ВЗ} = 0,785(D_{2\text{ИНД}}^2 - D_{1\text{ЯК}}^2) = 0,785(0,1420^2 - 0,1413^2) = 0,00015$;

$$d_{\text{Э}_ВЗ} = 2\delta = 2 \cdot 0,00055 = 0,0011$$

$$Z_{\text{ТР}_ВЗ} = \frac{0,06 \cdot 0,0446 \cdot 0,565}{0,0011 \cdot 2 \cdot 9,81 \cdot 0,00015^2} = 0,31 \cdot 10^6$$

6.2.3.2 Сопротивление изменения сечения при входе и выходе из канала в воздушном зазоре

$$Z_{\text{ВХ}_ВЗ} = \frac{\xi_5 \gamma}{2gQ_{ВЗ}^2} \quad (\text{Г.211})$$

$$Z_{\text{ВЫХ}_ВЗ} = \frac{\xi_6 \gamma}{2gQ_{ВЗ}^2} \quad (\text{Г.212})$$

где ξ_5 и ξ_6 определяются по рисунку Г.18 для $\frac{Q_{ВЗ}}{Q_{ЛВН}}$.

Для $\frac{Q_{ВЗ}}{Q_{ЛВН}} = \frac{0,00015}{0,005} = 0,03$ определяем по рисунку Г.18: $\xi_5 = 0,95$, $\xi_6 = 0,49$

$$Z_{\text{ВХ}_ВЗ} = \frac{0,95 \cdot 0,565}{2 \cdot 9,81 \cdot 0,00015^2} = 1,2 \cdot 10^6$$

$$Z_{\text{ВЫХ}_ВЗ} = \frac{0,49 \cdot 0,565}{2 \cdot 9,81 \cdot 0,00015^2} = 0,63 \cdot 10^6$$

6.2.4 Канал под лобовыми частями обмотки якоря:

6.2.4.1 Сопротивление трения канала

$$Z_{\text{ТР}_ЛВН} = \frac{\lambda_T l_B \gamma}{d_{\text{Э}_ЛВН} 2gQ_{ЛВН}^2} \quad (\text{Г.213})$$

где $Q_{ЛВН} = 0,785(D_{1ЯК}^2 - D_{4ЯК}^2) = 0,785(0,1413^2 - 0,1169^2) = 0,005$ - сечение канала под лобовыми частями обмотки якоря; $d_{\ominus_{ЛВН}} = D_{1ЯК} - D_{4ЯК} = 0,1413 - 0,1169 = 0,0244$

$$Z_{TP_{ЛВН}} = \frac{0,06 \cdot 0,025 \cdot 0,565}{0,0244 \cdot 2 \cdot 9,81 \cdot 0,005^2} = 70,8$$

6.2.4.2 Сопротивление канала над лобовыми частями обмотки якоря и над статором

$$Z_K = Z_{BX_K} + Z_{ВЫX_K} + Z_{BX_L} + Z_{ВЫX_L} + 2 \cdot Z_{TP_{ЛВН}} + Z_{TP_K} \quad (Г.214)$$

$$Z_K = 2,85 \cdot 10^6 + 1,5 \cdot 10^6 + 230,4 + 144 + 2 \cdot 9,6 + 4,6 \cdot 10^6 = 8,95 \cdot 10^6$$

6.2.4.3 Сопротивление канала в воздушном зазоре и под лобовыми частями обмотки якоря

$$Z_{B3} = Z_{BX_{B3}} + Z_{ВЫX_{B3}} + Z_{TP_{B3}} + 2 \cdot Z_{TP_{ЛВН}} \quad (Г.215)$$

$$Z_{B3} = 1,2 \cdot 10^6 + 0,63 \cdot 10^6 + 0,31 \cdot 10^6 + 2 \cdot 70,8 = 2,14 \cdot 10^6$$

6.2.5 Массовый расход охлаждающей среды в каналах статора

6.2.5.1 Расход среды в воздушном зазоре, кг/с

$$G_{B3} = \frac{G}{c + 1} \quad (Г.216)$$

$$\text{где } c = \sqrt{\frac{Z_{B3}}{Z_K}} = \sqrt{\frac{2,14 \cdot 10^6}{8,95 \cdot 10^6}} = 0,48$$

$$G_{B3} = \frac{0,038}{0,48 + 1} = 0,025$$

6.2.5.2 Расход среды в каналах над лобовыми частями и над статором, кг/с

$$G_K = G_{B3} \cdot c \quad (Г.217)$$

$$G_K = 0,025 \cdot 0,48 = 0,012$$

6.2.6 Объёмный расход охлаждающей среды в каналах статора

6.2.6.1 Расход среды в воздушном зазоре, м³/с

$$\vartheta_{B3} = \frac{G_{B3}}{\gamma} \quad (Г.218)$$

$$\vartheta_{B3} = \frac{0,025}{0,565} = 0,045$$

6.2.6.2 Расход среды в каналах над лобовыми частями и над статором, м³/с

$$\vartheta_K = \frac{G_K}{\gamma} \quad (Г.219)$$

$$g_K = \frac{0,012}{0,565} = 0,022$$

6.3 Скорости течения потока охлаждающей среды

6.3.1 Скорость потока в воздушном зазоре и под лобовыми частями, м/с

$$V_{B3} = \frac{g_{B3}}{Q_{B3}} \quad (\text{Г.220})$$

$$V_{ЛВН} = \frac{g_{B3}}{Q_{ЛВН}} \quad (\text{Г.221})$$

$$V_{B3} = \frac{0,045}{0,00015} = 302,5$$

$$V_{ЛВН} = \frac{0,045}{0,005} = 9$$

6.3.2 Скорость потока в каналах над лобовыми частями и статором, м/с

$$V_K = \frac{g_K}{Q_K} \quad (\text{Г.222})$$

$$V_{ЛН} = \frac{g_K}{Q_{ЛН}} \quad (\text{Г.223})$$

$$V_K = \frac{0,022}{0,0001} = 220$$

$$V_{ЛН} = \frac{0,022}{0,01} = 2,2$$

6.3.3 Скорость звука, м/с

$$V_{ЗВ} = 20,06 \cdot \sqrt{T_{CP}} \quad (\text{Г.224})$$

$$V_{ЗВ} = 20,06 \cdot \sqrt{333} = 366$$

6.4 Расчёт сопротивлений, обусловленных теплоотдачей с поверхности

6.4.1 Число Рейнольдса, определяющее характер течения

$$Re = \frac{Wd_{\text{э}}}{\nu} \quad (\text{Г.225})$$

где ν - коэффициент кинематической вязкости, м²/с, определяется по таблице Г.3.

Для каналов корпуса над и под лобовыми частями обмотки якоря $W=V_K$, $W=V_{ЛН}$,

$W=V_{ЛВН}$. Для воздушного зазора $W = \sqrt{V_{B3}^2 + V_{ОКР}^2}$ м/с, где $V_{ОКР} = \frac{\pi D n}{60}$ - окружная скорость,

м/с

Расчёт для воздушного зазора:

$$V_{\text{окр}} = \frac{3,14 \cdot 0,1687 \cdot 4000}{60} = 35,3$$

$$W = \sqrt{302^2 + 35,3^2} = 304$$

$$Re = \frac{304 \cdot 0,0011}{15,06 \cdot 10^{-6}} = 22200$$

Расчёт каналов корпуса под лобовыми частями обмотки якоря:

$$W = V_{\text{л.вн}} = 9$$

$$Re = \frac{9 \cdot 0,0244}{15,06 \cdot 10^{-6}} = 14581$$

Расчёт каналов корпуса над лобовыми частями обмотки якоря:

$$W = V_{\text{л.н}} = 2,2$$

$$Re = \frac{2,2 \cdot 0,045}{15,06 \cdot 10^{-6}} = 6573$$

6.4.2 Критерий Пекле

$$Pe = Re \cdot Pr \quad (\text{Г.226})$$

где $Pr=0,722$ – критерий Прандтля, определяется по таблице Г.3.

Расчёт для воздушного зазора:

$$Pe = 22200 \cdot 0,722 = 16028,4$$

Расчёт для каналов корпуса под лобовыми частями обмотки якоря:

$$Pe = 14581 \cdot 0,722 = 10527$$

Расчёт для каналов корпуса над лобовыми частями обмотки якоря:

$$Pe = 6573 \cdot 0,722 = 4745$$

6.4.3 Критерий Нуссельта

6.4.3.1 для кольцевой щели (воздушный зазор, каналы над и под лобовыми частями):

а). ламинарный режим ($Re \leq 2300$)

$$Nu = 1,85 \cdot \sqrt[3]{Pe \frac{2\delta_k}{l_k}} \cdot \varepsilon_l \quad \text{при} \quad Pe \frac{2\delta_k}{l_k} > 70; \quad (\text{Г.227})$$

$$Nu = 7,6 \cdot \varepsilon_l \quad \text{при} \quad Pe \frac{2\delta_k}{l_k} \leq 70, \quad (\text{Г.228})$$

где ε_l определяется по таблице Г.7.

б). турбулентный режим ($Re > 5000$)

$$Nu = 0,15 \cdot Pr^{0,4} Re^{0,8} \left(\frac{D_2}{D_1} \right)^{0,25} \cdot \varepsilon_l \quad (\text{Г.229})$$

где D_2 – внешний диаметр канала, D_1 – внутренний диаметр канала.

Таблица Г.7 - Значения поправочного коэффициента на длину трубы ε_l

Re \ l/d ₃	1	2	5	10	15	20	30	40	50	Режим
2 300	1,90	1,70	1,44	1,28	1,18	1,13	1,05	1,02	1,0	Ламинарный
10 000	1,65	1,50	1,34	1,23	1,17	1,13	1,07	1,03	1,0	Турбулентный
20 000	1,51	1,40	1,27	1,18	1,13	1,10	1,05	1,02	1,0	Турбулентный
50 000	1,34	1,28	1,18	1,13	1,10	1,08	1,04	1,02	1,0	Турбулентный
100 000	1,28	1,22	1,15	1,10	1,08	1,06	1,03	1,02	1,0	Турбулентный
1000000	1,14	1,18	1,08	1,05	1,04	1,03	1,02	1,1	1,0	Турбулентный

Для воздушного зазора:

$$\delta_K = \delta \quad (\text{Г.230})$$

Для каналов над и под лобовыми частями:

$$\delta_K = \frac{D_{\text{КВН}} - D_{\text{ЛН}}}{2} \quad (\text{Г.231})$$

$$d_K = \frac{D_{\text{ЛВН}} - D_{\text{ВН}}}{2} \quad (\text{Г.232})$$

Расчёт для воздушного зазора:

Re = 22200 - турбулентный режим

Для $\frac{l}{d_3} = \frac{0,0446}{0,0011} = 40$ определяем по таблице Г.7: $\varepsilon_l = 1,02$

$$Nu = 0,15 \cdot 0,722^{0,4} 22200^{0,8} \left(\frac{0,1420}{0,1413} \right)^{0,25} \cdot 1,02 = 403,15$$

Расчёт для каналов корпуса под лобовыми частями обмотки якоря:

Re = 14581 - турбулентный режим

Для $\frac{l}{d_3} = \frac{0,0446}{0,0244} = 1,8$ определяем по таблице Г.7: $\varepsilon_l = 1,45$

$$Nu = 0,15 \cdot 0,722^{0,4} 14581^{0,8} \left(\frac{0,1413}{0,1169} \right)^{0,25} \cdot 1,45 = 429,1$$

Расчёт для каналов корпуса над лобовыми частями обмотки якоря:

$Re = 6573$ - турбулентный режим

Для $\frac{l}{d_3} = \frac{0,0446}{0,045} = 1$ определяем по таблице Г.7: $\varepsilon_l = 1,75$

$$Nu = 0,15 \cdot 0,722^{0,4} 6573^{0,8} \left(\frac{0,166}{0,121} \right)^{0,25} \cdot 1,75 = 282,6$$

6.4.3.2 для каналов корпуса:

$$Re = \frac{220 \cdot 0,0032}{15,06 \cdot 10^{-6}} = 46746$$

$$Pe = 46746 \cdot 0,722 = 33750$$

а). Ламинарный режим ($Re \leq 2300$)

$$Nu = 1,615 \cdot \left(Pe \frac{d_{\text{ЭК}}}{l_{\text{К}}} \right) \text{ при } Pe \frac{d_{\text{ЭК}}}{l_{\text{К}}} > 12; \quad (\text{Г.233})$$

$$Nu = 3,66 \cdot \varepsilon_l \text{ при } Pe \frac{d_{\text{ЭК}}}{l_{\text{К}}} \leq 12. \quad (\text{Г.234})$$

б). Турбулентный режим ($Re > 5000$)

$$Nu = 0,023 \cdot Pr^{0,4} Re^{0,8} \cdot \varepsilon_l \quad (\text{Г.235})$$

в). Для переходных чисел Рейнольдса ($2300 < Re < 5000$)

$$Nu = 21 \cdot \left(Pr \frac{d_{\text{ЭК}}}{l_{\text{К}}} \right)^{0,33} \left(\frac{Re}{2300} \right) \ln \left(\frac{l_{\text{К}}}{d_{\text{ЭК}}} \right) \text{ при } Re Pr \frac{d_{\text{ЭК}}}{l_{\text{К}}} > 12 \quad (\text{Г.236})$$

$$Nu = 3,66 \cdot \left(\frac{Re}{2300} \right)^{2,3 + \ln Pr} \text{ при } Re Pr \frac{d_{\text{ЭК}}}{l_{\text{К}}} < 12 \quad (\text{Г.237})$$

Для $Re = 46746$ в каналах корпуса имеем турбулентный режим.

$$Nu = 0,023 \cdot 0,722^{0,4} 46746^{0,8} \cdot 1,4 = 1308,9$$

6.4.4 Поверхности теплоотдачи:

6.4.4.1 Воздушный зазор, м^2

$$F_{\text{ВЗ}} = \pi D l \quad (\text{Г.238})$$

$$F_{\text{ВЗ}} = 3,1415 \cdot 0,1687 \cdot 0,446 = 0,236$$

6.4.4.2 Каналы корпуса, м^2

$$F_K = \Pi_K N_K l_K \quad (\text{Г.239})$$

$$F_K = 0,02 \cdot 6 \cdot 0,0446 = 0,0053$$

где $\Pi_K = 2(h_K + b_K) = 2(0,002 + 0,008) = 0,02$ - периметр канала, м

6.4.5 Коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·°С)

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda_B}{d_{\text{э}}} \quad (\text{Г.240})$$

где λ_B - коэффициент теплопроводности охлаждающего воздуха, Вт/(м·°С).

Для воздушного зазора:

$$\alpha_{\text{вз}} = \frac{403,15 \cdot 0,026}{0,0011} = 9529$$

Для каналов корпуса под лобовыми частями обмотки якоря:

$$\alpha_{\text{лвн}} = \frac{429,1 \cdot 0,026}{0,0244} = 457,24$$

Для каналов корпуса над лобовыми частями обмотки якоря:

$$\alpha_{\text{лн}} = \frac{282,6 \cdot 0,026}{0,045} = 163,28$$

Для каналов в корпусе:

$$\alpha_K = \frac{1308,9 \cdot 0,026}{0,0032} = 10634,8$$

6.4.6 Сопротивления теплоотдачи с поверхности, °С/Вт

(для воздушного зазора, каналов корпуса, наружной и внутренней поверхностей лобовых частей обмотки якоря)

$$R_{\alpha} = \frac{1}{\alpha \cdot F_{\alpha}} \quad (\text{Г.241})$$

где F_{α} - площадь теплоотдающей поверхности, м²

Для воздушного зазора:

$$R\alpha_{\text{вз}} = \frac{1}{9529 \cdot 0,0236} = 0,0044$$

Для внутренней поверхности лобовых частей обмотки якоря:

$$R\alpha_{\text{лвн}} = \frac{1}{457,24 \cdot 0,0004} = 5,47$$

Для наружной поверхности лобовых частей обмотки якоря:

$$R\alpha_{\text{ЛН}} = \frac{1}{163,28 \cdot 0,0004} = 15,3$$

Для каналов в корпусе:

$$R\alpha_{\text{К}} = \frac{1}{10634 \cdot 0,0053} = 0,0177$$

6.5 Расчёт температуры отдельных частей машины

6.5.1 Обмотка якоря, К

$$T_{\text{Оя}} = T_{\text{НАЧ}} + R_{\text{Э1}} \left[\frac{P_{\text{Оя}}(R_{\text{ИЗ.П}} + R_{\text{Э2}}) + P_{\text{СТ}} \cdot R_{\text{Э2}}}{R_{\text{Э1}} + R_{\text{Э2}} + R_{\text{ИЗ.П}}} \right] \quad (\text{Г.242})$$

где $R_{\text{Э1}}$ - эквивалентное сопротивление теплоотдачи с лобовых частей обмотки якоря, °С/Вт, $R_{\text{Э2}}$ - эквивалентное сопротивление теплоотдачи в каналах корпуса и воздушном зазоре, °С/Вт.

$$R_{\text{Э1}} = \frac{(R\alpha_{\text{ЛН}} + R_{\text{ИЗ.ЛН}})(R\alpha_{\text{ЛВН}} + R_{\text{ИЗ.ЛВН}})}{R\alpha_{\text{ЛН}} + R\alpha_{\text{ЛВН}} + R_{\text{ИЗ.ЛН}} + R_{\text{ИЗ.ЛВН}}} \quad (\text{Г.243})$$

$$R_{\text{Э2}} = \frac{R_{\alpha_{\text{ВЗ}}} \cdot R_{\alpha_{\text{К}}}}{R_{\alpha_{\text{ВЗ}}} + R_{\alpha_{\text{К}}}} \quad (\text{Г.244})$$

$$R_{\text{Э1}} = \frac{(15,3 + 0,133)(5,47 + 0,142)}{15,3 + 0,133 + 5,47 + 0,142} = 4,1$$

$$R_{\text{Э2}} = \frac{0,0044 \cdot 0,0177}{0,0044 + 0,0177} = \frac{0,00007788}{0,0221} = 0,0035$$

$$T_{\text{Оя}} = 393 + 4,1 \left[\frac{124,16(0,1676 + 0,0035) + 634,9 \cdot 0,0035}{4,1 + 0,0035 + 0,1676} \right] = 415,52$$

6.5.2 Обмотка якоря, °С (должна быть меньше значений, приведенных в таблице Г.2)

$$t_{\text{Оя}} = T_{\text{Оя}} - 273 \quad (\text{Г.245})$$

$$t_{\text{Оя}} = 415,52 - 273 = 142,52$$

Для провода ПНЭТП максимально допустимая температура 250 °С, поэтому продолжаем расчёт

6.5.3 Сталь статора, К

$$T_{\text{СТ}} = T_{\text{НАЧ}} + R_{\text{Э2}} \left[\frac{P_{\text{СТ}}(R_{\text{ИЗ.П}} + R_{\text{Э1}}) + P_{\text{Оя}} \cdot R_{\text{Э1}}}{R_{\text{Э1}} + R_{\text{Э2}} + R_{\text{ИЗ.П}}} \right] \quad (\text{Г.246})$$

$$T_{\text{ст}} = 293 + 0,0035 \left[\frac{634,9(0,1676 + 4,1) + 124,16 \cdot 4,1}{4,1 + 0,0035 + 0,1676} \right] = 295,6$$

6.5.4 Сталь статора, °C

$$t_{\text{ст}} = T_{\text{ст}} - 273 \quad (\text{Г.247})$$

$$t_{\text{ст}} = 295,6 - 273 = 22,6$$

Исходя из условий работы АВЭК на большой высоте, где температура воздуха ниже, чем у земли, а так же в силу того, что конструкция разработанного генератора позволяет охлаждать лобовые части обмоток холодным (не нагретым) воздухом с обеих сторон, можно утверждать, что разработанный генератор гарантированно будет работать в диапазоне допустимых значений температуры, вследствие чего магнитные свойства активных материалов будут изменяться незначительно и его реальные характеристики будут соответствовать расчётным.

ПРИЛОЖЕНИЕ Д. Листинг скрипта для автоматического построения модели электрической машины с постоянными магнитами в программе «Ansys Maxwell 16» на примере магнитопровода индуктора

'Создание проекта в Maxwell

Dim oAnsoftApp

Dim oDesktop

Dim oProject

Dim oDesign

Dim oEditor

Dim oModule

Set oAnsoftApp = CreateObject("AnsoftMaxwell.MaxwellScriptInterface")

Set oDesktop = oAnsoftApp.GetAppDesktop()

oDesktop.RestoreWindow

Set oProject = oDesktop.NewProject

oProject.Rename "C:/Users/User/Documents/Ansoft/ProjectEM.mxwl", true

oProject.InsertDesign "Maxwell 3D", "Maxwell3DDesign1", "Transient", ""

Set oDesign = oProject.SetActiveDesign("Maxwell3DDesign1")

'Создание индуктора

oProject.ChangeProperty Array("NAME:AllTabs", Array("NAME:ProjectVariableTab", Array("NAME:PropServers", "ProjectVariables"), Array("NAME:NewProps", Array("NAME:\$D1Ind", "PropType:=", "VariableProp", "UserDef:=", true, "Value:=", "151mm"), Array("NAME:\$D2Ind", "PropType:=", "VariableProp", "UserDef:=", true, "Value:=", "68.46mm"), Array("NAME:\$LengthInd", "PropType:=", "VariableProp", "UserDef:=", true, "Value:=", "49.7mm"), Array("NAME:\$Poles", "PropType:=", "VariableProp", "UserDef:=", true, "Value:=", "8"), Array("NAME:\$PoleType", "PropType:=", "VariableProp", "UserDef:=", true, "Value:=", "1"), Array("NAME:\$Embrace", "PropType:=", "VariableProp", "UserDef:=", true, "Value:=", "0.85"), Array("NAME:\$ThickMag", "PropType:=", "VariableProp", "UserDef:=", true, "Value:=", "28.6mm"), Array("NAME:\$WidthMag", "PropType:=", "VariableProp", "UserDef:=", true, "Value:=", "40mm"), Array("NAME:\$ugol_nakl_vozd_zaz2", "PropType:=", "VariableProp", "UserDef:=", true, "Value:=", "-140deg"), Array("NAME:\$b_vozd_zazor2", "PropType:=", "VariableProp", "UserDef:=", true, "Value:=", "1mm"))))

```

Set oDesign = oProject.SetActiveDesign("Maxwell3DDesign1")
Set oEditor = oDesign.SetActiveEditor("3D Modeler")
oEditor.CreateUserDefinedPart Array("NAME:UserDefinedPrimitiveParameters",
"DllName:=", "RMxpvt/PMCore", "Version:=", "12.0", "NoOfParameters:=", 13, "Library:=",
"syslib", Array("NAME:ParamVector", Array("NAME:Pair", "Name:=", "DiaGap", "Value:=",
"$D1Ind"), Array("NAME:Pair", "Name:=", "DiaYoke", "Value:=", "$D2Ind"), Ar-
ray("NAME:Pair", "Name:=", "Length", "Value:=", "$LengthInd"), Array("NAME:Pair",
"Name:=", "Poles", "Value:=", "2"), Array("NAME:Pair", "Name:=", "PoleType", "Value:=",
"$PoleType"), Array("NAME:Pair", "Name:=", "Embrace", "Value:=", "$Embrace"), Ar-
ray("NAME:Pair", "Name:=", "ThickMag", "Value:=", "$ThickMag"), Array("NAME:Pair",
"Name:=", "WidthMag", "Value:=", "45mm"), Array("NAME:Pair", "Name:=", "Offset",
"Value:=", "0mm"), Array("NAME:Pair", "Name:=", "Bridge", "Value:=", "2mm"), Ar-
ray("NAME:Pair", "Name:=", "Rib", "Value:=", "3mm"), Array("NAME:Pair", "Name:=",
"LenRegion", "Value:=", "200mm"), Array("NAME:Pair", "Name:=", "InfoCore", "Value:=",
"0"))), Array("NAME:Attributes", "Name:=", "PMCore1", "Flags:=", "", "Color:=", "(132 132
193)", "Transparency:=", 0, "PartCoordinateSystem:=", "Global", "UDMId:=", "", "Materi-
alValue:=", "" & Chr(34) & "vacuum" & Chr(34) & "", "SolveInside:=", true)
oEditor.Copy Array("NAME:Selections", "Selections:=", "PMCore1")
oEditor.Paste
oEditor.ChangeProperty Array("NAME:AllTabs", Array("NAME:Geome-
try3DCmdTab", Array("NAME:PropServers", "PMCore2:CreateUserDefinedPart:1"), Ar-
ray("NAME:ChangedProps", Array("NAME:InfoCore", "Value:=", "1"))))
oEditor.Section Array("NAME:Selections", "Selections:=", "PMCore1,PMCore2",
"NewPartsModelFlag:=",
"Model"), Array("NAME:SectionToParameters", "CreateNewObjects:=", true, "Section-
Plane:=", "YZ", "SectionCrossObject:=", false)
oEditor.SeparateBody Array("NAME:Selections", "Selections:=", "PMCore1_Sec-
tion1,PMCore2_Section1", "NewPartsModelFlag:=", "Model")
oEditor.Delete Array("NAME:Selections", "Selections:=", "PMCore1_Section1_Sepa-
rate1,PMCore2_Section1_Separate1")
oEditor.CreateRelativeCS Array("NAME:RelativeCSParameters", "OriginX:=", "0mm",
"OriginY:=", "0.5*$D1Ind+0.5*$b_vozd_zazor2", "OriginZ:=", "0mm", "XAxisXvec:=",

```

```
"1mm", "XAxisYvec:=", "0mm", "XAxisZvec:=", "0mm", "YAxisXvec:=", "0mm", "YAxisYvec:=", "1mm", "YAxisZvec:=", "0mm"), Array("NAME:Attributes", "Name:=", "RelativeCS2")
```

```
oEditor.Rotate Array("NAME:Selections", "Selections:=", "PMCore1_Section1,PMCore2_Section1", "NewPartsModelFlag:=", "Model"), Array("NAME:RotateParameters", "RotateAxis:=", "X", "RotateAngle:=", "0deg")
```

```
oEditor.ChangeProperty Array("NAME:AllTabs", Array("NAME:Geometry3DCmdTab", Array("NAME:PropServers", "PMCore1:Rotate:1"), Array("NAME:ChangedProps", Array("NAME:Angle", "Value:=", "-$ugol_nakl_vozd_zaz2"))))
```

```
oEditor.ChangeProperty Array("NAME:AllTabs", Array("NAME:Geometry3DCmdTab", Array("NAME:PropServers", "PMCore2:Rotate:1"), Array("NAME:ChangedProps", Array("NAME:Angle", "Value:=", "-$ugol_nakl_vozd_zaz2"))))
```

```
oEditor.Delete Array("NAME:Selections", "Selections:=", "PMCore1")
```

```
oEditor.Delete Array("NAME:Selections", "Selections:=", "PMCore2")
```

```
oEditor.SetWCS Array("NAME:SetWCS Parameter", "Working Coordinate System:=", "Global")
```

```
oEditor.SweepAroundAxis Array("NAME:Selections", "Selections:=", "PMCore1_Section1", "NewPartsModelFlag:=", "Model"), Array("NAME:AxisSweepParameters", "DraftAngle:=", "0deg", "DraftType:=",
```

```
"Round", "CheckFaceFaceIntersection:=", false, "SweepAxis:=", "Z", "SweepAngle:=", "360deg", "NumOfSegments:=", "0")
```

```
oEditor.SweepAroundAxis Array("NAME:Selections", "Selections:=", "PMCore2_Section1", "NewPartsModelFlag:=", "Model"), Array("NAME:AxisSweepParameters", "DraftAngle:=", "0deg", "DraftType:=", "Round", "CheckFaceFaceIntersection:=", false, "SweepAxis:=", "Z", "SweepAngle:=", "2*3.141596/$Poles*$Embrace", "NumOfSegments:=", "0")
```

```
oEditor.DuplicateAroundAxis Array("NAME:Selections", "Selections:=", "PMCore2_Section1", "NewPartsModelFlag:=", "Model"), Array("NAME:DuplicateAroundAxisParameters", "CreateNewObjects:=", false, "WhichAxis:=", "Z", "AngleStr:=", "2*3.141596/$Poles", "NumClones:=", "2"), Array("NAME:Options", "DuplicateAssignments:=", false)
```

```
oEditor.SeparateBody Array("NAME:Selections", "Selections:=", "PMCore2_Section1", "NewPartsModelFlag:=", "Model")
```



```
Set oDefinitionManager = oProject.GetDefinitionManager()
```

```
oDefinitionManager.AddMaterial Array("NAME:NdFe31", "CoordinateSystemType:=",
"Cylindrical", Array("NAME:AttachedData"), Array("NAME:ModifierData"), "permittiv-
ity:=", "1", "permeability:=", "1.1", "conductivity:=", "625000", "dielectric_loss_tangent:=",
"0", "magnetic_loss_tangent:=", "0", Array("NAME:magnetic_coercivity", "property_type:=",
"VectorProperty", "Magnitude:=", "-850000A_per_meter", "DirComp1:=", "1", "DirComp2:=",
"0", "DirComp3:=", "0"), "thermal_conductivity:=", "0", "saturation_mag:=", "0gauss",
"lande_g_factor:=", "2", "delta_H:=", "0Oe", "mass_density:=", "7550", "youngs_modulus:=",
"147000000000", Array("NAME:thermal_expansion_coefficient", "property_type:=", "Aniso-
Property", "unit:=", "", "component1:=", "3e-006", "component2:=", "-5e-006", "compo-
nent3:=", "-5e-006"))
```

```
oEditor.AssignMaterial Array("NAME:Selections", "Selections:=", "PMCore2_Sec-
tion1_Separate1"), Array("NAME:Attributes", "MaterialValue:=", "" & Chr(34) & "NdFe31" &
Chr(34) & "", "SolveInside:=", true)
```

```
oDefinitionManager.AddMaterial Array("NAME:NdFe32", "CoordinateSystemType:=",
"Cylindrical", Array("NAME:AttachedData"), Array("NAME:ModifierData"), "permittiv-
ity:=", "1", "permeability:=", "1.1", "conductivity:=", "624000", "dielectric_loss_tangent:=",
"0", "magnetic_loss_tangent:=", "0", Array("NAME:magnetic_coercivity", "property_type:=",
"VectorProperty", "Magnitude:=", "-850000A_per_meter", "DirComp1:=", "-1",
"DirComp2:=", "0", "DirComp3:=", "0"), "thermal_conductivity:=", "0", "saturation_mag:=",
"0gauss", "lande_g_factor:=", "2", "delta_H:=", "0Oe", "mass_density:=", "7550",
"youngs_modulus:=", "147000000000", Array("NAME:thermal_expansion_coefficient", "prop-
erty_type:=", "AnisoProperty", "unit:=", "", "component1:=", "3e-006", "component2:=", "-5e-
006", "component3:=", "-5e-006"))
```

```
oEditor.ChangeProperty Array("NAME:AllTabs", Array("NAME:Geometry3DAttribu-
teTab", Array("NAME:PropServers", "PMCore2_Section1"), Array("NAME:ChangedProps",
Array("NAME:Material", "Value:=", "" & Chr(34) & "NdFe32" & Chr(34) & ""))))
```

```
oEditor.ChangeProperty Array("NAME:AllTabs", Array("NAME:Geometry3DAttribu-
teTab", Array("NAME:PropServers", "PMCore2_Section1"), Array("NAME:ChangedProps",
Array("NAME:Color", "R:=", 192, "G:=", 192, "B:=", 192))))
```

```
oEditor.DuplicateAroundAxis Array("NAME:Selections", "Selections:=",
"PMCore2_Section1,PMCore2_Section1_Separate1", "NewPartsModelFlag:=", "Model"), Ar-
ray("NAME:DuplicateAroundAxisParameters", "CreateNewObjects:=", true, "WhichAxis:=",
```

```
"Z", "AngleStr:=", "2*2*3.141596/$Poles", "NumClones:=", "0.5*$Poles"), Array("NAME:Options", "DuplicateAssignments:=", false)
```

```
oEditor.ChangeProperty Array("NAME:AllTabs", Array("NAME:Geometry3DAttributeTab", Array("NAME:PropServers", "PMCore1_Section1"), Array("NAME:ChangedProps", Array("NAME:Material", "Value:=", "" & Chr(34) & "steel_1008" & Chr(34) & ""))))))
```