Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)»

На правах рукописи

Неустроев Николай Игоревич

РАЗРАБОТКА ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ВЕНТИЛЬНОГО ГЕНЕРАТОРА С АКСИАЛЬНЫМ МАГНИТНЫМ ПОТОКОМ И ДИАМАГНИТНЫМ ЯКОРЕМ НА КОМБИНИРОВАННОМ МАГНИТНОМ И ГАЗОДИНАМИЧЕСКОМ ПОДВЕСЕ ДЛЯ МИКРОГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК

2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

> Научный руководитель – доктор технических наук, профессор Ганджа Сергей Анатольевич

Челябинск – 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

ОПРЕДЕЛЕНИЯ5
ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ 6
ВВЕДЕНИЕ
1.АНАЛИЗ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ГЕНЕРАТОРОВ ДЛЯ
МИКРО ГАЗОТУРБИННОЙ УСТАНОВКИ. ВЫБОР БАЗОВОГО
ВАРИАНТА
Вводные замечания
1.1. Обзор вариантов конструктивного исполнения электрической машины. 22
1.2. Вариант вентильной машина с возбуждением от постоянных магнитов с
радиальным магнитным потоком по типу аналога фирмы Capstone радиальной
конструкции
1.3. Вариант многосекционной вентильной машины с аксиальным магнитным
потоком с возбуждением от постоянных магнитов с диамагнитным якорем
(торцевая конструкция)27
1.4. Обоснование применения комбинированного магнитного и
газодинамического подвеса
Выводы по главе
2. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЕТА МЕХАНИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ
БАНДАЖА ИНДУКТОРА АКСИАЛЬНОГО ГЕНЕРАТОРА 37
Вводные замечания
2.1. Определение схемы нагружения бандажа 39
2.2. Математическая модель механического расчета 41
2.3. Сравнение результатов анализа математической модели механических
процессов в бандаже ротора с результатами анализа методом конечных
элементов в программе Ansys Workbench 44

Выводы по главе 46
3. СОЗДАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ И АНАЛИЗ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО СОСТОЯНИЯ ГЕНЕРАТОРА
Вводные замечания
3.1. Установочный расчет секции генератора 47
3.2. Расчет рабочего потокосцепления секции генератора 49
3.3. Расчет параметров секции
3.4. Расчет параметров генератора 67
3.5. Поверочный расчет электромагнитного состояния в ПО Ansys 71
Выводы по главе74
4. РАЗРАБОТКА МЕТОДИК АНАЛИЗА ТЕПЛОВОГО СОСТОЯНИЯ И
ВЕНТИЛЯЦИОННОГО РАСЧЕТА
Вводные замечания75
4.1. Разработка тепловой схемы замещения секции генератора с аксиальным
магнитным потоком и диамагнитным якорем75
4.2. Разработка математической модели теплового расчета секции аксиального
генератора с диамагнитным якорем79
4.3. Описание схемы замещения для математической модели анализа
вентиляционного расчета секции генератора
4.4. Разработка математической модели вентиляционного расчета секции
аксиального генератора с диамагнитным якорем
Выводы по главе
5. ПОВЕРОЧНЫЙ РАСЧЕТ КОМБИНИРОВАННОГО
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО ПОДВЕСА
Вводные замечания
5.1. Поверочный расчет электромагнитного подвеса
5.2. Поверочный расчет газодинамического подшипника

Выводы по главе
6. РАЗРАБОТКА И ИЗГОТОВЛЕНИЕ МАКЕТНОГО ОБРАЗЦА ГЕНЕРАТОРА
С АКСИАЛЬНЫМ МАГНИТНЫМ ПОТОКОМ И ДИАМАГНИТНЫМ
ЯКОРЕМ. СРАВНЕНИЕ С АНАЛОГОМ
Вводные замечания
6.1. Конструктивные особенности индуктора генератора
6.2. Конструктивные особенности обмотки аксиального генератора 103
6.3. Разработка модели электромагнитного подвеса 106
6.4. Корпус генератора и общая сборка генератора 109
6.5. Сравнительный анализ аксиальной многосекционной конструкции
генератора с радиальной конструкцией протопопа фирмы Capstone 116
Выводы по главе 118
ЗАКЛЮЧЕНИЕ 119
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ 122
ПРИЛОЖЕНИЕ 1. ИНФОРМАЦИЯ О МИКРОГАЗОТУРБИННОЙ
УСТАНОВКИ КОМПАНИИ CAPSTONE 143
ПРИЛОЖЕНИЕ 2. ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МГТУ ОСНОВНЫХ
ПРОИЗВОДИТЕЛЕЙ147
ПРИЛОЖЕНИЕ 3. ПИСЬМО О ГОТОВНОСТИ ЗАКУПОК ГЕНЕРАТОРА
ПРЕДЛАГАЕМОЙ КОНСТРУКЦИИ ОТ ИНДУСТРИАЛЬНОГО ПАРТНЕРА
АО «СКБ «ТУРБИНА»
ПРИЛОЖЕНИЕ 4. ДОГОВОР О ПРЕДОСТАВЛЕНИИ ГРАНТА ОТ ФОНДА
СОДЕЙСТВИЯ ИННОВАЦИЯМ 149
ПРИЛОЖЕНИЕ 5. ДОГОВОР О ПРЕДОСТАВЛЕНИИ ГРАНТА ОТ
РОССИЙСКОГО ФОНДА ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ 150
ПРИЛОЖЕНИЕ 6 АКТ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОГО
ИССЛЕДОВАНИЯ В АО «НПО «ЭЛЕКТРОМАШИНА» 152

ОПРЕДЕЛЕНИЯ

В диссертации применяются следующие термины с соответствующими определениями:

Вентильная электрическая машина бесщеточная машина постоянного тока, обмотка якоря которой связана с внешними цепями через вентильное коммутирующее устройство.

Метод конечных элементов – это численный метод решения дифференциальных уравнений с частными производными и интегральных уравнений, возникающих при решении задач прикладной физики.

Цифровая модель – математическая модель электрической машины, описываемая системой дифференциальных уравнений, решаемых методом конечных элементов.

Ansys Electronics Desktop – САЕ система, позволяющая рассчитывать электрические и магнитные поля сложных систем на основе метода конечных элементов. Позволяет создавать цифровые двойники электромеханических систем.

Trancient – режим программы **Ansys Electronics Desktop,** который позволяет проводить анализ динамических характеристик с учетом взаимного перемещения статора и ротора.

Scopus – мировая библиографическая и реферативная база данных и инструмент для отслеживания цитируемости статей, опубликованных в научных изданиях. База данных индексирует научные журналы, материалы конференций и серийные книжные издания, а также профессиональные журналы (Trade Journals).

Web of Science – поисковая интернет-платформа, объединяющая реферативные базы данных публикаций в научных журналах и патентов, в том числе базы, учитывающие взаимное цитирование публикаций. Web of Science охватывает материалы по естественным, техническим, общественным, гуманитарным наукам и искусству.

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

ГОСТ – государственный стандарт.

КПД – коэффициент полезного действия.

ЛЭП – линия электропередачи.

МКЭ – метод конечных элементов.

РИНЦ – российский индекс научного цитирования.

САЕ – система автоматизированного проектирования, предназначенная для анализа электромеханических систем.

СГ – синхронный трёхфазный генератор.

ЭДС – электродвижущая сила.

ЮУрГУ – федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)».

Все аналитические выражения в диссертации приводятся для единиц измерения системы СИ.

введение

Актуальность темы исследования

С момента начала масштабной электрификации по всему миру отмечается неуклонный рост потребления электрической энергии. В последние десятилетия наблюдается рост как промышленного потребления, так и потребительского. Несмотря на активное развитие энергосберегающих технологий, рост потребления электроэнергии обусловлен множеством факторов:

 постоянное увеличение производственных мощностей промышленных предприятий в связи с непрерывно растущим потребительским спросом на различные категории товаров;

– расширение жилищного фонда в связи с ростом численности населения
и, как следствие, увеличение потребления энергии для обеспечения бытовых
нужд населения;

 непрерывная разработка более мощной вычислительной техники как для научных, так и для промышленных целей;

– развитие транспортных сетей: отказ от ДВС в пользу электротяги, постепенный переход от автомобилей с ДВС на электромобили.

В Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2035 года поставлены следующие цели и задачи: увеличение производства электроэнергии, модернизация систем генерации и распределения электроэнергии, локализация производства высокотехнологичного оборудования и другие. Наряду с ростом производства ставится цель по снижению уровня потерь электрической энергии в электрических сетях до уровня не более 7,3 процентов.

Еще одна цель – это повышение доли созданного или локализованного на территории РФ передового технологического оборудования для отраслей топливно-энергетического комплекса в общем количестве технологического оборудования, востребованного организациями топливно-энергетического комплекса до уровня 70 – 80 процентов.

Для обеспечения увеличения выработки электрической энергии потребуется увеличение имеющихся мощностей. В настоящий момент большая часть выработки электроэнергии обеспечивается объектами централизованной энергетики, но при этом имеется большое количество потребителей энергии, энергоснабжение которых невозможно обеспечить имеющимися объектами централизованной энергетики по разным причинам:

– удаленность потребителей электроэнергии от объектов единой энергетической системы (необходимость построения ЛЭП, большие потери в ЛЭП);

нехватка генерирующих мощностей централизованных объектов
электроснабжения в месте расположения потребителя;

- необходимость обеспечения бесперебойного энергоснабжения объекта;

 – расположение источников питания на подвижных объектах (самолетах, кораблях, железнодорожном и автотранспорте;

– неразумная тарифная политика централизованного энергоснабжения.

Большинство действующих мощностей объектов централизованной энергетики введены в эксплуатацию достаточно давно, например, средний возраст оборудования ТЭС 33 года, для обеспечения увеличивающегося потребления электроэнергии потребуется глубокая модернизация генерирующего оборудования, имеющихся энергосетей.

Обеспечение потребностей потребителей электроэнергии можно покрыть за счет введения в эксплуатацию объектов распределенной генерации, развитие распределенной энергетики создает совокупность преимуществ:

 снижение стоимости электроэнергии по сравнению с покупкой из общей сети;

 – снижение прямых затрат на тепловую энергию по сравнению с покупкой ее от внешнего поставщика;

 возможность контролировать надежность и качество поставляемой энергии, изменять его под индивидуальные потребности потребителя.

В настоящий объектов момент агрегаты для автономных электроснабжения представлены на рынке зарубежными изготовителями, доступ потребителей в РФ к покупке данных агрегатов может быть ограничен ввиду различных экономических и политических факторов. Поэтому локализация производства высокотехнологичного оборудования в РФ [109] позитивно скажется на доступности агрегатов для систем распределенной генерации и их цене. Самым зарекомендовавшим себя решением является использование распределенной микро газотурбинных установок для генерации электроэнергии.

Газотурбинные установки (ГТУ) [102] представляют из себя энергетический комплекс преобразования энергии углеводородного топлива в электрическую и тепловую энергию. Основным достоинством таких установок является высокая мощность в небольших объемах. Особенностью ГТУ является высокая частота вращения турбины, составляющая до 150 тыс. об/мин.

Ha Росстата, основе статистических данных материалов электрогенерирующих компаний, производителей И поставщиков газотурбинного оборудования, справочных проведен данных анализ эффективности использования ГТУ в электроэнергетике России. Имеющиеся ГТУ в зависимости от их установленной электрической мощности можно разделить на пять групп:

– Микротурбины (мощностью 1 МВт и менее);

- ГТУ малой мощности (от 1 до 25 MBт включительно);

– ГТУ средней мощности (25–100 МВт включительно);

– ГТУ большой мощности (от 100 до 300 МВт включительно);

- Сверхмощные ГТУ (свыше 300 MBт).

По состоянию на 1 января 2017 г. на территории России эксплуатировалось около 2150 энергетических ГТУ суммарной установленной мощностью примерно 28.1 ГВт. Из этой мощности на установки малой мощности и микротурбины приходится 25,9% суммарной мощности ГТУ. Также следует отметить высокий рост потребности промышленности в газотурбинных

энергетических установках за последние десятилетия. В связи с этим, НИР и инженерные разработки по совершенствованию ГТУ Представляют интерес как для научных исследований, так и для внедрения в производство.

В ГТУ одним из наиболее сложных и важных элементов является генератор. К генератору предъявляются такие требования как высокая надежность, высокая энергоэффективность, большой срок службы. На сегодняшний лень развитие традиционных радиальных генераторов, встраиваемых в ГТУ замедлилось, так как они выработали все свои основные возможности: не увеличивается частота вращения, мощность, КПД, срок службы, надежность. Для дальнейшего развития ГТУ нужны инновационные предложения, основанные на других конструкциях и принципах работы. Поэтому научные исследования и инженерные проработки в этом направлении остаются важными и актуальными. Применение генератора с аксиальным магнитным потоком и диамагнитным якорем может составить такую перспективу.

Степень научной разработанности исследуемой темы

В России ведется множество работ по разработке конструкции электрических машин с аксиальным потоком, методов анализа и оптимального проектирования данного типа машин.

Значительный вклад в развитие электрических машин с аксиальным потоком внесли следующие научные учреждения:

– Национальный исследовательский университет «МЭИ» (Московский энергетический институт): ученые Иванов-Смоленский А.В. [31-34], Беспалов В.Я. [1], Вильданов К.Я., Морозов В.А., Грузков С.А. занимаются развитием общей теории и методик расчета электрических машин, разрабатывают электрические машины с аксиальным магнитным потоком;

 Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет): ученый Бертинов А.И. занимается развитием теории электрических машин специального назначения, разработкой торцевых электрических машин для применения в авиационной технике;

– Красноярский государственный технический университет: ученые: Встовский А.Л., Головин М.П., Полошков Н.Е., Головина Л.Н., Коков С.А. занимались разработкой конструкции торцевых асинхронных электродвигателей [9-10];

– Ивановский государственный технический университет: ученые Казаков Ю.Б. [25, 42-52, 59-60], Герасимов Ю.Б., Тихонов А.И. [6, 66, 67], Новиков Н.Н. занимаются разработкой методик анализа электромагнитных полей, методик тепловых расчетов, разработкой систем автоматизированного проектирования (САПР) электрических машин [90, 95, 96, 100, 101];

– Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина: ученые Сарапулов Ф.Н. [92, 151], Миронов С.Е., Андреев Е.Н., Пластун А.Т. [97] занимались разработкой конструкции многодисковых машин с аксиальным потоком, развитием теории и методик расчета синхронных электрических машин [153, 162];

– Национальный исследовательский Томский политехнический университет: следует отметить работы ученых Буряниной Е.В., Леонова С.В., Федянина А.Л. по разработке математических моделей и методик расчета синхронных электрических машин торцевого исполнения [63, 64];

– Новосибирский государственный технический университет: ученые Петренко Ю.В. [77-81, 143], Приступ А.Г. [82-84] занимались разработкой теоретических основ и методик расчета торцевых электродвигателей для моторколеса;

– Самарский государственный технический университет: ученые: Зубков Ю.В. [27-30, 157-160], Ануфриев А.С., Макаричев Ю.А. [68-72, 140-142], Антропов В.Е. проводили анализ характеристик электромеханического стартера газотурбинной установки, исследовали тепловое состояние магнитоэлектрического стартера газовой турбины при горячих стартах и сухом вращении;

– Уфимский государственный авиационный технический университет: ученые: Исмагилов Ф.Р. [35-41], Вавилов В.Е. [2-5, 22, 23, 26], Каримов Р.Д.

[53-58], Шемелин Д.И., Минияров А.Х. [73-75] проводили междисциплинарную разработку ультра-высокоскоростной электрической машины, исследовали математическую модель системы генерирования электроэнергии на основе электрической машины с постоянными магнитами;

 Кубанский государственный технологический университет: ученые Гайтов Б.Х., Кашин Я.М., Пауков Д.В. [11-14] занимались разработкой аксиального бесконтактного двигателя-генератора на постоянных магнитах;

– Южно-Уральский государственный университет: ученые С.А. Ганджа [15-21, 110-127], С.Г. Воронин [8], А.И. Согрин [24, 93, 152] занимаются разработкой конструкции вентильных электрических машин с аксиальным магнитным потоком, разработкой методик расчета и оптимального проектирования машин данного типа.

В настоящее время опубликовано множество работ зарубежных исследователей, посвященных вопросам разработки и расчета электрических машин с аксиальным потоком. Следует выделить работы исследователей: М. Aydin, Z. Q.Zhu, T.A. Lipo, S. Huang, W. Fei, P.C.K. Luk, K. Jinupun, Dae-Won Chung, Yong-Min You, Sauparna Das, David P. Arnold, Mark G. Allen, Iulica Zana, Jeffrey H. Lang [161].

Большое количество публикаций свидетельствует о перспективности электрических машин с аксиальным магнитным потоком, при этом многие вопросы остаются нерешенными. Не разработаны и не исследованы конструкции многосекционных аксиальных генераторов, нет отработанных методов их анализа и синтеза, не решены вопросы опор высокоскоростных роторов, не отработаны способы отвода тепла из малых объемов с большими потерями. Опоры высокоскоростных генераторов представляют собой отдельную проблему. Известные газодинамические подшипники надежно работают только на больших скоростях, когда ротор всплывает в вязком воздушном слое. При низких скоростях они контактирую с опорой и изнашивают ее, при старте они вообще не работают. Магнитный подвес не зависит от скорости вращения вала, но не имеет достаточной жесткости, которую имеют газодинамические

подшипники. Идея совмещения этих двух разных по принципу действия опор может оказаться эффективной и разрешить названные противоречия.

Таким образом, **объектом исследования** является высокоскоростной вентильный многосекционный аксиальный генератор с диамагнитным якорем, имеющий комбинированный подвес, содержащий магнитные и газодинамические подшипники, встроенные в микро газотурбинную установку.

Предметом исследования являются конструкция генератора, магнитного подвеса, газодинамического подвеса, методики разработки этих узлов и анализ их электромеханических параметров и характеристик.

Целью диссертационного исследования является улучшение удельных энергетических показателей, повышение надежности и долговечности газотурбинной установки за счет разработки конструкции высокоскоростного вентильного генератора на основе электрической машины с аксиальным магнитным потоком и диамагнитным якорем с применением комбинированного магнитного и газодинамического подвеса, и разработка методик синтеза и анализа предлагаемой конструкции.

Достижение этой цели и внедрение результатов этого научного исследования в промышленность позволит внести значительный вклад в развитие отечественного электромашиностроения, даст в руки инженероврасчётчиков инструмент для расчётов высокоскоростных генераторов для газовых турбин, позволит повысить скорость и качество проектирования.

Задачи исследования. Для достижения поставленной цели необходимо последовательно решить следующие задачи:

1. Провести анализ различных типов электрических генераторов для микро газотурбинной энергетической установки с учетом особенностей режимов работы. Выбрать базовый вариант генератора.

2. Разработать методику анализа прочности бандажа ротора генератора.

3. Разработать математическую модель для анализа электромагнитного состояния генератора при различных режимах работы.

4. Разработать методику анализа теплового состояния генератора; разработать методику вентиляционного расчета генератора.

5. Провести поверочный расчет несущей способности газодинамического подвеса и электромагнитного подвеса генератора.

6. Разработать конструкцию многосекционного аксиального генератора с диамагнитным якорем на комбинированном электромагнитном и газодинамическом подвесе.

Методология и методы исследования. Для решения поставленных задач по разработке математических моделей использовались аналитические методы общей теории электромеханических преобразователей энергии. Для выполнения задач по проведению расчетов электромагнитных и механических процессов применялись аналитические и численные методы расчета физических полей на основе метода конечных элементов, реализованных в соответствующем программных средах.

Научная новизна. Научная новизна результатов, полученных автором, представляет совокупность методик проектирования и анализа высокоскоростного вентильного генератора с аксиальным магнитным потоком и диамагнитным якорем на комбинированном магнитном и газодинамическом подвесе для микрогазотурбинных установок.

Теоретическая значимость заключается в том, что в работе представлено дальнейшее развитие электромеханических преобразователей в части разработки конструкции высокоскоростного многосекционного аксиального генератора на постоянных магнитах с диамагнитным якорем, разработки концепции комбинированного магнитного и газодинамического подвеса, разработки методики проектирования этих агрегатов и узлов.

Практическая значимость. Основным практическим результатом диссертации является разработка конструкции высокоскоростного вентильного генератора на комбинированном магнитном и газодинамическом подвесе. Предложены технология сборки статора из двух разъемных частей, размещение фаз якорной обмотки в отдельной секции, сдвиг между фазами за счет углового

смещения магнитов. Математическая модель высокоскоростного генератора на постоянных магнитах с аксиальным магнитным потоком и диамагнитным якорем позволяет ускорить и облегчить сложную инженерную работу проектировщиков. Методика расчета потокосцепления многосекционного аксиального генератора для инженерной практики сокращает время на проведение анализа и позволяет проводить оптимизацию геометрии магнитной Методика механической цепи. расчета прочности бандажа ротора высокоскоростного аксиального генератора позволяет на инженерном уровне проводить точный анализ прочности бандажа с учетом распределенной нагрузки от инерциальных сил постоянных магнитов. Методики вентиляционного и теплового расчета, построенные по основе эквивалентных схем замещения, дают возможность оценить тепловое состояние генератора аксиальной конструкции на предварительном этапе проектирования.

Положения, выносимые на защиту:

– методика расчета механической прочности бандажа индуктора аксиального генератора, **отличающаяся тем, что** выражения радиальных и тангенциальных усилий, определяющих прочность, учитывают распределенные центробежные нагрузки постоянных магнитов и толстостенного бандажа;

 – аналитические зависимости потокосцепления, полученные методом сложных вложенных функций, отличающиеся тем, что выведены для аксиального индуктора и диамагнитного якоря при изменении толщины медного слоя, высоты магнита и числа полюсов;

 методика расчета многосекционного аксиального генератора с диамагнитным якорем, отличающаяся тем, что она позволяет минимизировать количество секций, осевую длину и вес вращающихся частей;

 методика теплового расчета секции аксиального генератора с диамагнитным якорем, отличающаяся тем, что коэффициенты теплоотдачи с поверхности обмоток учитывают изменение линейной скорости охлаждающего воздуха от вращения высокоскоростного индуктора;

 – способ подвеса высокоскоростного ротора газотурбинной установки,
отличающийся тем, что используется комбинация магнитного подшипника для исключения сухого трения при пуске и газодинамического подшипника, обеспечивающего жесткость вала на больших оборотах;

 методика вентиляционного расчета секции аксиального генератора с диамагнитным якорем, отличающаяся тем, что она учитывает аэродинамические сопротивления воздушному потоку в аксиальной конструкции.

Соответствие паспорту специальности. Диссертация соответствует специальности 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы, следующим пунктам: п.1. Развитие общей теории электротехнических комплексов и систем, анализ системных свойств и связей, физическое, математическое, имитационное и компьютерное моделирование компонентов электротехнических комплексов и систем, включая электромеханические, электромагнитные преобразователи энергии и электрические аппараты, системы электропривода, электроснабжения и электрооборудования; п.3. Разработка, структурный и параметрический синтез, оптимизация электротехнических комплексов, систем и их компонентов, разработка алгоритмов эффективного управления; п.4. Исследование работоспособности функционирования И качества электротехнических комплексов, систем и их компонентов в различных режимах, при разнообразных внешних воздействиях, диагностика электротехнических комплексов.

Степень достоверности полученных результатов. Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается использованием общей теории электрических машин, метода конечных элементов для решения задач электромагнитного и теплового анализа, методов физического моделирования.

Апробация работы. Основные положения результатов научной работы докладывались и обсуждались на следующих научно-технических конференциях:

– Международная научно-техническая конференция «International Ural Conference on Electrical Power Engineering» (Челябинск 2019);

– Научный семинар «Электротехнические комплексы и системы автоматизации в металлургии» (IEEE Russian Workshop on Power Engineering and Autimation of Metallurgy Industry: Research & Practice) 25–26 сентября 2020г, Магнитогорск, Россия;

– Международная научно-техническая конференция «International Conference on Industrial Engineering» (Челябинск 2020);

– VIII Международная премия «Малая энергетика – большие достижения»
(11 декабря 2020 Москва Торгово-промышленная палата РФ);

– Всероссийская научно-практическая конференция «Разработки Российской Федерации по приоритетным направлениям развития науки, технологий и техники». УМНИК 2020. Фонд содействия инновациям. 2021 год.

Внедрение результатов работы. Математические модели для расчета рабочего потокосцепления обмоток аксиального генератора с диамагнитным якорем, математические модели вентиляционного расчета секции аксиального генератора, методики расчета механической прочности бандажа индуктора аксиального генератора, методики расчета многосекционного аксиального генератора с диамагнитным якорем, методики теплового расчета секции аксиального генератора с диамагнитным якорем используются в учебном процессе при подготовке специалистов электротехнических специальностей Южно-Уральского государственного университета. Также результаты диссертационной работы внедрены в производственную деятельность предприятия АО «НПО «Электромашина» (г. Челябинск) и используются в процессе проектирования нового оборудования.

Проект поддержан:

– грантом Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ) на основании решения бюро совета РФФИ об утверждении итогов конкурса (Протокол №10(237) от 07.08.2020 года). Договор №20-38-90175/20 о предоставлении гранта победителю конкурса и реализации научного проекта

«Фундаментальные исследования по созданию комбинированного магнитного и газодинамического подвеса для модельного ряда высокоскоростных микротурбинных энергоустановок нового поколения» от 25.08.2020г.;

– грантом Федерального государственного бюджетного учреждения «Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере» (Фонд содействия инновациям) на основании протокола заседания дирекции Фонда №2 от 05.04.2021г. Договор №16682ГУ/2021 о предоставлении гранта на выполнение научно-исследовательских работ и оценку перспектив коммерческого использования результатов в рамках реализации инновационного проекта от 03.06.2021г.

Публикации по теме диссертации

По результатам диссертационной работы опубликовано 12 научных работ, из них 8 статей в рецензируемых научных изданиях, определенных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ, в том числе 5 статей, индексируемых в международной базе Scopus, 1 патент на полезную модель.

Личный вклад автора в диссертационное исследование

Все научные результаты, включенные в диссертацию и представленные к защите, получены лично автором, включая математическое, имитационное и компьютерное комплексной моделирование модели генератора И неуправляемого вентильного выпрямителя, разработку аналитических зависимостей потокосцепления, полученных методом сложных вложенных функций, синтез методик расчета многосекционного аксиального генератора с диамагнитным якорем, теплового и вентиляционного расчетов, выведение методики расчета механической прочности бандажа индуктора аксиального генератора, учитывающей распределенные центробежные нагрузки постоянных магнитов и толстостенного бандажа. Также автором предложена конструкция и технология сборки многосекционного аксиального генератора с диамагнитным якорем, в частности способ разделения обмотки якоря для упрощения сборки машины. Личный вклад диссертанта в работах, опубликованных в соавторстве,

состоит в определении направлений исследований, постановке задач, разработке математических и имитационных моделей.

Автор выражает благодарность своему научному руководителю доктору технических наук, профессору Гандже Сергею Анатольевичу за конструктивную критику и содействие при работе над диссертацией.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из определений, используемых научных терминов, основных обозначений и сокращений, введения, 6 глав, заключения, списка литературы из 162 наименований, 6 приложений. Работа изложена на 152 страницах, из них 121 страница основного текста. Работа содержит 66 иллюстраций, 81 аналитическое выражение, 5 таблиц.

Диссертация имеет следующую структуру и логику построения.

Во введении показана актуальность выбранной темы. Показаны степень научной разработанности исследуемой темы, задачи исследования, объект и предмет исследования, примененные в работе методы исследования, научная новизна и положения, выносимые на защиту, соответствие паспорту специальности, практическая значимость и результаты внедрения, апробация и публикации по теме диссертационного исследования.

В первой главе проведен анализ конструкций существующих газотурбинных установок, сделан анализ радиальной конструкции генератора различных типов машин применительно к МГТУ. Выявлены ее существенные недостатки. В качестве базовой конструкции для генератора МГТУ выбран вентильный многосекционный генератор с аксиальным зазором и диамагнитным якорем, у которого отсутствуют магнитные потери, имеется возможность повышения жесткости за счет организации опор на поверхности бандажа, повышения мощности за счет увеличения количества секций.

Вторая глава посвящена разработке методики расчета механической прочности бандажа индуктора аксиального генератора, учитывающей распределенные центробежные нагрузки, действующие на постоянные магниты и толстостенный бандаж. Предложенная методика проверена более точным

методом конечных элементов в ПО Ansys Mechanical Structural и показала удовлетворительную точность, погрешность не более 2,4%. На основании методики сделан расчет бандажа. В качестве используемого материала рекомендована высокопрочная мартенситная сталь.

В третьей главе разработаны аналитические зависимости расчета рабочего потокосцепления обмоток аксиального генератора с диамагнитным якорем, полученные методом сложных вложенных функций. В качестве параметров аппроксимации были выбраны толщина медного слоя, размеры постоянного магнита и количество полюсов магнитной системы. Погрешность разработанной математической модели составила не более 10%. В качестве эталона сравнения был выбран метод конечных элементов, реализованный программе Ansys Electronics Desktop. Разработанная модель может быть использована в оптимизационных циклах при проектировании генератора.

Четвертая глава посвящена разработке методик анализа теплового состояния генератора, нагрева якорной обмотки, учитывающей влияние вращения индуктора на коэффициенты теплоотдачи с поверхности обмотки. Методика вентиляционного расчета учитывает наличие вала генератора, препятствующего движению воздушного потока. Методика была проверена методом конечных элементов в ПО Ansys Fluent. Погрешность предложенной методики анализа теплового состояния генератора составила 5%.

В пятой главе определена конструкция магнитного подшипника, проведены расчеты несущей способности магнитного подшипника в стационарном режиме в программе Ansys Elektronics Desktop. Проведен расчет газодинамического подшипника по традиционной методике.

Шестая глава посвящена разработке конструкции вентильного генератора с аксиальным магнитным потоком и диамагнитным якорем. Конструкция генератора содержит несколько инновационных решений, на которые оформляются авторские права. Представлены фотографии макетного образца разрабатываемого генератора и приведены результаты сравнения с аналогом.

1.АНАЛИЗ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ГЕНЕРАТОРОВ ДЛЯ МИКРО ГАЗОТУРБИННОЙ УСТАНОВКИ. ВЫБОР БАЗОВОГО ВАРИАНТА

Вводные замечания

Одной из основных функций МГТУ является выработка электрической и тепловой энергии. Исходя из требований малых габаритов и веса МГТУ делают с большой частотой вращения ротора, которая ограничивается только прочностью вращающихся частей, на которые воздействуют центробежные силы. По этой причине частота вращения ротора поднимается до 70000–100000 об/мин. Как автономный источник питания установка должна обеспечить потребителя стандартными параметрами напряжения по амплитуде и частоте. Исходя из требований в отношении номинальной стандартной частоты 50 Гц единственным вариантом электрической схемы при частотах выше 3000 об/мин является выпрямление высокочастотного тока непосредственно с генератора со стабилизацией его амплитуды и инвертирование его в переменный ток с требуемой стандартной частотой.

Электрическая схема преобразования электрической энергии представлена на рисунке 1.В.1.



Рис. 1.В.1. Схема преобразования постоянного тока в трёхфазный

Как было отмечено, одной из основных проблем при разработке конструкции электрической машины является обеспечение требуемой прочности вращающихся частей, на которые будет действовать центробежная сила. Анализ предела прочности наиболее приемлемых конструкционных материалов показал, что для легированной стали марки 02H18K9M5T-ЭЛ (ЭП637А-ЭЛ, ВКС210) по ТУ 14-1-3039-80 с термообработкой максимальный диаметр вращающихся частей не должен превышать 70 мм. Это предельный размер диаметра ротора с учетом небольшого запаса для прочности на разрыв от действия центробежных сил.

Таким образом, для электрической части МГТУ следует разработать электрическую машину, у которой диаметр вращающихся частей при использовании высокопрочных материалов не должен превышать 70 мм.

Учитывая особенность требований к электрической части МГТУ, особенно в части высокой частоты вращения для нее необходимо разработать специальную электрическую машину, которая будет работать только в данной установке. Не менее существенным является необходимость повышения надежности электрического генератора и увеличения интервалов между необходимым техническим обслуживанием.

1.1. Обзор вариантов конструктивного исполнения электрической машины

Анализ газотурбинных установок [130, 131, 135-139, 148] ведущих мировых производителей показал, что все фирмы для электрической части используют синхронную электрическую машину с возбуждением от постоянных магнитов на роторе с радиальным магнитным потоком. По этой причине следует рассмотреть этот вариант в качестве одного из возможных.

Высокая частота вращения не позволяет рассматривать конструкции электрических машин с обмотками на вращающейся части, так как центробежные силы не дадут обмоткам удержаться на роторе. Кроме того, в этих

условиях токоподвод со скользящими контактами будет работать крайне ненадежно. Поэтому из конструкций машин без обмоток на роторе возможно применение асинхронной машины с короткозамкнутым ротором, синхронной реактивной машины, вентильно-индукторной машины.

На предварительном этапе асинхронная машина с короткозамкнутым ротором была исключена из рассмотрения. Основная причина заключалась в том, что для возбуждения асинхронной машины при отсутствии внешней сети необходима конденсаторная батарея. Габариты и вес этой батареи не позволяет выдержать требования к МГТУ по удельным массоэнергетическим показателям. Учитывая низкий коэффициент мощности асинхронной машины очевидно, что асинхронный генератор нагружен только активной мощностью, но также реактивной мощностью намагничивания, что увеличивает габариты также самой машины и не позволяет повысить КПД и удельные характеристики всей микро газотурбинной установки.

Из теории известно, что синхронная реактивная машина и вентильноиндукторная машина не имеют в своей конструкции собственного источника магнитного поля в виде постоянных магнитов или обмотки возбуждения. По этой причине они имеют существенно большие габариты по сравнению с магнитоэлектрическими машинами на постоянных магнитах. Кроме этого, конструкция ротора этих машин должна иметь явно выраженные полюса. На высоких частотах вращения это приведет к большим потерям трения о воздух. На основании этих доводов эти классы машин тоже были исключены из рассмотрения. Также следует учитывать высокое индуктивное сопротивление индукторных машин, асинхронных и синхронных реактивных. Таким образом, под нагрузкой наблюдается существенное снижение выходного напряжения, а расчет машины следует делать с запасом, что дополнительно снижает удельные характеристики данного типа машин. В свою очередь это также препятствует применению данного типа машин в качестве генератора микро газотурбинной установки.

Одним из возможных вариантов, удовлетворяющих с одной стороны техническим требованиям, с другой стороны требования прочности и бесконтактности может быть синхронная машина с возбуждением от постоянных магнитов [104, 105, 108]. Предварительно можно отметить, что электрические машины на постоянных магнитах имеют высокие удельные характеристики за счет применения магнитотвердых материалов с высоким уровнем запасенной магнитной энергии. Также следует отметить, что коэффициент мощности данного типа машин является самым высоким среди всех, превосходит машину на постоянных магнитах по этому параметру лишь синхронный генератор магнитоэлектрического возбуждения, позволяющий обеспечить коэффициент мощности равный единице во всем диапазоне нагрузок. Однако, как было замечено, магнитоэлектрическая синхронная машина уступает машинам на постоянных магнитах в контексте применения в газотурбинной энергетической установке ввиду наличия скользящего контакта для обеспечения возбуждения индуктора и механической прочности вращающихся обмоток индуктора. Исходя из изложенного следует вывод о том, что наиболее целесообразным является применение именно машин на постоянных магнитах при разработке высокоскоростного генератора на постоянных магнитах для микро газотурбинной энергетической установки. Этот класс электрических машин может иметь два конструктивных исполнения: с радиальным рабочим магнитным потоком и с аксиально направленным рабочим магнитным потоком. Поэтому следует провести анализ этих конструкций применительно к МГТУ для обоснованного выбора наилучшего варианта. Особое внимание следует уделить аксиальной конструкции, так как на сегодняшний день данное конструктивное исполнение не используется в качестве генератора для микро газотурбинных энергетических установок. Таким образом, для более детальной проработки были выбраны следующие конструкции электрических машин [136]:

1) вентильная машина с возбуждением от постоянных магнитов с радиальным магнитным потоком (по типу аналога фирмы Capstone) (далее – радиальная конструкция) [132, 154];

2) вентильная машина с аксиальным магнитным потоком [106, 107, 129, 133, 155] с возбуждением от постоянных магнитов (далее торцевая конструкция).

1.2. Вариант вентильной машина с возбуждением от постоянных магнитов с радиальным магнитным потоком по типу аналога фирмы Capstone радиальной конструкции

Способы установки и принципиальные схемы охлаждения генератора на постоянных магнитах в составе микро газотурбинной установки представлены на рисунке 1.2.1.



Рис. 1.2.1. Вариант расположения генератора аналога

На рисунке 1.2.2 представлен генератор газотурбинной установки с постоянными магнитами с вырезом для отображения внутренних конструктивных элементов.



Рис. 1.2.2. Конструктивные элементы генератора аналога

Основные преимущества радиальной конструкции:

1. Существует работоспособная электрическая машина аналога. Конструкция типична для машин этого класса. Технические риски при ее реализации невелики.

Основные недостатки радиальной конструкции:

1. За счет высокой скорости вращения частота перемагничивания в стали составляет 1000-2000 Гц в зависимости от скорости ротора. Это приводит к повышенным потерям в стали и соответственно низкому КПД генератора.

2. Ограничение длины ротора ввиду низкой колебательной устойчивости, и, как следствие существенное ограничение мощности машины, так как набор мощности увеличением диаметра невозможен из условий механической прочности бандажа. 3. Наличие существенного одностороннего магнитного тяжения индуктора к якорю, что в свою очередь отрицательно сказывается на надежности газодинамических подвесов генератора в составе микро газотурбинной установки.

1.3.Вариант многосекционной вентильной машины с аксиальным магнитным потоком с возбуждением от постоянных магнитов с диамагнитным якорем (торцевая конструкция)

Из всех возможных конструктивных исполнений торцевой конструкции был рассмотрен вариант с диамагнитным якорем [147]. Применение диамагнитного якоря упрощает технологию производства генератора, снижает себестоимость, его полностью исключает магнитные потери OT перемагничивания вследствие протекания переменного магнитного поля. Конструкция основных активных элементов машины с диамагнитным якорем представлена на рисунке 1.3.1. Данная конструкция имеет диамагнитный якорь с трехфазной обмоткой, расположенной в одной секции, что в свою очередь снижает ремонтопригодность при выходе из строя одной фазы.



Рис. 1.3.1. Активные элементы аксиальной машины

Принцип работы машины заключается в следующем. Магнитное поле от постоянных магнитов, которые вращаются, пронизывает неподвижную трехфазную обмотку, наводя в ней ЭДС вращения. Обмотка якоря не содержит ферромагнитного материала (диамагнитная).

Так как частота вращения ротора газовой турбины составляет 70000 об/мин требуется провести механический расчет бандажа для обеспечения механической прочности при воздействии собственных центробежных сил, действующих на бандаж, а также центробежных сил, действующих на постоянные магниты, удерживаемые бандажом.

Следующим критически важным расчетом является расчет электромагнитного состояния генератора для определения основных размеров активных частей, а также определения количества секций, требуемых для обеспечения заданной мощности.

Многосекционная аксиальная машина имеет сложную сборку. Между вращающимися постоянными магнитами располагаются неподвижные секции обмотки якоря с зазором 1 мм.

Для упрощения технологии сборки были приняты следующие конструктивные решения:

1. Обмотка разделяется по секциям таким образом, чтобы каждая фаза не имела общих секций с другими фазами, что обеспечит высокий уровень надежности.

2. Обмотки выполняются симметричными. Сдвиг фаз осуществляется сдвигом постоянных магнитов на 120 электрических градусов. Например, при 12-ти полюсной системе это составляет 20 геометрических градусов.

3. Обмотка разделяется на 2 части и в готовом изделии собирается из двух половин статора. Это упрощает общую сборку и повышает ремонтопригодность генератора.

На рисунке 1.3.2 представлена модель индуктора аксиального генератора, магниты в данном случае намагничены вдоль оси индуктора. Количество полюсов и толщина замыкающей поток задней пластины должны быть

определены по результатам разработки математической модели анализа электромагнитного состояния генератора.



Рис. 1.3.2. Индуктор секции аксиального генератора

На рисунке 1.3.3 представлена сборка индуктора секции генератора с бандажным кольцом, удерживающим магниты.



Рис. 1.3.3. Индуктор секции в сборе с бандажным кольцом

Индуктор разрабатываемого генератора представляет из себя аксиально намагниченные магниты, расположенные на цельном железном магнитопроводе, в котором магнитное поле изменяться ни во времени ни в пространстве не будет.



Рис. 1.3.4. Обмотка якоря одной секции аксиального генератора

На рисунке 1.3.4 показана обмотка якоря аксиальной машины. Следует отметить, что предполагается одна катушка на каждый полюс, при этом становится возможным разделить всю обмотку одной секции пополам.



Рис. 1.3.5. Секция генератора в сборе

На рисунке 1.3.5 представлена одна секция генератора в сборе. Следует отметить, что в одной секции расположена однофазная обмотка.



Рис. 1.3.6. Реализация сдвига фаз в 120 градусов

Как видно из рисунка 1.3.6 сдвиг фаз в разрабатываемом генераторе предлагается осуществлять не поворотом осей обмоток друг относительно друга, а поворотом секций индуктора генератора каждой фазы друг относительно друга.

Обмотка в предлагаемом генераторе располагается в промежутке между двумя полусекциями индуктора, то есть в воздушном зазоре.

На рисунке 1.3.7 представлена сборка активных частей аксиального генератора. Благодаря многосекционной конструкции возможен набор мощности генератора изменением количества секций. При этом коэффициент унификации будет достаточно большим, а значит производственный цикл будет сравнительно простым и себестоимость изготовления генератора сравнительно невысокая.



Рис. 1.3.7. Сборка активных частей аксиального генератора

Из рисунка следует отметить удобство сборки генератора и замены обмотки в случае возникновения неисправности и пробоя изоляции обмотки, замена происходит без разбора генератора целиком (обмотка кассетного типа).

Недостатки аксиальной машины с диамагнитным якорем:

1. Наличие большого немагнитного зазора требует применения мощных постоянных магнитов.

Основные преимущества аксиальной машины по сравнению с радиальной:

- 1. Отсутствуют потери в электротехнической стали, высокий КПД.
- 2. Улучшается компоновка узлов турбины.

3. Более простая конструкция электрической машины.

4. Секционирование позволяет разделить фазы в обмотке.

5. Возможность выполнить обмотки многофазными без усложнения конструктивного исполнения окончательного изделия.

6. Упрощаются испытания за счет тестирования одной секции.

7. Унификация по линейке мощностей.

Исходя из проведенного анализа можно сделать вывод о том, что вентильный генератор с аксиальным магнитным потоком и диамагнитным якорем по совокупности свойств имеет преимущество перед радиальной конструкцией и может быть базовым для разработки перспективной МГТУ.

1.4. Обоснование применения комбинированного магнитного и газодинамического подвеса

Условия работы микро газотурбинной установки при высоких частотах вращения длительного времени В течение однозначно определяют необходимость использования в качестве опор вращающихся роторов бесконтактных турбоагрегатов электрогенератора И подшипников, не требующих смазки. Наиболее зарекомендовавшим себя решением является применение газодинамических подшипников [88, 89, 128]. Газодинамические подшипники нашли широкое применение в газотурбинной технике и скоростных пневматических турбомашинах. Основные их преимущества: долговечность в тяжелых условиях без необходимости смазки, устойчивость к температурным воздействиям, отсутствие вибраций и практически неограниченная скорость вращения. Подшипники используются во вспомогательных авиационных турбинах, энергетических турбоагрегатах, пневматических холодильниках системы кондиционирования воздуха самолетов, получающих сжатый воздух от двигателей. Ведутся работы в направлении создания газодинамических подшипников для основных авиационных ГТД, которые позволят повысить долговечность, облегчить ГТД за счет отсутствия масляной системы, обеспечить экономию топлива на 10% благодаря исключению жидкостного трения. Существенным достоинством газодинамических подшипников является высокая жесткости при динамических нагрузках. При этом основным степень недостатком газодинамических подшипников является наличие сухого трения на

малых скоростях вращения, что резко сокращает их срок службы и снижает надежность.

Другим вариантом бесконтактной опоры является электромагнитный представляющий собой полшипник. управляемое электромеханическое устройство, в котором стабилизация положения ротора осуществляется силами магнитного притяжения, действующими на ротор со стороны электромагнитов, ток в которых регулируется системой автоматического управления по сигналам датчиков радиального перемещения ротора. Электромагнитные подшипники в настоящее время достаточно широко используются в качестве опор вращающихся роторов, В частности, В высокоскоростных шпинделях металлообрабатывающих станков, в турбокомпрессорных агрегатах и насосах. Усилие, развиваемое магнитным подшипников, не зависит от частоты вращения. Магнитный подшипник работает надежно даже при неподвижном роторе, олнако обладает меньшей степенью жесткости чем газодинамический подшипник и потребляет электрическую энергию.



Рис. 1.3.8. Кинематическая схема вращающегося индуктора предлагаемого аксиального генератора

Таким образом, предлагается опору высокоскоростного генератора для микро газотурбинной установки сделать комбинированной. Состоящий из электромагнитного и газодинамического подшипников комбинированный подвес использует преимущества этих двух типов подвеса и исключает их недостатки. Предлагаемая кинематическая схема и схема расположения опор в генераторе представлена на рисунках 1.3.8 и 1.3.9 соответственно. Из

кинематической схемы видно, что использование в качестве газодинамического подшипника наружной поверхности индуктора ротора позволяет повысить жесткость вращающейся системы.



Рис. 1.3.9. Схема подшипников многосекционного аксиального генератора

В момент пуска и до достижения номинальной частоты вращения используется электромагнитный подшипник. При частотах вращения от 25 000 об/мин несущей способности газодинамического подшипника становится достаточно для подвешивания массы ротора генератора. После того, как электрическая машина вышла на номинальную точку, электромагнитный подшипник отключается, генератор работает только на газодинамических подшипниках. Высокая степень износа газодинамического подшипника при малых частотах вращения ограничивает максимальное число пусков и остановок. Предложенное конструктивное решение исключает описанный недостаток газодинамического подшипника.

Выводы по главе

1. Проведен анализ конструкций существующих газотурбинных установок, предназначенных для автономных источников питания. В качестве перспективной выбрана высокоскоростная безредукторная конструкция с непосредственным сочленение ротора турбины и ротора генератора [156].

2. Сделан анализ радиальной конструкции генератора применительно к МГТУ. Выявлены ее существенные недостатки: большие магнитные потери, наличие резонансных частот из-за недостаточной жесткости вала, сложность выведения потерь из небольшого объема.

3. В качестве базовой конструкции для генератора МГТУ выбран вентильный многосекционный генератор с аксиальным зазором и диамагнитным якорем, у которого отсутствуют магнитные потери и существует возможность повышения жесткости и исключения резонансных частот за счет организации опор на поверхности бандажа. Предложенное техническое решение также позволяет набирать мощность за счет увеличения количества секций.

4. В качестве подвеса для рассматриваемого многосекционного аксиального генератора с диамагнитным якорем предложен комбинированный электромагнитный и газодинамический подшипник. Такое техническое решение позволит взаимно устранить недостатки каждого типа подшипника и совместить их достоинства, повысим надежность и ресурс генератора.
2. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЕТА МЕХАНИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ БАНДАЖА ИНДУКТОРА АКСИАЛЬНОГО ГЕНЕРАТОРА

Вводные замечания

Уравнение электромагнитной мощности для вентильной машины с аксиальным потоком отличается от уравнения электромагнитной мощности для вентильной машины с радиальным потоком, которое определяется зависимостью Арнольда [7]. Это обусловлено тем, что ЭДС в проводнике [94] трапециальной секции индуцируется неравномерно по его длине и зависит от линейной скорости элемента проводника на данном радиусе при условии равности магнитного потока по площади аксиально намагниченного полюса индуктора, как проиллюстрировано на рисунке 2.В.1.



Рис. 2.В.1. Эскиз магнитной системы и обмотки якоря ВМАП с сегментными магнитами и трапецеидальными обмотками якоря

Проведенные ранее исследования определяют следующее уравнение для электромагнитной мощности аксиальной машины этой конструкции:

$$P_{\text{3MMod2}(180-180/m)} = \frac{\pi}{2} A_{\text{cp}} B_{\delta} \omega \frac{(D_{\text{H}} + D_{\text{BH}})^2}{2} \cdot L_{\kappa} K_{\text{mod2}(180-180/m)} K_{\text{3}\phi(180-180/m)}$$
(2.1)

где *P*_{эмmod2(180-180/*m*)} – электромагнитная мощность вентиной машины аксиальной;

A_{ср} – линейная токовая нагрузка на среднем диаметре кольца индуктора;

 B_{δ} – магнитная индукция в аксиальном зазоре;

ω – угловая частота вращения;

*D*_н – наружный диаметр кольца индуктора;

*D*_{вн} – внутренний диаметр кольца индуктора;

 $L_{\rm k}$ – толщтна кольца индуктора;

*K*_{mod2(180-180/*m*)} – коэффициент, определяемый типом конструкции;

*К*_{эф(180-180/*m*)} – коэффициент, определяемый типом коммутации.

Из уравнения видно, что электромагнитная мощность при прочих равных условиях зависит от наружного диаметра кольца индуктора в квадрате. Это означает, что наружный диаметр кольца индуктора существенным образом влияет на энергетику аксиальной машины и его надо выбирать как можно большим. Но для высокоскоростной машины этот диаметр ограничен прочностью бандажа, на который действуют центробежные силы.

Таким образом, необходимо выбрать максимальный диаметр ротора из условий соблюдения механической прочности бандажа.

2.1. Определение схемы нагружения бандажа

Для определения уравнений эквивалентных напряжений в бандаже ротора рассмотрим рабочую схему нагружения бандажа, представленную на рисунке 2.1.1 и отражающую все внешние воздействия, приходящиеся на бандаж индуктора каждой секции аксиального генератора при вращении с постоянной скоростью. При этом нагрузку от магнитов примем равномерно распределенной, по внутренней поверхности бандажа индуктора генератора. Таким образом, вывод аналитических выражений проводился при допущении распределения нагрузки со стороны постоянных магнитов равномерно.



Рис.2.1.1. Схема нагружения вращающихся активных частей генератора

На рисунке 2.1.2 обозначены нагрузки, действующие на уединенный вырезанный элемент бандажа. С внутренней стороны на бандаж действует распирающее центробежное усилие от удерживаемых магнитов. Также на бандаж действует собственная центробежная нагрузка. Силы уравнивающие внешние воздействия разделены на радиально направленные и тангенциально направленные по отношению к вырезанному элементу. Также на рисунке отмечены деформации вырезанного элемента.



Рис. 2.1.2. Эскиз элемента бандажа с приложенными к нему нагрузками

На элемент бандажа бесконечно малой величины, изображенном на рисунке 2.1.2, действуют следующие нагрузки:

 σr , $(\sigma r + d\sigma r)$, dPy *u* dPy' – напряжения и эквивалентные усилия, действующие на элемент в радиальном направлении;

от, dPt – напряжения и эквивалентные усилия, действующие на элемент в тангенциальном направлении;

dFc – центростремительная сила, действующая на представленный элемент бесконечно малой величины;

и, (*u*+*du*) – деформации элемента от приложенных нагрузок; *r* – радиус расположения элемента;

dr, $d\phi$ – размеры элемента.

На основании описанной схемы нагружения вырезанного элемента бандажа бесконечно малого размера возможно вывести аналитические зависимости механических напряжений в бандаже ротора.

2.2. Математическая модель механического расчета

Общую запись центробежного усилия, действующего на предложенный элемент, можно записать следующим образом [85, 98]:

$$dFc = dm \cdot r\omega^2 = \rho \cdot r^2 \cdot \omega^2 \cdot l \cdot d\varphi \cdot dr, \qquad (2.2)$$

где: dm – масса элемента бесконечно малой величины;

ω – угловая скорость вращения ротора;

ρ – плотность материала;

1-осевая длина бандажа;

Эквивалентное усилие на внутренней цилиндрической поверхности элемента бандажа бесконечно малой величины можно записать следующим выражением:

$$dPy = \sigma_r lr \cdot d\varphi. \tag{2.3}$$

Эквивалентное усилие на внешней цилиндрической поверхности того же элемента бандажа определяется как:

$$dPy' = (\sigma_r + d\sigma_r)(l + dl)(r + dr) \cdot d\varphi = \sigma_r lr \cdot d\varphi + d(\sigma_r lr) \cdot d\varphi.$$
(2.4)

Эквивалентные усилия на боковых поверхностях элемента возможно записать в следующем виде:

$$dPt = \sigma_t l \cdot dr. \tag{2.5}$$

.

Спроецировав все усилия на вертикальную ось возможно записать уравнение равновесия сил, действующих на выделенный элемент:

$$dFc + dPy' - dPy - 2 \cdot dPt \cdot \sin\frac{a\varphi}{2} = 0.$$
(2.6)

Учитывая, что при малых углах $\sin x = x$, уравнение равновесия в напряжениях принимает вид:

$$\rho r^2 \omega^2 + \frac{d(\sigma_r lr)}{dr \cdot l} - \sigma_t = 0.$$
(2.7)

Так как предложенное выражение содержит два неизвестных следует записать дополнительные уравнения. Свяжем напряжения в рассматриваемых плоскостях через деформации по закону Гука:

$$\begin{cases} \varepsilon_r = \frac{\sigma_r - \mu \sigma_t}{E} \\ \varepsilon_t = \frac{\sigma_t - \mu \sigma_r}{E} \end{cases}$$
(2.8)

где: ε_r, ε_t – относительные удлинения в радиальном и тангенциальном направлении; μ – коэффициент Пуассона; Е – модуль упругости.

С другой стороны, из геометрии следует записать уравнения для относительных удлинений через деформации, обозначенные на эскизе:

$$\begin{cases} \varepsilon_r = \frac{du}{dr} \\ \varepsilon_t = \frac{u}{r} \end{cases}$$
(2.9)

Продифференцировав второе уравнение по радиусу, уравнение тангенциальных удлинений запишется:

$$\frac{du}{dr} = r \frac{d\varepsilon_t}{dr} + \varepsilon_t. \tag{2.10}$$

Таким образом, возможно записать выражение, связывающее относительные удлинения по принятым направлениям:

$$\varepsilon_t - \varepsilon_r + r \frac{d\varepsilon_t}{dr} = 0. \tag{2.11}$$

Используя выражение взаимосвязи относительных удлинений и напряжений, а также выражение взаимосвязи относительных удлинений по двум направлениям по отношению друг к другу, дополнительное уравнение, связывающее напряжения по направлениям, запишется в виде:

$$\frac{d}{dr}\left[\frac{r}{E}(\sigma_t - \mu\sigma_r)\right] = \frac{1}{E}(\sigma_r - \mu\sigma_t).$$
(2.12)

Решение предложенной системы дифференциальных уравнений даст выражения для напряжений в радиальном и тангенциальном направлениях:

$$\begin{cases} \sigma_r = A - \frac{B}{r^2} - \frac{(3+\mu)\rho r^2 \omega^2}{8}; \\ \sigma_t = A + \frac{B}{r^2} - \frac{(1+3\mu)\rho r^2 \omega^2}{8}, \end{cases}$$
(2.13)

где, коэффициенты А и В – определяются исходя из граничных условий.

Для рассматриваемого случая радиальные напряжения на внутреннем диаметре равны напряжению давления со стороны магнитов, а радиальные напряжения на внешнем диаметре равны нулю. Напряжения на внутреннем диаметре бандажа, создаваемые силами инерции магнитов определяются выражением:

$$\sigma_{ra} = \frac{\rho \omega^2 (r_2^2 - r_1^2)}{2}, \qquad (2.14)$$

где: r₂ – наружный диаметр магнита; r₁ – внутренний диаметр магнита.

Исходя из граничных условий коэффициенты «А» и «В» могут быть определены следующими выражениями:

$$\begin{cases} A = \frac{8r_2^2 \sigma_{ra} - 3\rho \omega^2 r_2^4 + 3\rho \omega^2 r_3^4 - \mu \rho \omega^2 r_2^4 + \mu \rho \omega^2 r_3^4}{8r_2^2 - 8r_3^2}; \\ B = \frac{8r_2^2 r_3^2 \sigma_{ra} + 3\rho \omega^2 r_2^2 r_3^4 - 3\rho \omega^2 r_2^4 r_3^2 + \mu \rho \omega^2 r_2^2 r_3^4 - \mu \rho \omega^2 r_2^4 r_3^2}{8r_2^2 - 8r_3^2}. \end{cases}$$
(2.15)

Полученные выражения коэффициентов позволяют получить уравнения радиальных и тангенциальных напряжений.

2.3. Сравнение результатов анализа математической модели механических процессов в бандаже ротора с результатами анализа методом конечных элементов в программе Ansys Workbench

На основании анализа математической модели механического расчета бандажа индуктора одной секции генератора рассчитаны численные значения размеров индуктора секции ротора генератора из условия обеспечения коэффициента запаса прочности. Рассчитанные значения приведены ниже:

$$\begin{cases} r_1 = 17,5 \text{ MM} \\ r_2 = 30 \text{ MM} \\ r_3 = 35 \text{ MM} \end{cases}$$
(2.16)

где: *r*₁ = 17,5 мм – внунтренний диаметр индуктора, меньший диаметр магнитов;

r₂ = 30 мм – наружный диаметр индуктора, меньший диаметр бандажа;
 r₃ = 35 мм – наружный диаметр бандажа индуктора генератора.



Рис. 2.3.1. Распределение напряжений по радиусу бандажа

Исходя из численного решения полученных уравнений возможно определить распределение радиальных и тангенциальных напряжений по радиусу бандажа при частоте вращения вала генератора 70000 об/мин. Распределение напряжений по радиусу бандажа, полученное на основании анализа разработанной математической модели механической прочности бандажа показано на рисунке 2.3.1. При этом изображены как тангенциальные напряжения, так и радиальные напряжения, действующие в бандаже.

Из графика видно, что на внутреннем диаметре бандажа происходит смятие, вследствие радиально направленного усилия со стороны магнитов. На наружном диаметре радиальные напряжения обращаются в ноль. Наибольшим из двух напряжений является тангенциальное. Для подбора материала соответствующей прочности следует оперировать эквивалентными напряжениями, для расчета которых можно воспользоваться уравнением Мизеса:

$$\sigma_{_{3\text{KB}}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2}, \qquad (2.17)$$

где, $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – главные напряжения, определяемые в порядке убывания с учетом знака. Таким образом для рассматриваемого случая:

$$\begin{cases} \sigma_1 = \sigma_t \\ \sigma_2 = 0 \\ \sigma_3 = \sigma_r \end{cases}$$
(2.18)

Максимальное эквивалентное напряжение будет наблюдаться на внутреннем диаметре бандажа и составит в данном случае 1379 МПа.

Адекватность разработанной математической модели была проверена посредством анализа методом конечных элементов в ПО Ansys Structural. Результаты проведенного анализа представлены на рисунке 2.3.2.



Рис. 2.3.2. Результаты механического расчета в среде ПО Ansys

Для материала бандажа рекомендуется высокопрочная мартенситная сталь марки 03H12K15M10 (сплав содержит компоненты Ni –12 %, Ko – 15 %, Mo – 10 %), которая имеет предел прочности 2500 Мпа при пределе текучести 2400 Мпа. Применение этой стали обеспечит прочность конструкции с учетом динамических нагрузок с двукратным запасом.

Выводы по главе

1. Разработана методика определения диаметра бандажного кольца по пределу прочности от действия центробежных сил. В методике учтены усилия, действующие на постоянные магниты и собственные напряжения бандажного кольца. По данной методике определены радиальные и тангенциальные усилия.

2. Удовлетворительная точность предложенной методики проверена методом конечных элементов. Методику можно использовать для построения системы синтеза.

3. На основании методики сделан расчет бандажа для опытного образца газотурбинной установки МГТУ 70000 об/мин. В качестве используемого материала рекомендована высокопрочная мартенситная сталь [99, 145].

3. СОЗДАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ И АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО СОСТОЯНИЯ ГЕНЕРАТОРА

Вводные замечания

Учитывая конструктивную особенность разрабатываемого генератора, заключающуюся в многосекционности, следует отметить, что существует возможность рассчитывать только одну секцию, при этом параметры всего генератора могут быть получены путем учета количества секций. При этом обмотки всех секций предлагается соединить последовательно, во избежание возникновения уравнительных токов при параллельном соединении, вследствие различного потокосцепления катушек разных секций. Приведенные методики опираются на классические методики [61, 65, 91, 134], кроме специально оговоренных случаев.

3.1. Установочный расчет секции генератора

Мощность на фазу может быть определена из полной мощности и количества фаз из следующего выражения:

$$P_{phA} = \frac{P}{m_1},\tag{3.1}$$

где: *Р* – активная мощность, потребляемая от генератора;

 m_1 – количество фаз в разрабатываемом генераторе.

Амплитудное значение линейного напряжения может быть определено через требуемое значение звена постоянного тока инвертора напряжения, достаточное для получения на выходе инвертора действующего значения линейного напряжения 380 В переменного тока.

$$Um_{line} = U_{const}.$$
 (3.2)

Действующее значение фазного напряжения может быть определено из действующего значения линейного напряжения посредством выражения:

$$Uf_{phase} = \frac{Um_{line}}{\sqrt{2}\cdot\sqrt{3}}.$$
(3.3)

Ток в фазе генератора определяется из мощности на одну фазу и определенного ранее действующего значения фазного напряжения:

$$I = \frac{P_{phA}}{Uf_{phase}}.$$
(3.4)

Сечение провода является функцией тока и плотности тока, определяемой как допустимой для разрабатываемого генератора:

$$S_{provoda} = \frac{I}{j},\tag{3.5}$$

где: *S*_{provoda} – сечение провода в кв. метрах,

I – действующее значение фазного тока (А),

 $j = 2 \cdot 10^7$ – допустимая плотность тока А/м².

Тангенциальная ширина провода рассчитана исходя из геометрии, которая ограничивает область расположения обмотки, количества витков обмотки, что является независимой переменной для математической модели и коэффициента заполнения тангенциальной длины полюсного деления:

$$A_{provoda} = \frac{K_{B_{provoda}} \frac{\pi \cdot d_{magnet}}{2 \cdot p \cdot 2}}{W_{p}},$$
(3.6)

где: *К_{Вргоvоda}* = 0,5 – коэффициент, определяющий использование тангенциальной длины половины полюсного деления, выбран предварительно, до доказательства оптимальности выбранного значения,

d_{magnet} – внутренний диаметр ротора,

р – количество пар полюсов является независимой переменной,

W_p – количество витков на один полюс также является независимой переменной.

Допустимая аксиальная высота провода может быть получена из рассчитанного ранее сечения провода и тангенциального размера провода:

$$B_{provoda} = \frac{S_{provoda}}{(A_{provoda})}.$$
(3.7)

Так как в конструкции генератора применен диамагнитный якорь, воздушный зазор в машине определяется следующим выражением:

$$\delta = 2 \cdot B_{provoda} + 2 \cdot \delta_{gap}, \tag{3.8}$$

где: $\delta_{gap} = 1$ мм – технологический зазор между полюсом и обмоткой.

3.2. Расчет рабочего потокосцепления секции генератора

Расчет рабочего потокосцепления проведен методом конечных элементов посредством Ansys. На основании полученных значений были получены аналитические зависимости методом сложных вложенных функций посредством аналитического аппарата аппроксимационных линий трендов ПО Excel.

Посредством ПО Ansys Electronic Desktop была построена и проанализирована модель одной секции генератора с одним витком, рассчитана ЭДС этого витка и потокосцепление этого витка. Модель представлена на рисунке 3.2.1. На рисунке выделена зеленым плоскость посередине воздушного зазора между магнитами, розовым выделена средняя плоскость катушки, данное положение катушки следует считать наиболее оптимальным, как будет показано ниже в этой плоскости потокосцепление выше, то есть рассеяние ниже.



Рис. 3.2.1. Расчетная параметризованная модель в ПО Ansys для расчета потокосцепления обмотки

На рисунке 3.2.2 представлена поясняющая картинка параметрической модели расчета потокосцепления витков обмотки генератора. При этом приняты технологические зазоры, равные 0,9 мм, они же будут выполнять функцию вентиляционных каналов. На рис. $3.2.2 H_mag$ – высота магнита в осевом направлении, B_wire – толщина провода в осевом направлении, в основном определяющая воздушный зазор. Таким образом, независимыми переменными приняты: толщина провода в осевом направлении, в осевом направлении и количество пар полюсов индуктора секции многосекционного генератора.



Рис. 3.2.2. Параметрическая модель расчета потокосцепления обмотки

Потокосцепление в зеленой плоскости середины немагнитного зазора обозначено – F_0 _Ansys и описывает рабочий магнитный поток машины, потокосцепление в розовой плоскости сечения катушки полюса обозначено – F_w _Ansys и описывает магнитный поток, пронизывающие витки катушек якоря генератора. Результаты расчета в указанных плоскостях при изменении величины немагнитного зазора, количества полюсов магнитной системы и толщины постоянных магнитов индуктора секции генератора сведены в таблицу 3.2.1.

	B_wire, мм	F_0_Ansys*10–6, B6	F_w_Ansys*10-6, Вб	
И 10	1	47,1	52,4	
	1,5	38,5	44,2	
	2	31,2	37,7	
$n_{mag} = 10 \text{ mm},$ 2n - 14	2,5	26	32,7	
2p - 14	3	21,3	28,2	
	3,5	18	24,7	
	4	14,7	22	
	1	58,6	64,8	
	1,5	48,7	55,1	
$H_{mag} = 10 mm$	2	40,5	47,9	
$n_{mag} = 10 \text{ mm},$ 2n = 12	2,5	34,1	41,3	
2p - 12	3	28,2	36,1	
	3,5	23,6	32,2	
	4	20,2	28,4	
	1	75,6	82,8	
	1,5	63,4	70,8	
$H_{mag} = 10 \text{mm}$	2	53,3	61,4	
$n_{mag} = 10 \text{ mm},$ 2n = 10	2,5	45,6	54	
2p - 10	3	38,8	47,5	
	3,5	33,1	42,2	
	4	28,4	38,2	
	1	101,1	109	
	1,5	85,3	94,4	
$H_{mag} = 10 mm$	2	73,3	82,6	
2n - 8	2,5	63	72,8	
2p = 0	3	54	64,4	
	3,5	46,7	57,9	
	4	41	52,8	

Таблица 3.2.1. Результаты анализа потокосцепления при изменении величины немагнитного зазора и количества полюсов магнитной системы

Продолжение таблицы 3.2.1

$H_mag = 10 mm,$ $2p = 6$	1	143,3	153
	1,5	122,8	133,5
	2	105,7	118,1
	2,5	92,2	104,4
	3	79,9	94
	3,5	70,2	84,9
	4	61,1	76,1
	1	227,3	241,7
	1,5	196,7	212,3
	2	172,5	188,7
$H_{mag} = 10 \text{ mm},$ $2n - 4$	2,5	150,7	168,8
2p – 4	3	132,1	151,6
	3,5	117	136,8
	4	103,6	124,9
H_mag = 10 mm, 2p = 2	1	481,4	506,6
	1,5	421,3	448,7
	2	370,7	401
	2,5	326,7	361
	3	289,8	325,2
	3,5	257,2	295,4
	4	229,2	269,3

На основе полученных данных были построены зависимости потокосцепления в особенно интересующем нас сечении витка (розовая плоскость) от параметров магнитной системы индуктора генератора, которые могут изменяться в процессе проектирования аксиального генератора с диамагнитным якорем под конкретную задачу.



Рис. 3.2.3. Зависимость потокосцепления от осевой толщины магнита при некоторых фиксированных значениях осевой толщины провода и количества полюсов

Из рисунка 3.2.3 видно, что вне зависимости от количества полюсов и толщины провода (воздушного зазора) вид кривой, характеризующей зависимость потокосцепления от осевой толщины магнита, не изменяется, изменяются лишь коэффициенты в уравнении, описывающем зависимость. Отсюда становится доступным вывод о возможности сравнительно простого описания имеющейся зависимости без необходимости применения конечноэлементного метода для аналитического описания зависимости потокосцепления от осевой толщины магнита.

Также следует отметить, что существует оптимальное значение толщины магнита, так как эффективность увеличения осевой толщины магнита, строго говоря, не всегда приводит к равноценному увеличению потокосцепления. Таким образом, является возможным поиск оптимального решения полевой задачи для разрабатываемого генератора как минимум по толщине магнита в осевом направлении.



Рис. 3.2.4. Зависимость потокосцепления витка обмотки секции генератора от осевой толщины провода при некоторых фиксированных значениях количества полюсов и осевой толщины магнита

Зависимость потокосцепления витка от осевой толщины провода представлена на рисунке 3.2.4. Из рисунка можно заметить, что при значении толщины провода равным нулю, значение потокосцепления стремится к фиксированному значению, что является объяснимым и понятным. Значение потокосцепления в таком случае ровняется значению потока замкнутой магнитной цепи и соответствует значению потока на поверхности магнитов. Следует отметить, что увеличение осевой толщины провода, являющееся предпочтительным с точки зрения электрических потерь, является нежелательным с точки зрения оптимальности магнитной системы, так как при бесконечном удалении магнитов друг от друга потокосцепление становится равным нулю.

Зависимость потокосцепления витка катушки якоря аксиального генератора от количества полюсов в секции генератора представлено на рисунке 3.2.5.

Из рисунка видно, что увеличение количества полюсов секции генератора приводит к уменьшению потокосцепления, однако зависимость эта является нелинейной. Это означает, что также существует оптимальное значение количества полюсов, и оно не обязательно должно быть равным 2 с точки зрения КПД всего генератора. Ввиду снижения коэффициента использования обмоточного провода при уменьшении количества полюсов и одновременном повышении потокосцепления, следует вывод о необходимости проведения отдельного исследования по поиску оптимальных значений параметров магнитной системы из условия максимума потокосцепления и допустимого значения коэффициента полезного действия машины. При этом следует отметить, что определение оптимальных значений параметров модели не является целью настоящего исследования.



Рис. 3.2.5. Зависимость потокосцепления витка обмотки секции генератора от количества полюсов при некоторых фиксированных значениях осевой толщины провода и осевой толщины магнита Взяв за опорное выражение зависимости потокосцепления от осевой толщины магнита становится возможным записать общую формулу уравнения данной зависимости, опираясь на проведенный анализ аппроксимационной кривой зависимости, полученной ранее:

$$F_w Ansys = AB \cdot e^{BB \cdot B_wire}.$$
 (3.9)

Из полученного выражения видно, что существует два коэффициента, которые, в свою очередь, являются зависимыми от осевой толщины магнита и количества полюсов магнитной системы секции генератора. Исследуя указанные зависимости были получены значения коэффициентов при различных значениях осевой толщины магнита и количества полюсов. Значения коэффициента AB сведены в таблицу 3.2.2.

Таблица 3.2.2. Вариации значений коэффициента AB от количества полюсов и осевой толщины магнита

AB	Количество полюсов магнитной системы						
H_mag	2	4	6	8	10	12	14
2	477,17	234,07	151,36	110,63	85,92	69,79	58,30
4	573,79	277,68	177,73	129,27	99,63	80,29	66,21
6	601,72	289,36	186,88	134,19	103,33	83,40	68,29
8	611,47	294,70	188,11	135,13	104,45	83,10	68,73
10	615,94	295,89	189,13	135,88	104,50	83,39	68,37

Аналогично были получены значения коэффициента ВВ в зависимости от осевой толщины магнита и количества полюсов секции генератора. Значения сведены в таблицу 3.2.3.

BB	Количество полюсов магнитной системы							
H_mag	2	4	6	8	10	12	14	
2	-0,24	-0,26	-0,26	-0,27	-0,28	-0,29	-0,31	
4	-0,22	-0,23	-0,24	-0,25	-0,26	-0,28	-0,29	
6	-0,21	-0,22	-0,24	-0,25	-0,26	-0,28	-0,29	
8	-0,21	-0,22	-0,23	-0,24	-0,26	-0,27	-0,29	
10	-0,21	-0,22	-0,23	-0,24	-0,26	-0,27	-0,29	

Таблица 3.2.3. Вариации значений коэффициента АВ от количества полюсов и осевой толщины магнита

Опираясь на полученные значения, становится возможным выполнить графическое отображение зависимостей коэффициентов от параметрических переменных рассчитываемой магнитной системы.

График зависимости коэффициента AB от количества пар полюсов магнитной системы представлен на рисунке 3.2.6.

График зависимости коэффициента BB от количества пар полюсов магнитной системы при фиксированных значениях осевой толщины магнита представлен на рисунке 3.2.7.

Из полученных графиков видно, что форма зависимости коэффициентов от количества пар полюсов является неизменной, аналогично предыдущему исследованию изменяются лишь коэффициенты уравнений, отражающих полученные зависимости. Таким образом, становится возможным определить зависимость коэффициентов уравнений от оставшегося параметра исследуемой модели осевой толщины магнитов.

Таким образом, используя встроенную функцию построения линий тренда графиков в ПО MS Excel становится возможным упрощение получения аппроксимационных зависимостей, опирающихся на набор значений функции в зависимости от изменения различных параметров системы. Как показано ниже данный метод обеспечивает сравнительно высокую точность получаемых аналитических выражений.



Рис. 3.2.6. Графическое изображение зависимости значения коэффициента АВ от количества пар полюсов магнитной системы при фиксированных значениях осевой толщины магнита



Рис. 3.2.7. Графическое изображение зависимости значения коэффициента ВВ от количества пар полюсов магнитной системы при фиксированных значениях осевой толщины магнита

Уравнение зависимости коэффициента AB от количества пар полюсов может быть выражено в следующем виде:

$$AB(p) = A2p1 \cdot p^{A2p2}.$$
 (3.10)

Уравнение зависимости коэффициента ВВ от количества пар полюсов может быть выражено в следующем виде:

$$BB(p) = B2p1 \cdot p + B2p2.$$
 (3.11)

Вариации значений коэффициентов A2p1, A2p2, B2p1, B2p2 в зависимости от осевой толщины магнитов сведены в таблицу 3.2.4.

Таблица 3.2.4. Вариации значений коэффициентов A2p1, A2p2, в зависимости от осевой толщины магнитов

H_mag	2	4	6	8	10
A2p1	487,56	588,52	618,19	629,6	634,86
A2p2	-1,08	-1,11	-1,12	-1,12	-1,13
B2p1	-0,0098	-0,0116	-0,0134	-0,0135	-0,0134
B2p2	-0,2336	-0,2066	-0,1956	-0,1934	-0,1930

На основании поля полученных значений становится возможным построить графическое отображение зависимостей коэффициентов от осевой толщины магнита. Зависимость коэффициента *A2p1* от осевой толщины магнита представлена на рисунке 3.2.8.

Следует отметить важность низкой погрешности определения зависимости коэффициента A2p2 от осевой толщины магнита ввиду расположения данного коэффициента в степени степенной функции зависимости коэффициента AB. Что означает, в свою очередь, что при отклонении коэффициента A2p2 от действительного значения, к примеру, на 10%,

отклонение коэффициента *AB* от действительного составит значение, равное значению основания в степени 0,1. Таким образом, в перспективе, возможно более целесообразным станет переход от абсолютных значений коэффициентов к относительным, для изменения их в пределах от 0 до 1 и, как следствие, снижения влияния неточности определения аппроксимационных зависимостей на конечный результат.



Рис. 3.2.8. Зависимость коэффициента А2р1 от осевой толщины магнита

Графическое отображение зависимости коэффициента *A2p2* представлено на рисунке 3.2.9.

Для полученного графического отображения исследуемой зависимости также получено аналитическое описание посредством линий тренда в MS Excel. Полученные аналитические зависимости в достаточной степени коррелируют с графиком, построенным с упором на ранее полученный набор значений функции от предложенных переменных.



Рис. 3.2.9. Зависимость коэффициента А2р2 от осевой толщины магнита

Зависимость коэффициента B2p1 от осевой толщины магнита показана на рисунке 3.2.10.



Рис. 3.2.10. Зависимость коэффициента В2р1 от осевой толщины магнита



Рис. 3.2.11. Зависимость коэффициента В2р2 от осевой толщины магнита

Зависимость коэффициента *B2p2* от осевой толщины магнита показана на рисунке 3.2.11.

Таким образом были получены выражения для определения потокосцепления каждого витка катушки генератора:

$$\begin{cases} B2_{p1} = 0,0001 \cdot H^2 - 0,0016 \cdot H - 0,0069; \\ A2_{p1} = 92,035 \cdot \ln(H) + 439,83; \\ A2_{p2} = -0,028 \cdot \ln(H) - 1,0641; \\ B2_{p2} = -0,0011 \cdot H^2 + 0,018 \cdot H - 0,2638; \\ AB = A2_{p1} \cdot p^{A2_{p2}}; \\ BB = B2_{p1} \cdot p + B2_{p2}; \\ F_{w_{max}} = AB \cdot e^{BB \cdot B} \cdot 10^{-6}. \end{cases}$$
(3.12)

Полученные выражения однозначно определяют зависимость потокосцепления витков обмотки генератора от толщины магнитов, аксиальной

ширины провода обмотки и количества пар полюсов. Так как значение потокосцепления в проведенном исследовании рассчитывалось в неподвижном состоянии ротора, значит полученные значения являются максимальными при переводе результатов анализа неподвижной модели к вращающейся. Представленная математическая модель расчета магнитной системы генератора обеспечивает погрешность ±10%.

3.3. Расчет параметров секции

Исходя из выбранных переменных и рассчитанных ранее параметров, становится возможным определить характеристики одной секции генератора.

Частота изменения магнитного потока может быть определена по известной формуле:

$$f = \frac{p \cdot n}{60}.\tag{3.13}$$

Количество витков в одной секции зависит от выбранного ранее количества витков на каждый полюс:

$$W = W_p \cdot 2 \cdot p \cdot 2. \tag{3.14}$$

Действующее значение потокосцепления витка секции, Вб

$$F_{w_{rms}} = F_{w_{max}}.$$
(3.15)

Индукция в воздушном зазоре, Тл

$$B_{\delta} = \frac{F_{w_{rms}}}{\left[\frac{\left(\pi \cdot D_{magnet}^{2}\right) - \pi \cdot d_{magnet}^{2}}{4}\right]},$$
(3.16)

ЭДС одной секции, В

$$E1 = 4,44 \cdot f \cdot W \cdot F_{W_{rms}}.$$
(3.17)

Длина активного проводника, м

$$L_{active} = \frac{D_{magnet} - d_{magnet}}{2}.$$
 (3.18)

Длина лобовой части, м

$$L_{nonactive} = \frac{\pi \cdot D_{magnet}}{2 \cdot p} + \frac{\pi \cdot d_{magnet}}{2 \cdot p}.$$
 (3.19)

Коэффициент, учитывающий увеличение длины лобовой части с увеличением диаметра расположения лобовой части при намотке катушек, вместо расчета среднего диаметра: $K_{nonactive} = 1,2$.

Длина одного витка секции, м:

$$L_{coil_{average}} = 2 \cdot L_{active} + L_{nonactive} \cdot K_{nonactive}.$$
 (3.20)

3.4. Расчет параметров генератора

Количество секций в фазе генератора может быть рассчитано из требуемого действующего напряжения в фазе и действующего значения ЭДС, наводимого в одном витке якорной обмотки генератора, при этом полученное значение следует округлить до целого числа в большую сторону:

$$N = round\left(\frac{Uf_{phase}}{E1}, 0\right). \tag{3.21}$$

Индукция в спинке ярма может быть выбрана из общих рекомендаций машиностроительной литературы *B*_{armature} = 1,6 Тл.

Толщина спинки блинчика, замыкающего поток магнитов, может быть определена из заданной индукции в спинке ярма:

$$b_{armature} = \frac{F_{w_{max}}}{2 \cdot B_{armature} \cdot \frac{D_{magnet} - d_{magnet}}{2}}.$$
(3.22)

Осевая длина одной секции может быть определена из выражения:

$$L_{section} = b_{armature} + 2 \cdot H_{magnet} + \delta.$$
(3.23)

Длина генератора определяется:

$$L_{generator} = L_{section} \cdot N \cdot m_1. \tag{3.24}$$

Длина проводника обмотки одной фазы может быть рассчитана:

$$L_{phA} = W \cdot N \cdot L_{coil_{average}}.$$
(3.25)

Сопротивление проводов фазы возможно записать как:

$$R_{phA} = \frac{\rho_{el_{copper}} \cdot L_{phA}}{S_{provoda}}.$$
(3.26)

Проводимость для расчета индуктивности катушки записывается в форме:

$$\Lambda = \frac{1}{\frac{2\cdot(\delta+2\cdot H_{magnet})}{\mu_{0}\cdot\left[\frac{\left(\pi\cdot D_{magnet}^{2}\right)}{4}-\frac{\pi\cdot d_{magnet}^{2}}{4}\right]\cdot_{0,7}}}.$$
(3.27)

Индуктивность катушки полюса может быть рассчитана выражением:

$$L_{one_{coil}} = 2 \cdot W_p^2 \cdot \wedge \cdot \frac{N \cdot 2 \cdot p}{N \cdot 2 \cdot p}.$$
(3.28)

Индуктивность фазы определяется выражением [6]:

$$L_{phA} = 2 \cdot W_p^2 \cdot \wedge \cdot N \cdot 2 \cdot p. \tag{3.29}$$

Индуктивное сопротивление фазы запишется уравнением:

$$x_{L_{phA}} = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_{phA}. \tag{3.30}$$

Полное сопротивление фазы генератора определяется выражением:

$$z_{phA} = \sqrt{\left(\frac{R_{phA}}{N}\right)^2 + \left(\frac{x_{L_{phA}}}{N}\right)^2}.$$
 (3.31)

Действующее значение фазного напряжения под нагрузкой:

$$Uf = E1 - I \cdot z_{phA}. \tag{3.32}$$

Исходя из проведенного электромагнитного расчета параметров генератора определяется вид внешней характеристики генератора с учетом внутренних активных и индуктивных сопротивлений фазных обмоток генератора. Зависимость выпрямленного напряжения генератора без учета падения напряжения на выпрямителе от тока нагрузки представлена на рисунке 3.4.1.



Рис. 3.4.1. Зависимость выпрямленного напряжения генератора от тока нагрузки

Электрические потери в генераторе состоят из потерь в обмотке:

$$P_{electric_{loss}} = I^2 \cdot R_{phA} \cdot m_1. \tag{3.33}$$

Масса магнитов может быть определена:

$$m_{magnets} = \rho_{m_{steel}} \cdot \left(\frac{\pi \cdot D_{magnet}^2}{4} - \frac{\pi \cdot d_{magnet}^2}{4}\right) \cdot H_{magnet} \cdot 2 \cdot N \cdot m_1.$$
(3.34)

Масса боковушек для замыкания потока магнитов:

$$m_{armature} = \rho_{m_{steel}} \cdot \left(\frac{\pi \cdot D_{magnet}^2}{4}\right) \cdot b_{armature} \cdot 2 \cdot N \cdot m_1.$$
(3.35)

Масса бандажей:

$$m_{band} = \rho_{m_{steel}} \cdot \left(\frac{\pi \cdot D_{band}^2}{4} - \frac{\pi \cdot D_{magnet}^2}{4}\right) \cdot H_{magnet} \cdot 2 \cdot N \cdot m_1. \quad (3.36)$$

Масса вала:

$$m_{shaft} = \rho_{m_{steel}} \cdot \frac{\pi \cdot d_{magnet}^2}{4} \cdot L_{generator} \cdot 1,3.$$
(3.37)

Масса обмотки генератора:

$$m_{winding} = m_{m_{copper}} \cdot S_{provoda} \cdot L_{phA} \cdot m_1. \tag{3.38}$$

Масса вращающихся частей:

$$m_{rotating} = m_{magnets} + m_{armature} + m_{band} + m_{shaft}.$$
 (3.39)

Таким образом, рассчитаны параметры разрабатываемого генератора, в том числе массы активных материалов.

Масса вращающихся частей генератора требуется для поверочного расчета комбинированного подвеса, являющегося частью предлагаемого генератора.

3.5. Поверочный расчет электромагнитного состояния в ПО Ansys

Метод аппроксимации сложными вложенными функциями является методом, который основан на аппроксимации реальных зависимостей линиями тренда. Аппроксимация любой функции связана с погрешностью, которую необходимо оценить. В качестве эталона для сравнения был выбран метод конечных элементов [87], реализованный в программе Ansys Electronic Desktop. Практика использования этой программы показала, что она достаточно точно определяет параметры магнитного поля при корректном задании материалов и граничных условий.

В целях проверки адекватности созданной математической модели разрабатываемого генератора была использована эта программа.

Для анализа магнитного поля была выбрана магнитная цепь одной секции и режим расчета Transient. В виду отсутствия плоской симметрии для расчета была выбрана трёхмерная модель расчета. Этот выбор был определен еще и тем, что магнитная система имеет большие потоки рассеяния, которые необходимо учитывать при определении рабочего магнитного потока. В модель были заложены характеристики реального высококоэрцитивного материала неодимжелезо-бор NEO35.



Рис. 3.5.1. Картина магнитного поля в исследуемом генераторе

Для определения параметров поля был использован встроенный в программу калькулятор. Расчеты были выполнены для магнитных систем с
разным числом пар полюсов. Картина магнитного поля и его параметры для четырехполюсной магнитной системы представлена на рисунке 3.5.1. На ней хорошо видны потоки рассеяния и участки насыщения в торцах постоянных магнитов. В качестве критерия адекватности аппроксимационной модели была выбрана ЭДС секции якоря.

Из рисунка 3.5.1 можно отметить, что отсутствуют превышения значений индукции в ярме индуктора допустимых значений, рекомендованных в классических методиках проектирования электрических машин. Таким образом, отсутствует избыточное расходование намагничивающей силы на преодоление ферромагнитного участка магнитной цепи, при этом обеспечивается рациональное расходование активных материалов индуктора секции генератора.

Осциллограмма ЭДС одной секции генератора и тока нагрузки представлена на рисунке 3.5.2.



Рис. 3.5.2. Осциллограмма ЭДС одной секции генератора и тока нагрузки

На основании проведенного анализа следует вывод о корректности разработанной математической модели. Погрешность расчета ЭДС составляет 10%

Выводы по главе

1. Разработана математическая модель анализа электромагнитного состояния секции генератора на постоянных магнитах с аксиальным магнитным потоком и диамагнитным якорем. Данная модель является основой оптимизационных циклов системы синтеза.

2. Показана эффективность применения метода сложных вложенных функций для аналитического описания потокосцепления обмотки якоря. Получены аналитические зависимости потокосцепления секции обмотки якоря, при этом коэффициенты при переменных в зависимостях принимались функциями других переменных, влияющих на потокосцепление, что позволило повысить точность аппроксимации. Методика включена в систему анализа аксиального генератора.

3. Разработанная математическая модель проверена посредством анализа электромагнитного состояния секции генератора методом конечных элементов посредством ПО Ansys Electronic Desktop и получена погрешность, не превышающая 10%.

4. РАЗРАБОТКА МЕТОДИК АНАЛИЗА ТЕПЛОВОГО СОСТОЯНИЯ И ВЕНТИЛЯЦИОННОГО РАСЧЕТА

Вводные замечания

Разработка математической модели анализа теплового состояния генератора на постоянных магнитах с аксиальным магнитным потоком и диамагнитным якорем проводится на основе существующих методик расчета [61] общей методом тепловых схем замещения ИЗ теории электромашиностроения.

Разработка математической модели вентиляционного расчета проводится на основе существующих методик расчета [61], описанных для классических типов электрических машин с некоторыми уточнениями, касающимися конструктивных особенностей примененного типа электрической машины.

Учитывая, что все секции генератора являются полностью идентичными и находятся примерно в одинаковых условиях охлаждения и вентиляции, становится возможным исследовать не весь генератор целиком, а одну его секцию с распространением результатов анализа на весь генератор.

4.1. Разработка тепловой схемы замещения секции генератора с аксиальным магнитным потоком и диамагнитным якорем

Для построения тепловой схемы замещения следует рассмотреть поверхности, соприкасающиеся с охлаждающим воздухом. В соответствии с ранее описанной конструкцией предлагаемого генератора предполагается прохождение охлаждающего воздуха по радиальным охлаждающим каналам, образованным обмоткой, являющейся частью диамагнитного якоря, и торцевой поверхностью вращающегося индуктора. Таким образом предполагается соприкосновение охлаждающего воздуха непосредственно с поверхностью обмотки, которое не составит труда сделать без промежуточных сред для прохождения теплового потока. Значит, при анализе теплового состояния

становится возможным провести оценку коэффициента теплопередачи с поверхности обмотки непосредственно в охлаждающий воздух. При этом подобная оценку возможно считать обеспечивающей достаточную точность, ввиду несущественного снижения теплового сопротивления прохождению теплового потока при учете схода тепла с обмотки в охлаждающий воздух посредством компаунда, окружающего радиальные поверхности провода. Таким образом, предлагаемый расчет учитывает наиболее нагруженный в тепловом отношении способ анализа теплового состояния генератора.

На рисунке 4.1.1 представлена модель обмотки.



Рис. 4.1.1. Модель обмотки аксиального генератора с диамагнитным якорем

Следует отметить, что не вся поверхность обмотки контактирует с охлаждающей средой непосредственно. Обмотка заливается компаундом в монолит в целях обеспечения механической связи между катушечными группами и реализации возможности кассетного исполнения обмотки для упрощения технологии сборки.

Модель залитой в монолит обмотки представлена на рисунке 4.1.2.



Рис. 4.1.2. Модель обмотки секции генератора залитой в монолит компаундом

Из представленного рисунка можно отметить поверхности, которые при обдуве данной секции охлаждающим воздухом, непосредственно контактируют с охлаждающим воздухом. Как уже было сказано, радиальные поверхности обмотки можно не учитывать, ввиду несущественности их влияния на снижение сопротивления теплопередачи от обмотки в охлаждающий агент. На основании изложенного поверхности теплопередачи обмотки в охлаждающий воздух могут быть определены так, как изображено на рисунке 4.1.3. Следует отметить, что поверхность охлаждения выделена на рисунке черным цветом.



Рис. 4.1.3. Выделение поверхности охлаждения обмотки якоря генератора

Следует отметить, что ввиду вращения индуктора генератора вблизи (порядка 0,8 мм) обмоток, требуется учесть изменение скорости воздушного потока, обдувающего поверхность обмоток, на соответствующих участках охлаждения. Таким образом предлагается, на участках, где направление линейной скорости индуктора совпадает с направлением скорости создаваемого потока, сложить скорости, пренебрегая проскальзыванием воздушных масс относительно поверхности обмотки. При этом на участках, на которых линейная скорость поверхности индуктора не совпадает с направлением основного создаваемого воздушного потока предлагается вычесть линейную скорость индуктора из скорости основного воздушного потока.

На основании определенного способа передачи тепла от обмотки в охлаждающий воздух схема замещения будет определена как изображено на рисунке 4.1.4.



Рис. 4.1.4. Тепловая схема замещения секции генератора

4.2. Разработка математической модели теплового расчета секции аксиального генератора с диамагнитным якорем

Основная особенность предлагаемой конструкции аксиального генератора заключается в том, что единственными существенными потерями являются электрические потери. Как было описано выше тепловая схема замещения состоит из сопротивления теплопередачи тепловой энергии в охлаждающий воздух. Для расчета одной секции генератора следует рассчитать электрические потери на одну секцию:

$$P_{loss_one_section} = \frac{P_{loss}}{N}.$$
(4.1)

Так как охлаждающий воздух снимает тепло непосредственно с обмотки, необходимо рассчитать сопротивление теплосъема с поверхности обмотки. Уравнение для расчета теплосъема с поверхности обмотки заимствовано из методик тепловых расчетов классических электрических машин. Следует отметить, что применение стандартных методик теплового анализа методом схем замещения показало низкую точность при проведении сравнения с результатами анализа методом конечных элементов. Причина высокой погрешности заключается в том, что стандартные методики не учитывают повышение коэффициента теплоотдачи с поверхности вследствие изменения скорости передвижения воздушных масс, вызванного вращением вблизи обмоток индуктора. Таким образом следует разделить область съема тепловой энергии на две части. В первой части скорость будет увеличиваться, ввиду подхватывания потоков воздуха вращающимся в ту же сторону индуктором. Во второй же части напротив, скорость движения воздуха будет снижаться. Коэффициент теплоотдачи с поверхности обмотки определяется по следующей формуле:

$$\alpha = 13.5 \cdot (1 + k0 \cdot \nu), \tag{4.2}$$

где: k0 = 0,1 - коэффициент теплоотдачи по Копылову, $\nu - линейная$ скорость воздуха относительно поверхности обмотки. При этом скорость воздуха в первой части области теплосъема может быть определена из следующего выражения:

$$\nu_{outer} = \nu + \pi \frac{D_{magnet} + d_{magnet}}{2} \frac{n}{60}.$$
(4.3)

Скорость воздуха во второй части области теплосъема может быть определена из следующего выражения:

$$\nu_{inner} = \left| \nu - \pi \frac{D_{magnet} + d_{magnet}}{2} \frac{n}{60} \right|. \tag{4.4}$$

Исходя из пересчитанных скоростей движения воздушного потока возможно определить коэффициенты теплосъема в первой и второй части:

$$\begin{cases} \alpha_{outer} = 13,5 \cdot (1 + k0 \cdot \nu_{outer}) \\ \alpha_{inner} = 13,5 \cdot (1 + k0 \cdot \nu_{inner}). \end{cases}$$
(4.5)

Поверхность охлаждения одной части одной секции можно определить по следующему выражению, описывающему контактирующую с охлаждающим воздухом поверхность обмотки якоря генератора:

$$S_{cooling_{one_{section}}} = A_{provoda} \cdot L_{coil_{average}} \cdot W_p \cdot 2 \cdot p.$$
(4.6)

Сопротивление теплоотдачи одной части поверхности обмотки определяется на основании общего выражения, определяющего зависимость от контактной площади и коэффициента теплоотдачи поверхности:

$$R_{heat_face_1} = \frac{1}{\alpha_{outer} \cdot S_{cooling_one_section}}.$$
(4.7)

Сопротивление теплоотдачи второй части поверхности обмотки:

$$R_{heat_face_2} = \frac{1}{\alpha_{outer} \cdot S_{cooling_one_section}}.$$
(4.8)

Превышение температуры обмотки над температурой охлаждающего воздуха возможно определить, опираясь на известное выражение:

$$\Delta \theta_{between_coil_air} = P_{one_section} \cdot \frac{R_{heat_face_1} \cdot R_{heat_face_2}}{R_{heat_face_1} + R_{heat_face_2}}.$$
(4.9)

4

Опираясь на полученные значения превышения температуры обмотки над температурой охлаждающего воздуха возможно сделать вывод о допустимости рассчитанной температуры, о необходимом классе нагревостойкости изоляции, а также оценить корректность проведенного электромагнитного расчета.

Точность разработанной методики анализа теплового состояния аксиального генератора с диамагнитным якорем была проверена методом конечных элементов в среде программного обеспечения Ansys Fluent (рис. 4.2.1).



Рис. 4.2.1 Анализ теплового состояния генератора в ПО Ansys Fluent

Сравнение результатов, полученных анализом разработанной методики теплового расчета и методом конечных элементов показало, что погрешность разработанной методики составляет не более 5%.

4.3. Описание схемы замещения для математической модели анализа вентиляционного расчета секции генератора

Охлаждающим агентом предлагается использовать воздух, исходя из простоты и доступности данного способа охлаждения. В связи с тем, что в микро газотурбинных установках холодный воздух имеется в наличии, следует поверочный вентиляционный провести ЛИШЬ расчет ПО определению необходимого напора охлаждающего агента для обеспечения требуемого расхода воздуха, который в последствии будет использован разработчиками газотурбинных энергетических установок для определения сечений каналов подачи охлаждающего воздуха для исключения избыточной подачи охлаждающего агента и повышения вентиляционных потерь в общей системе объекта. При этом конструкция и форма подающего воздушного канала охлаждающего воздуха также является задачей разработчиков финального изделия, так как наиболее полно определяющим фактором конфигурации такого компоновка самой газотурбинной воздухопровода является микро энергоустановки. Таким образом, при создании математической модели вентиляционного расчета генератора были учтены каналы движения охлаждающего воздуха внутри секции генератора, а также захода воздуха.

Для определения параметров аэродинамических характеристик вентиляционного канала охлаждения секции генератора следует рассмотреть схему предлагаемого охлаждения обмотки одной секции. При этом прохождение воздуха предполагается через воздушный зазор между обмоткой секции генератора и вращающимся индуктором. Данный зазор имеется по обе стороны от обмотки Схема подачи воздуха представлена на рисунке 4.3.1.



Рис. 4.3.1. Схема подачи охлаждающего воздуха в секцию генератора

Схема движения воздуха в сечении канала охлаждения генератора представлена на рисунке 4.3.2. Из схемы следует отметить, что при расчете следует учесть сопротивление входа охлаждающего воздуха в вентиляционный канал, а также аэродинамическое сопротивление прохождения охлаждающего воздуха через вентиляционный канал, образованный торцевой поверхностью секции обмотки и вращающимся индуктором (равно торцевой поверхностью статора). При этом поверхности соприкосновения охлаждающего воздуха с поверхностями охлаждения приняты гладкими, так как обмотка заливается в монолит компаундом и не имеет перепадов поверхности обмотки относительно поверхности заливочного компаунда. Данное допущение близко и легко реализуемо на натурном образце, при этом не вносит существенной погрешности в вентиляционный расчет при заданной скорости воздуха.



Рис. 4.3.2. Схема движения воздуха в вентиляционном канале

Исходя из описанной схемы движения воздуха в вентиляционном канале секции генератора становится возможным описать схему замещения для расчета системы охлаждения, представленную на рисунке 4.3.3.



Рис. 4.3.3. Схема замещения вентиляционного расчета секции генератора

4.4. Разработка математической модели вентиляционного расчета секции аксиального генератора с диамагнитным якорем

Разработка математической модели проводится на основании полученной схемы замещения вентиляционного расчета.

Сечение входа канала охлаждения может быть определено следующим выражением:

$$S_{in} = \delta_{gap} \cdot D_{band} \cdot 1,4. \tag{4.10}$$

Объем прокачиваемого через входной канал воздуха можно выразить следующим выражением:

$$V_{in} = \nu \cdot S_{in}. \tag{4.11}$$

Сечение верхней части канала между стенкой секции статора и валом можно определить следующим выражением:

$$S_{outer} = \delta_{gap} \cdot \left(D_{band} - d_{shaft} \right) \cdot 1,4. \tag{4.12}$$

Объем воздуха, продуваемого через полученный канал можно выразить:

$$V_{outer} = v_{outer} \cdot S_{outer}. \tag{4.13}$$

Сечение выходного канала:

$$S_{out} = \delta_{gap} \cdot D_{band} \cdot 1,4.$$
 (4.14)

Объем воздуха выходного канала:

$$V_{out} = \nu \cdot S_{out}. \tag{4.15}$$

Сечение нижней части канала между стенкой секции статора и валом:

$$S_{inner} = \delta_{gap} \cdot \left(D_{band} - d_{shaft} \right) \cdot 1,4. \tag{4.16}$$

Объем воздуха, продуваемого через полученный канал:

$$V_{inner} = \nu \cdot S_{inner}. \tag{4.17}$$

Эквивалентные диаметры полученных прямоугольных каналов могут быть записаны следующими выражениями, опирающимися на известные выражения эквивалентных диаметров прямоугольных вентиляционных каналов, описанных в классических методиках вентиляционных расчетов методом схем замещения:

$$\begin{cases} d_{eqv_in} = \frac{2 \cdot \delta_{gap} \cdot D_{band} \cdot 1, 4}{\delta_{gap} + D_{band}}; \\ d_{eqv_outer} = \frac{\delta_{gap} \cdot \left(\frac{D_{band}}{2} - d_{shaft}\right)}{\delta_{gap} + \left(\frac{D_{band}}{2} - d_{shaft}\right)}; \\ d_{eqv_out} = \frac{2 \cdot \delta_{gap} \cdot D_{band} \cdot 1, 4}{\delta_{gap} + D_{band}}; \\ d_{eqv_inner} = \frac{\delta_{gap} \cdot \left(\frac{D_{band}}{2} - d_{shaft}\right)}{\delta_{gap} + \left(\frac{D_{band}}{2} - d_{shaft}\right)}. \end{cases}$$
(4.18)

Опираясь на выражения эквивалентных диаметров, записанных для различных участков вентиляционного канала предлагаемого генератора, становится возможным записать выражения для коэффициентов аэродинамического сопротивления трения воздуха о стенки выделенных каналов системы охлаждения:

$$\begin{cases} \xi_{in} = 0.05 \frac{D_{band} - \frac{d_{shaft}}{2}}{d_{eqv_{in}}};\\ \xi_{outer} = 0.05 \frac{\frac{d_{shaft}}{2}}{d_{eqv_{outer}}};\\ \xi_{out} = 0.05 \frac{D_{band} - \frac{d_{shaft}}{2}}{d_{eqv_{out}}};\\ \xi_{inner} = 0.05 \frac{\frac{d_{shaft}}{2}}{d_{eqv_{out}}}. \end{cases}$$
(4.19)

Таким образом, аэродинамические сопротивления могут быть записаны:

$$\begin{cases}
Z_{in} = \frac{\xi_{in}}{2 \cdot \rho_{air} \cdot S_{in}}; \\
Z_{outer} = \frac{\xi_{outer}}{2 \cdot \rho_{air} \cdot S_{outer}}; \\
Z_{out} = \frac{\xi_{outer}}{2 \cdot \rho_{air} \cdot S_{out}}; \\
Z_{inner} = \frac{\xi_{in}}{2 \cdot \rho_{air} \cdot S_{inner}}.
\end{cases}$$
(4.20)

Исходя из схемы замещения вентиляционного расчета возможно записать выражение для расчета давления, требуемого от нагнетательного элемента:

$$H_{required} = Z_{in} \cdot V_{in}^{2} + \frac{Z_{inner} \cdot Z_{outer}}{Z_{inner} + Z_{outer}} \cdot V_{in}^{2} + Z_{out} \cdot V_{out}^{2}.$$
(4.21)

Таким образом было получено выражение для определения требуемого напора нагнетательного элемента для создания достаточного расхода воздуха в вентиляционных каналах многосекционного генератора на постоянных магнитах с аксиальным магнитным потоком и диамагнитным якорем. Полученная математическая модель позволяет аналитически определять требования к нагнетательному элементу из состава микро газотурбинной установки в обеспечение требуемого перепада температуры обмотки.



Рис. 4.3.4 Результаты анализа скоростей воздушного потока в вентиляционном канале аксиального генератора

Также была проверена погрешность разработанной математической модели вентиляционного расчета генератора методом конечных элементов в ПО Ansys Fluent. Результаты расчета скоростей воздушных потоков приведены на рисунке 4.3.4.

Следует отметить, что погрешность определения скоростей потоков в сечениях теплосъема с поверхности обмотки не превышает 20%. При этом аналитическое решение поставленной задачи является значительно более простым при численных расчетах в сравнении с расчетом методом конечных элементов, применяемым в ПО Ansys Fluent.

Результаты анализа методом конечных элементов распределения давлений по сечениям канала охлаждения представлены на рисунке 4.3.5.



Рис. 4.3.5 Результаты анализа распределения давлений по сечениям вентиляционного канала охлаждения аксиального генератора

Разработанная математическая модель расходится с расчетами методом конечных элементов не более чем на 5%.

Выводы по главе

1. Разработанная математическая модель теплового состояния секции аксиального генератора с диамагнитным якорем позволяет оценить допустимые нагрузки и режимы работы генератора многосекционной конструкции.

2. Осевая симметрия конструкции генератора позволяет выполнить вентиляционный расчет одной секции. Разработанная методика расчета вентиляции секции учитывает разные скорости обдува обмотки якоря за счет вращения ротора.

3. Математическая модель вентиляционного расчета секции генератора составила основу системы анализа в части оценки теплового состояния генератора.

5. ПОВЕРОЧНЫЙ РАСЧЕТ КОМБИНИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО ПОДВЕСА

Вводные замечания

В процессе проектирования генератора определяются его габаритные размеры. В свою очередь эти габаритные размеры определяют место под опоры для вращающегося ротора. Как было отмечено, высокоскоростные генераторы имеют проблемы с подшипниками. Подшипники качения при массе ротора порядка 15–20 кг не работают при скоростях выше 20000 об/мин. На практике наиболее применимы магнитные и газодинамические подшипники.

Магнитные подшипники используют электромагнитные силы для того, чтобы подвесить вращающиеся массы. Усилия магнитного подшипника зависят от величины зазора и приложенной НС магнитного поля. Они могут работать при неподвижном роторе. Но недостатком магнитных подшипников является низкая жесткость опор. При малейших динамических усилиях они отклоняются от оси и требуется значительное увеличение магнитного поля, чтобы привести ротор в состояние устойчивого равновесия. Возможно возникновение резонанса при этих колебаниях, которые зависят от частоты вращения.

Действие газодинамических подшипников основано на эффекте всплывания ротора в вязком воздушном слое при больших скоростях. Эти опоры обладают хорошей жесткостью, но при малых скоростях эффект всплывания не возникает и вал ротора подвергается сухому трению о цапфу. Это приводит к резкому нагреванию в месте контакта и выходу подшипника из строя.

В данном устройстве принято решение совместить эти два вида подшипников и сделать комбинированный подвес [146]. Такое решение исключает недостатки обоих опор и использует их преимущества.

Ниже приведена методика поверочного расчета магнитного и аэродинамического подшипников применительно к МГУ мощностью 100 кВт с частотой вращения 70000 об/мин.

5.1. Поверочный расчет электромагнитного подвеса

Предварительный анализ показывает, что магнитный подшипник должен подвесить массу не менее 15 кг. С учетом динамических нагрузок он должен быть рассчитан на усилие около 50 кг.

Так как усилие, развиваемое электромагнитом, пропорционально площади взаимодействующих поверхностей, то развитой цилиндрической для поверхности следует выбрать как можно больший диаметр вращающегося необходимо Таким образом, выполнить механический кольца. расчет внутреннего кольца предлагаемого магнитного подшипника.

Для обеспечения достаточного коэффициента запаса с учетом предела текучести электротехнической стали на уровне 300 МПа наружный диаметр внутреннего кольца активного подвеса выбран 40мм. Механический расчет проверен в ПО Ansys Structural (рисунок 5.1.1).



Рис. 5.1.1. Результат механического расчета внутренней обоймы электромагнитного подвеса

Так как аналитические методы расчета электромагнитных сил для сложных магнитных систем дают большую погрешность, для анализа магнитного подшипника был применен метод конечных элементов с использованием программного комплекса Ansys Electronic Desktop. Результат электромагнитного расчета приведен на рисунке 5.1.2 Наиболее сложными режимами для активного магнитного подвеса являются два ключевых режима работы. Во-первых, режим включения, когда электромагнит должен преодолеть удвоенный номинальный зазор между внутренним кольцом и статором. Вовторых, номинальный режим работы, при соосном положении внутреннего кольца со статором и номинальном токе. При расчете следует убедиться, что при пуске усилие, развиваемое электромагнитом, будет достаточным, чтобы поднять вращающиеся элементы конструкции до соосного положения.



Рис. 5.1.2. Результаты расчета магнитного поля активного магнитного подвеса при соосном расположении внутреннего кольца и статора, при номинальном токе в обмотках 40 А

Во втором режиме работы необходимо убедиться в сохранении быстродействия электромагнитного подвеса для обеспечения отработки колебаний, возникающих в системе. Увеличение рабочего зазора с одной стороны позволяет обеспечить минимальную индуктивность обмоток, тем самым повысить быстродействие подвеса. С другой стороны, увеличение рабочего зазора может привести к невозможности обеспечения подвешивания вращающихся частей генератора при запуске подвеса с удвоенным зазором (когда ротор подвеса лежит на внутреннем диаметре статора). Результаты расчета магнитного поля представлены на рисунке 5.1.2. Из представленной полей следует заметить отсутствие картины магнитных превышения допустимых значений индукции для электротехнических сталей.



Смещение*10-6,(м)

Рис. 5.1.3. Зависимость несущей способности магнитного подшипника от смещения при токе 40 А

На рисунках 5.1.3 и 5.1.4 представлены зависимости усилия от смещения осей вращающейся части подвеса и неподвижной обоймы, а также от тока в обмотках полюсов подвеса. Данная информация будет полезной при разработке коммутатора для электромагнитного подвеса.

Расчет магнитного подшипника показывает, что удерживающее усилие одной магнитной опоры может достигать 500–1300 H, что вполне достаточно для удержания ротора массой 30 кг.



Рис. 5.1.4. Зависимость несущей способности магнитного подшипника от тока при нулевом смещении

Трехмерная модель магнитного подшипника представлены на рисунке 5.1.5.



Рис. 5.1.5. Трехмерная модель предлагаемого активного магнитного подвеса

5.2. Поверочный расчет газодинамического подшипника

Применение газодинамических подшипников для микрогазотурбинных установок является известным техническим решением. Это обусловлено следующими преимуществами этих опор:

 низкая вязкость газа обеспечивает сравнительно малые потери на трение, увеличение срока службы и повышение энергоэффективности;

– температурная стабильность свойств газа обеспечивает работоспособность подшипника при высокой температуре.

Газодинамические подшипники по принципу работы можно разделить на газостатические с внешним наддувом, газодинамические без внешнего наддува, гибридные. Для рассматриваемой установки выберем газодинамические подшипники без внешнего наддува.

Следует отметить, что методика [62, 76, 86, 103, 144, 149] расчета газодинамических усилий в подшипнике достаточно сложна и описывается системой уравнений Навье-Стокса:

$$\begin{cases} \rho \left[\frac{\partial u}{\partial t} + (ug_{rad})u \right] = -g_{rad}p + \mu \left(\Delta u + \frac{1}{3}g_{rad}div(u) \right); \\ \frac{\partial \rho}{\partial t} + div(\rho u) = 0; \\ \frac{\rho}{t} = \Re T; \end{cases}$$
(5.1)

здесь: *t* – время,

и – вектор скорости газа,

р, *ρ*, *T*, *μ* – его давление, плотность, абсолютная температура и вязкость,

Я – универсальная газовая постоянная.

Для точного решения этих уравнений с учетом геометрии и малых рабочих зазоров необходимо сложное программное обеспечение, реализующее метод конечных элементов, и большие вычислительные ресурсы компьютерной техники. На данном этапе для определения габаритных размеров и оценки

усилий опор воспользуемся инженерной методикой, подтвердившей свою работоспособность на практике. Она разработана при следующих допущениях:

- динамическая вязкость не зависит от давления;

- течение в газовом слое ламинарное;

- течение изотермическое;

 инерционные и гравитационные силы пренебрежимо малы по сравнению с силами вязкости.

Результатами расчета после выбора конструктивных параметров подшипника (длины, диаметра) является определение зависимости его несущей способности и жесткости от режимов работы.

Эпюры полного давления в газодинамическом слое $p_{rf\Sigma}$, несущая способность $W_{rf\Sigma}$, и жесткость определяются как функции безразмерных параметров $\chi, \sigma, \varepsilon$.

$$p_{rf\Sigma}(\chi,\sigma,\varepsilon) = p_{rf1}(\chi,\sigma,\varepsilon) + p_{rf2}(\chi,\sigma,\varepsilon), [\Pi a]$$
(5.2)

$$W_{rf\Sigma}(\chi,\sigma,\varepsilon) = \sqrt{W^2 + W_{\Pi}^2}, \qquad (5.3)$$

$$\sigma_{rf} = \frac{W_{rf}}{h}, [H/M]$$
(5.4)

Используемые безразмерные параметры равны:

$$\chi = \frac{6\mu\omega r^2}{\rho_0 h^2}, \sigma = \frac{2r}{L}, \varepsilon = \frac{L}{h}, \tag{5.5}$$

где: *µ* – динамическая вязкость,

ω – угловая частота вращения,

r — радиус вала,

 ρ_0 – статическое давление,

h – зазор,

L – длина подшипника.

Методика расчета была апробирована на примере турбохолодильника.

Рассчитанный по методике подшипник для турбохолодильника имеет следующие параметры и размеры: диаметр ротора 74 мм, длина цапфы 70 мм, рабочая частота вращения 52000 об/мин, статическая несущая способность 127 Н.

Применительно к предлагаемой газодинамическим опорам, имеющим диаметр ротора 70 мм, длину одной опоры 20 мм, рабочую частоту вращения 70 тыс. об/мин и 9 опорных поверхностей несущая способность составит 432 H, что обеспечит всплытие ротора с запасом по радиальному усилию. Критические частоты составят при этом более 170000 об/мин, что следует считать вполне приемлемым.

Выводы по главе

1. Для магнитного подшипника рекомендована 8-ми полюсная конструкция с применением 8-ми управляемых обмоток. Данная конструкция применена для опытного образца газотурбинной установки МГТУ 100000 кВт, 7000006/мин.

2. Проведены расчеты усилия магнитного подшипника в стационарном режиме в программе Ansys Elektronics Desktop, которые подтвердили возможность использования магнитного подвеса для опытного образца МГТУ. Развиваемые подшипником силы с гарантированным запасом обеспечивают подвес ротора.

3. Применение комбинированного магнитного и газодинамического подшипника следует считать оправданным. Расчеты показали, что на старте усилия магнитного подшипника достаточно, чтобы подвесить ротор в воздухе, а начиная с частоты 52000 об/мин ротор устойчиво всплывает и развиваемые аэродинамические усилия достаточны для удержания ротора.

6. РАЗРАБОТКА И ИЗГОТОВЛЕНИЕ МАКЕТНОГО ОБРАЗЦА ГЕНЕРАТОРА С АКСИАЛЬНЫМ МАГНИТНЫМ ПОТОКОМ И ДИАМАГНИТНЫМ ЯКОРЕМ. СРАВНЕНИЕ С АНАЛОГОМ

Вводные замечания

Разработка модели проводилась на основании анализа созданных математических моделей электромагнитного и механического состояния активных частей генератора. По результатам электромагнитного, теплового и механического анализов определялись основные размеры, которые гарантируют энергетические параметры. Конструкция предлагаемого генератора заслуживает отдельного внимания ввиду наличия некоторых конструктивных особенностей и улучшений сравнительно с существующими аналогами и типовыми конструктивными решениями. Ниже приведено описание разработанной конструкции и ее особенностей.

6.1. Конструктивные особенности индуктора генератора

Особенного внимания заслуживает индуктор генератора, так как именно механический расчет в рассматриваемом случае является определяющим всю энергетику машины. Индуктор генератора состоит из одинаковых модульных секций, модель которой представлена на рисунке 6.1.1.



Рис. 6.1.1. Модель одной секции индуктора генератора с вырезом четверти

При этом следует отметить, что бандаж ротора и ярмо ротора не являются одной деталью, так как бандаж, будучи механически существенно нагруженным, должен быть выполнен из высокопрочной мартенситной стали, при этом ярмо индуктора может быть выполнено из любой ферромагнитной стали. Учитывая деформации бандажа в нагруженном состоянии относительно ярма индуктора, следует при сборке обеспечить натяг между бандажным кольцом и ярмом индуктора от 0,2 до 0,3 мм. Эскиз посадки бандажного кольца на ярмо индуктора показано на рисунке 6.1.2.



Рис. 6.1.2. Эскиз сборки бандажного кольца и ярма индуктора генератора

Требуемый натяг возможно обеспечить путем сборки бандажного кольца и ярма индуктора применением горячей посадки, при создании разницы температур между деталями 400 градусов Цельсия, что вполне реализуемо, так как данная температура ниже температуры отжига и отпуска стали. Возможно рассчитать получающееся изменение диаметра деталей при изменении их температуры относительно нормальных климатических условий на $\Delta T = 400^{\circ}C$. Учитывая температуру отпуска мартенситных сталей на уровне 600 °C возможно утверждать, что предлагаемая конструкция реализуема и препятствий к изготовлению по предлагаемой технологии не существует.

$$\Delta D = \Delta T \cdot \alpha \cdot D_{\mu H g \mu K T o p a} = 0,24 \text{ MM}, \tag{6.1}$$

где, $\alpha = 0,101 \frac{1}{0}$ – коэффициент линейного расширения стали;

 $\Delta T = 400^{\circ}C$ – требуемый перепад температуры между стальными деталями; $D_{\rm индуктора} = 60$ мм – диаметр по которой планируется горячая посадка.

При этом магнит не является сложной в изготовлении деталью и, в отличие от стандартных конструктивных решений в аналогах не имеет исполнений, что означает большее значение коэффициента повторяемости и применяемости деталей, как следствие, повышение технологичности изделия. Эскиз магнита представлен на рисунке 6.1.3.



Рис. 6.1.3. Эскиз чертежа магнита генератора

В обеспечение удержания магнитов на месте при вращении ротора генератора предлагается применить приклеивание магнитов к торцевой поверхности ярма индуктора клеем К-400, который обладает высокой механической прочностью клееного соединения, а также, что немаловажно в газотурбинной рабочую 400 °C. установке, высокую температуру В Дополнительно, для исключения растрескивания клееного соединения при механических перемещениях и деформациях нагруженного бандажа индуктора, рассматривается вариант механической завальцовки торцевой поверхности бандажного кольца для исключения осевого перемещения магнитов.



Рис. 6.1.4. Графическая иллюстрация обеспечения сдвига между фазными ЭДС

Для обеспечения сдвига фаз 3-х фазной обмотки генератора на 120 электрических градусов предлагается отклониться от классического решения по смещению осей обмоток друг относительно друга, так как при некоторых значениях количества полюсов и фаз это может препятствовать свободному разделению обмотки секции на две части. Таким образом смещение фазных ЭДС предлагается выполнить путем поворота секций друг относительно друга на 120 электрических градусов, сохраняя при этом положение обмоток секции генератора. Реализация предложенного решения представлена на рисунке 6.1.4.

Таким образом индуктор является достаточно технологичным и не требовательным к техническому оснащению производства, что является существенным достоинством предлагаемой конструкции аксиального генератора.

6.2. Конструктивные особенности обмотки аксиального генератора

Стандартные конструкции обмоток аксиальных машин подразумевают расположение всех фаз обмоток в пределах одной секции генератора, что безусловно усложняет намотку и дальнейшую сборку обмотки с индуктором. Классический способ реализации обмоток трехфазных аксиальных машин представлен на рисунке 6.2.1. Как можно заметить, в данном способе реализации обмотки существуют пересечения проводников в лобовой части обмотки.



Рис. 6.2.1. Классическая конструкция обмотки аксиальной машины

Для исключения описанных недостатков было предложено принципиально новое для машины с аксиальным магнитным потоком решение – разделение фазы генератора по разным секциям, обеспечив деление катушки на составные части пополам для реализации возможности сборки/замены обмотки на собранной электрической машине, то есть изготовить обмотку в виде кассеты, которую будет возможно просто заменить. Эскиз катушки на один полюс показан на рисунке 6.2.2.



Рис. 6.2.2. Эскиз катушки на один полюс

Намотка катушки предложенным образом позволяет обеспечить высокий коэффициент использования пространства активным материалом, при этом выводы катушки расположены на внешних гранях обмотки и не имеют пересечений в осевом направлении, что снижает габаритные размеры обмотки. Следует отметить, что технологическая выполнимость предложенной обмотки не вызывает сомнений, так как шаблон для намотки катушки на один полюс является весьма стандартным. Единственным технологическим усложнением предложенного варианта относительно классической обмотки аксиальных машин является необходимость формовки секции по посадочным размерам в обеспечение позиционирования катушки относительно полюса в сборе готовой катушечной группы каждой секции, залитой компаундом.



Рис. 6.2.3. Эскиз катушечной группы одной секции генератора

Эскиз готовой секции, залитой в компаунд представлен на рисунке 6.2.3. Изготовление обмотки получается сравнительно несложным.

Из эскиза возможно заметить, что в предложенном конструктивном исполнении катушечной группы каждой секции становится возможным собранной обмотки При будет разделение пополам. этом, как продемонстрировано далее, открываются возможности для упрощенной сборки катушек в генераторе, даже в собранной машине, что, в свою очередь, повышает не только технологичность сборки изделия и снижает себестоимость, но также повышает ремонтопригодность генератора и снижает затраты времени и поврежденной обмотки ресурсов для осуществления замены силами эксплуатации.

6.3. Разработка модели электромагнитного подвеса

Трехмерная твердотельная модель электромагнитного подвеса представлена на рисунке 6.3.1.



Рис. 6.3.1. Трехмерная эскизная модель электромагнитного подвеса

Структурно электромагнитный подвес состоит из неподвижной части (статора) с обмотками и вращающейся части (ротора) на валу машины, свободное вращение которой требуется обеспечить. Для подробного исследования корпуса электромагнитного подвеса представлена модель на рисунке 6.3.2.



Рис. 6.3.2. Железо статора электромагнитного подвеса

Пакет из электротехнической стали статора подвеса скреплен пластинами отмеченными желтым цветом и запрессован в оболочку. Следует отметить, что профиль электротехнического листа основных полюсов совпадает с профилем листов дифференциального датчика. Принцип работы дифференциального датчика основан на сравнении индуктивности катушек, намотанных на противоположные полюса при подаче токов высокой частоты. Таким образом, смещение ротора относительно оси корпуса на 0,1 мм, приведет к разнице между показаниями индуктивного сопротивления соответствующей отклонению уединенных полюсов от оси на 0,2 мм.

Разрез вдоль оси модели электромагнитного подвеса показан на рисунке 6.3.3.



Рис. 6.3.3. Продольный разрез электромагнитного подвеса

Для уменьшения влияния вихревых токов, возникающих в ферромагнитном кольце, расположенном на роторе и вращающемся в магнитном
поле главных полюсов электромагнитного подвеса, кольцо ротора выполнено также шихтованным из электротехнической стали. Для осуществления сборки и удержания полученного пакета применены гильзы с резьбой и зажимные гайки на роторе, что обеспечивает коэффициент заполнения пакета ротора электротехнической сталью и отсутствие относительного перемещения листов стали относительно вала генератора.

6.4. Корпус генератора и общая сборка генератора

Благодаря применению многосекционной конструкции генератора становится возможным выполнить корпусные элементы также В виде повторяющихся деталей, ЧТО В свою очередь повышает коэффициент повторяемости деталей и, как следствие, технологичность генератора в целом.

Эскиз сборки генератора представлен на рисунке 6.4.1.



Рис. 6.4.1. Эскиз сборки генератора

Из представленного рисунка может показаться что ротор генератора имеет низкую колебательную устойчивость. Однако следует отметить, что большая часть наружной поверхности ротора используется как газодинамический подшипник, что в свою очередь сдвигает резонансные частоты ротора за пределы номинальных частот вращения. При этом генератор весьма технологичен, имеет высокий коэффициент унификации. Сборка обмоток генератора и, при необходимости, их замена практически не отнимает времени и не требует высокой квалификации от исполнителя.

При этом следует подробнее остановиться на уединенном корпусном элементе генератора, который представлен на рисунке 6.4.2.



Рис. 6.4.2. Изометрия элемента статора генератора

Для подробного описания данного ответственного элемента конструкции разработан чертеж, который представлен на рисунке 6.4.3.

Разработанная высокий коэффициент деталь имеет достаточно использования объема, каждая поверхность несет функцию. Внутренний диаметр секции выполняет функцию газодинамического подвеса в совокупности с бандажным кольцом индуктора. Внутренняя прорезь поперек оси выполнена для установки в данной прорези обмотки кассетного типа после сборки ротора и статора генератора. Также имеются центровочные пояски по обе стороны от детали для выполнения точного позиционирования всех составляющих секций статора друг относительно друга и обеспечения высокой степени соосности бандажного кольца индуктора и внутреннего диаметра секции статора при сборке целого генератора с соблюдением при этом пренебрежимо малого отличия в положении осей вращения индуктора и каждой секции статора.



Рис. 6.4.3. Чертеж секции статора

Крепление пакета секций статора между собой предполагается шпилькой М10, что в свою очередь является достаточно технологичным решением, не влияющим негативно на тактико-технические характеристики конечного изделия.

Изометрия общей сборки с разрезом по продольной оси представлена на рисунке 6.4.4.

Следует отметить удобство замены обмотки в случае возникновения неисправности и пробоя изоляции обмотки, замена происходит без разбора генератора целиком (обмотка кассетного типа).

В данной конструкции внешние цилиндрические поверхности бандажа индуктора служат опорами для газодинамических подшипников. Большое количество аэродинамических опор обеспечивает хорошую жесткость и отсутсвие резонансных частот при разгоне.



Рис. 6.4.4. Изометрия собранного генератора с разрезом по продольной оси

Разработанная конструкция является инновационной. Она содержит в себе несколько «ноу-хау», на которые оформляются авторские права.



Рис. 6.4.5. Макетный образец магнитного подвеса

На основании эскизной конструкторской документации был изготвлен макетный образец разрабатываемого генератора. На рисунке 6.4.5 представлен макетный образец магнитного подшипника. На рисунке 6.4.6 представлен коммутатор обмоток электромагнитного подвеса.



Рис. 6.4.6. Коммутатор обмоток электромагнитного подвеса



Рис. 6.4.7. Макетный образец корпуса разрабатываемого генератора На рисунке 6.4.7 показан макетный образец корпуса аксиального генератора. На рисунке 6.4.8 изображен ротор многосекционного аксиального генератора.



Рис. 6.4.8. Макетный образец ротора разрабатываемого генератора



Рис. 6.4.9. Детали и сборочные единицы макетного образца многосекционного аксиального генератора

На рисунке 6.4.9 изображены детали и сборочные единицы макетного образца многосекционного аксиального генератора. На рисунке 6.4.10 изображен собранный макетный образец многосекционного генератора на постоянных магнитах с диамагнитным якорем на комбинированном магнитном и газодинамическом подвесе.



Рис. 6.4.10. Макетный образец многосекционного аксиального генератора

6.5. Сравнительный анализ аксиальной многосекционной конструкции генератора с радиальной конструкцией протопопа фирмы Capstone

Для отражения основных преимуществ разработанной конструкции перед радиальной конструкцией основного конкурента фирмы Capstone выбраны следующие показатели:

- технические характеристики;
- дефицитность используемых материалов;
- технологичность при изготовлении и сборке;
- наличие интеллектуальной собственности.

Результаты анализа сведены в таблицу 6.5.1.

Tuomingu o.o.t. epublisti utumis buphuntob konorpykumi			
Сравниваемые	Прототип фирмы	Многосекционный	
параметры	Capston (радиальная	аксиальный генератора	
	конструкция)	(разработанная	
		конструкция)	
Технические характеристики			
Номинальная мощность	111	111	
(кВт)			
Номинальное	540	540	
выпрямленное			
напряжение (В)			
Потери в меди (кВт)	2.5	3.5	
Потери в стали (кВт)	10	нет	
КПД	0.9	0.963	
Диаметр расточки	60	60	
якоря(мм)			
Масса ротора (кг)	11.5	10	
Масса магнитов(кг)	0.95	2.6	
Масса меди (кг)	4,2	3	
Электротехнические материалы			
Обмоточная медь	есть	есть	
Постоянные магниты	есть	есть	
(NeFeBr)			
Конструкционная сталь	есть	есть	
Эпоксидные смолы для	есть	есть	
пропитки			

Таблица 6.5.1. Сравнительный анализ вариантов конструкций

Продолжение таблицы 6.5.1.

Сравниваемые	Прототип фирмы	Многосекционный	
параметры	Capston (радиальная	аксиальный генератора	
	конструкция)	(разработанная	
		конструкция)	
Электротехническая	есть	нет	
сталь			
Технология изготовления			
Штампы	есть	нет	
Механообработка	есть	есть	
Бандаж	углепластик	мартенситная сталь	
Балансировка	Выполнима	Выполнима	
Сборка	Сложная из-за наличия	Простая за счет	
	постоянных магнитов	разъемной конструкции	
Особенности эксплуатации, надежность			
Запуск установки	Проблемы сухого	Проблемы износа	
	трения при низких	отсутствуют за счет	
	оборотах	комбинированного	
		подвеса	
Критические частоты	3 резонансных частоты	Резонансные частоты	
	при разгоне	выходят за пределы	
		эксплуатационных	
		оборотов	
Интеллектуальная собственность			
	Необходимо обходить	Большие возможности	
	большое количество	оформления патентов за	
	патентов или заключать	счет уникальности	
	лицензионные договора	конструкции	
	на использование		
	интеллектуальной		
	собственности		

По сравнению с аналогами предлагаемый базовый вариант имеет более высокий КПД за счет исключения магнитных потерь. Высокий КПД облегчает отвод тепловых потерь, которые в предложенном варианте выделяются только в меди, что упрощает систему охлаждения и позволяет применить воздушное охлаждение. Использование мощных высококоэрцитивных постоянных магнитов позволяет минимизировать габариты и массу. Таким образом, ожидается, что торцевая электрическая машина будет иметь высокие массоэнергетические показатели, которые позволят улучшить техникоэкономические показатели всей установки.

Аксиальный генератор имеет простую конструкцию за счет предлагаемого разъемного статора, следовательно, следует ожидать от нее высокой надежности при эксплуатации. Конструктивно торцевая машина состоит из нескольких секций. Это позволяет на базе этой конструкции выстраивать линейку мощностей без существенного изменения конструктивных узлов и деталей, меняя только обмоточные данные якоря и количество секций. Магнитная система при этом остается неизменной для всего ряда мощностей. Это повышает унификацию при освоении ряда мощностей.

Таким образом, по совокупности показателей конструкция предлагаемого аксиального генератора с комбинированным подвесом вполне конкурентоспособна по сравнению с серийным прототипом формы Capstone, а по ряду показателей имеет преимущества. После отработки всех технических и технологических вопросов ее следует рекомендовать в серийное производство для замены радиального прототипа.

Выводы по главе

1. Разработана конструкция вентильного генератора с аксиальным магнитным потоком и диамагнитным якорем. Особенностью конструкции якоря является то, что он состоит из двух симметричных половин, что облегчает его сборку и ремонт при эксплуатации и технологичность при производстве.

2. Для сдвига фаз друг относительно друга используется инновационное решение. Фазовый сдвиг обеспечивается поворотом постоянных магнитов, в отличие от классической конструкции, где сдвигаются обмотки статора.

3. Для подшипников используется комбинированный магнитный и аэродинамический подвес. Магнитные опоры содержат радиальные и торцевые подшипники. В качестве опор газодинамических подшипников используются радиальные поверхности бандажных колец.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлена разработка генератора для высокоскоростной газотурбинной установки, являюшейся источником автономного энергоснабжения. В отличие от существующих генераторов радиальной конструкции предложена инновационная конструкция вентильного многосекционного генератора с аксиальным зазором и диамагнитным якорем. На данную конструкцию не существует методик расчета. Данное исследование посвящено разработке математических моделей и методик по ключевым переделам электромашиностроения для предлагаемого многосекционного аксиального генератора на постоянных магнитах с диамагнитным якорем.

Основные результаты проведенной работы заключаются в следующем.

1. Проведен анализ конструкций существующих газотурбинных предназначенных автономных источников установок, для питания. Проанализированы факторы, сдерживающие дальнейшее повышение удельных характеристик электрических генераторов МГТУ. В качестве базовой конструкции генератора выбран вентильный многосекционный генератор с аксиальным зазором и диамагнитным якорем, у которого отсутствуют магнитные потери, имеется возможность повышения жесткости за счет организации опор на поверхности бандажа, и повышения мощности генератора за счет увеличения количества секций.

2. Разработана методика определения диаметра бандажного кольца по пределу прочности от действия собственных распределенных инерционных нагрузок, действующих на бандаж, а также усилий действующих со стороны магнитов. Предложенная методика проверена методом конечных элементов, погрешность анализа аналитическим методом составила 2,4%.

3. Разработана методика расчета многосекционного аксиального генератора с диамагнитным якорем, опирающаяся на математическую модель расчета потокосцепления витков обмотки. Погрешность разработанного

аналитического решения составила 10%. Разработанная модель может быть использована в оптимизационных циклах при проектировании генератора.

4. Разработана методика теплового расчета секции аксиального генератора с диамагнитным якорем, учитывающая изменение коэффициентов теплоотдачи с поверхности обмоток в зависимости от скорости вращения индуктора вблизи обмоток. Приведенная методика проверена методом конечных элементов, погрешность составила 5%. Разработана математическая модель вентиляционного расчета секции аксиального генератора, учитывающая наличие вала, препятствующего движению воздушного потока. Аналитическое решение проверено конечно-элементным методом, погрешность составила 10%.

5. Определена конструкция магнитного подшипника. Выполнен расчет электромагнитного подвеса, определены зависимости его несущей способности от радиального смещения осей обойм ротора и статора друг относительно друга и от тока обмоток статора. Проведен расчет газодинамического подшипника по традиционной методике, проанализирована принципиальная осуществимость технического решения по применению в качестве внутренней обоймы газодинамического подшипника поверхности индуктора аксиального генератора.

6. Разработана конструкция многосекционного вентильного генератора с аксиальным магнитным потоком и диамагнитным якорем. Особенностью конструкции якоря является сборка обмотки генератора из двух симметричных половин (кассетного типа), что облегчает его сборку и ремонт при эксплуатации. Для сдвига фаз друг относительно друга используется сдвиг постоянных магнитов, в отличие от классической конструкции, где сдвигаются обмотки статора. Наружная поверхность ротора используется как газодинамический подвес.

7. Проведен поверочный анализ предложенной конструкции генератора в среде программного обеспечения Ansys Electronic Desktop. Погрешность расчета по созданной математической модели составляет не более 10%.

8. Проведенные исследования заинтересовали индустриального партнера в лице ОАО СКБ «Турбина».

Перспективы дальнейшей разработки темы

Проведенные исследования завершают определенный цикл решенных задач, но имеют следующие перспективные направления по развитию проекта:

 – разработка проектной системы по проектированию генераторной установки;

– отработка стартерного режима МГТУ;

 – разработка системы стабилизации напряжения при различных нагрузках;

 – разработка ряда газотурбинных установок, отличающихся по мощности;

 внедрение результатов исследований в серийное производство на профильных предприятиях.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Беспалов, В.Я. Электромагнитные силы синхронных машин с постоянными магнитами / М.Е. Коварский, А.О. Сидоров // Труды XVII Международной конференции "Электромеханика, Электротехнологии, Электротехнические Материалы и Компоненты". 2018. С. 99-100.

2. Вавилов, В.Е. Методы анализа показателей надежности электромеханических систем / Р.Д. Каримов, А.О. Тимофеев, О.А. Юшкова, Д.Ю. Пашали, Е.О. Жарков, И.Ф. Саяхов, Г.С. Зиннатуллина, А.А. Бакиров // Электротехнические комплексы и системы. Международная научно-практическая конференция. Уфа, 2021. С. 168-172.

3. Вавилов, В.Е. Анализ производительности конструкций дисковых высокоскоростных генераторов / Ф.Р. Исмагилов, И.Ф. Саяхов, Е.А. Ематин // Авиакосмическое приборостроение. 2019. № 8. С. 3-12.

4. Вавилов, В.Е. Ограничения при проектировании бесконтактных электрических машин с постоянными магнитами / Е.А. Ематин // Молодежный вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2019. № 1 (20). С. 29-34.

5. Вавилов, В.Е. Сверхвысокооборотный стартер-генератор с магнитопроводом из аморфного железа для беспилотного летательного аппарата / О.А. Юшкова, Ю.В. Рахманова, Ю.В. Афанасьев, Н.К. Потапчук // Электротехника. 2018. № 1. С. 16-21.

6. Вихарев, Д.Ю. Аналитический расчет индуктивностей рассеяния на основе применения векторного потенциала магнитного поля / И.С. Снитько, А.И. Тихонов // Моделирование Систем И Процессов. 2021. Т. 14. № 1. С. 4-10.

7. Вольдек, А.И. Электрические Машины: учеб. для студентов высш. техн. учебн. заведений / А.И. Вольдек. – 3-е изд., перераб. – Л.: Энергия, 1978. – 832 с.

8. Воронин, С.Г. Сравнительная оценка схем соединения обмоток синхронных генераторов в составе источников постоянного тока /

Н.В. Клиначев, А.М. Давлатов, Д.В. Пауков // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2020. Т. 20. № 3. С. 110-118.

9. Встовский, А.Л. Электромагнитная модель и оптимизация параметров торцевого генератора / М.П. Головин, К.С. Федий, Н.А. Колбасина, Д.И. Морозов // Известия Самарского Научного Центра Российской Академии Наук. 2012. Т. 14. № 1-2. С. 653-657.

10. Встовский, А.Л. Торцевая электрическая машина / М.П. Головин, Н.Е. Полошков, Л.Н. Головина, С.А. Коков // Патент на изобретение Ru 2313888 C1, 27.12.2007. Заявка № 2006121300/09 От 15.06.2006.

11. Гайтов, Б.Х. Построение математической модели электромагнитных переходных процессов в двухмерных электрических машинах / Я.М. Кашин, А.Я. Кашин // Научные чтения имени профессора Н.Е. Жуковского. Сборник научных статей III Международной научно-практической конференции. Филиал Военного учебно-научного центра Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», оформление ООО «Издательский Дом - Юг». 2013. С. 139-143.

12. Гайтов, Б.Х. Влияние геометрических радиальных соотношений аксиальной электрической машины на ее габаритные характеристики и электромагнитный момент / И.Н. Автайкин, А.М. Квон, Я.М. Кашин, А.М. Кирьяков // Энергосбережение и водоподготовка. 2013. № 4 (84). С. 47-49.

13. Гайтов, Б.Х. Разработка математической модели электромагнитных и электромеханических переходных процессов в аксиальных многофазных генераторных установках / Я.М. Кашин, Л.Е. Копелевич, А.Я. Кашин, А.А. Голованов, М.Л. Копелевич // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2012. № 76. С. 473-483.

14. Гайтов, Б.Х. Разработка аксиальных электромагнитных устройств для систем автономного электроснабжения и выбор метода исследования переходных процессов / Ю.П. Ясьян, Л.Е. Копелевич, А.Я. Кашин, Д.В. Пауков,

Я.М. Кашин // Труды Кубанского государственного аграрного университета. 2011. № 33. С. 169-173.

15. Ганджа, С.А. Вентильные электрические машины постоянного тока с аксиальным зазором. Анализ и синтез // Сборник трудов Пятой конференции пользователей программного обеспечения CAD_FEMGmbH, 21–22 апреля 2005 г. – М., 2005. – С. 372 – 376.

16. Ганджа, С.А. Многоуровневая оптимизация вентильных электрических машин постоянного тока с аксиальным воздушным зазором (BMA3) // XXV Российская школа по проблемам науки и технологий, посвященная 60-летию Победы (г. Миасс, 21–23 июня 2005 г.): тез. докл./ Межрегион. совет по науке и технол. – Миасс, 2005. – С. 57.

17. Ганджа, С.А. Оптимальное проектирование электроприводов на базе вентильных электрических машин с аксиальным зазором // Вестник Южно-Урал. гос. ун-та. Серия «Энергетика». – 2009. – Вып.12, №34. – С.68 – 72.

18. Ганджа, С.А. Оптимизация параметров вентильных электрических машин постоянного тока с аксиальным воздушным зазором // Состояние и перспективы развития электротехнологии (XII Бенардосовские чтения): тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф., 1–3 июня 2005 г./ Иван. гос. энерг. ун-т. – Иваново, 2005. – Т.2. – С. 82.

Ганджа, С.А. Оптимизация параметров вентильного моментного двигателя постоянного тока: дис. ... канд. наук / С.А. Ганджа. – Челябинск., 1984. – 203 с.

20. Ганджа, С.А. Особенности построения системы автоматизированного проектирования вентильных машин с аксиальным зазором // Вестн. Юж.-Урал. гос. ун-та. Сер. «Энергетика». – 2007. – Вып.8, № 20. – С.19–23.

21. Ганджа, С.А. Разработка программного комплекса многоуровневой оптимизации вентильных машин с аксиальным зазором// ЭЛМАШ – 2009: Электроэнергетика и электротехника. Проблемы и перспективы: тр. симпозиума: в 2 т. / VII Междунар. науч.-техн. конф., Москва, 22–25 сентября 2009 г. – М., 2009. – Т.1. – С. 164–167.

22. Герасин, А.А. Сравнение высокомоментных электродвигателей с магнитопроводами из аморфного железа и электротехнической стали / Ф.Р. Исмагилов, В.Е. Вавилов, Р.Р. Уразбахтин, А.М. Веселов, А.Х. Минияров // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2019. Т. 62. № 4. С. 29-35.

23. Герасин, А.А. Проектирование, оптимизация и испытание высокоскоростного магнитоэлектрического генератора для электроснабжения микробеспилотных летательных аппаратов / Ф.Р. Исмагилов, В.Е. Вавилов, А.М. Веселов, А.Х. Минияров, В.В. Айгузина // Нано- и микросистемная техника. 2018. Т. 20. № 5. С. 267-276.

24. Гомберг, Б.Н. Магнитные системы бесконтактных регулируемых синхронных генераторов с основным магнитоэлектрическим возбуждением / А.И. Согрин, Т.А. Казанцева // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2020. Т. 20. № 3. С. 119-131.

25. Зверев, Я.А. Анализ теплового состояния тягового асинхронного двигателя гибридного транспорта / Ю.Б. Казаков // «Энергия-2015». Десятая Международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых учёных. Сборник конкурсных докладов. 2015. С. 126-127.

26. Зиннатуллина, Г.С. Исследование асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором посредством компьютерного моделирования / В.Е. Вавилов // Молодежный вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2019. № 1 (20). С. 67-71.

27. Зубков, Ю.В. Исследование работы интегрированного стартергенератора при запуске двигателя внутреннего сгорания / С.Ю. Кауров, В.Е. Верещагин // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2020. Т. 28. № 3 (67). С. 125-138.

28. Зубков, Ю.В. Оценка прочности вращающейся части электрического стартера для пуска газотурбинного двигателя / М.Н. Алимбеков // Ашировские чтения. 2018. Т. 1. № 1 (10). С. 358-363.

29. Зубков, Ю.В. Температурный режим магнитоэлектрического стартера при пуске газотурбинного двигателя / Ю.Н. Иванников, Д.О. Буйлова // Актуальные проблемы энергетики АПК. материалы VII международной научно-практической конференции. Под общей редакцией Трушкина В.А., 2016. С. 74-76.

30. Зубков, Ю.В. Идентификация параметров синхронного генератора с возбуждением от постоянных магнитов методом численного моделирования магнитного поля / Э.Г. Чеботков // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2015. № 3 (47). С. 136-141.

31. Иванов-Смоленский, А.В. Применение конечно-элементных моделей при учебном проектировании синхронных машин / В.И. Гончаров, Наинг Тун Тейн // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2010. № 2. С. 71-76.

32. Иванов-Смоленский, А.В. Применение метода проводимостей зубцовых контуров для расчета синхронных машин с постоянными магнитами на поверхности ротора / М.А. Аванесов, Е.В. Казьмин // Электричество. 2009. № 8. С. 47-55.

33. Иванов-Смоленский, А.В. Развитие комбинированного метода анализа
электрических машин / В.А. Кузнецов, Д.А. Петриченко // Электротехника. 2007.
№ 8. С. 4-12.

34. Иванов-Смоленский, А.В. Опыт и перспективы создания высоковольтных генераторов на напряжения ПО-500 кв / Ю.С. Пинталь, В.А. Кузнецов, В.И. Извеков, Н.А. Серихин, А.В. Акимов // Электричество. 2007. № 10. С. 11-17.

35. Исмагилов, Ф.Р. Электромагнитный и тепловой анализ электрических машин из композитных материалов / В.Е. Вавилов, И.Ф. Саяхов, Е.А. Ематин // Вестник Московского энергетического института. Вестник МЭИ. 2020. № 2. С. 52-61.

36. Исмагилов, Ф.Р. Высокооборотный синхронный стартер-генератор для безредукторных вспомогательных силовых установок / А.А. Герасин, В.Е. Вавилов, Г.С. Зиннатуллина // Электротехнические системы и комплексы. 2020. № 1 (46). С. 19-27.

37. Исмагилов Ф.Р. О выборе технологии изготовления статора мелкосерийных и опытных электромеханических преобразователей энергии с учетом магнитных потерь / Н.Ю. Львов, В.Е. Вавилов, Т.А. Львовский, В.И. Бекузин // Электричество. 2019. № 4. С. 44-50.

38. Исмагилов, Ф.Р. Методология проектирования линейки высокоскоростных магнитоэлектрических генераторов / В.Е. Вавилов, В.В. Айгузина // Инновационные, информационные и коммуникационные технологии. 2019. № 1. С. 506-511.

39. Исмагилов, Ф.Р. Высокоборотный генератор с магнитопроводом из аморфного железа / В.Е. Вавилов // Труды XVII Международной конференции «Электромеханика, Электротехнологии, Электротехнические Материалы и Компоненты». 2018. С. 156-158.

40. Исмагилов, Ф.Р. Высокооборотный магнитоэлектрический генератор повышенной мощности / И.Х. Хайруллин, В.Е. Вавилов // Электротехника. 2018. № 6. С. 51-56.

41. Исмагилов, Ф.Р. Исследование синхронных электродвигателей с постоянными магнитами и асинхронным пуском / В.Е. Вавилов, В.И. Бекузин, В.В. Айгузина // Электроника и электрооборудование транспорта. 2018. № 1. С. 26-30.

42. Казаков, Ю.Б. Анализ работы асинхронного двигателя с чередующимися пазами на роторе / А.П. Корепов // Материалы международной конференции, посвященной 140-летию научно-технической изобретения электросварки H.H. Бенардосом. Иваново, 2021. Изд-во: Ивановский государственный энергетический университет Им. В.И. Ленина. С. 190-192.

43. Казаков Ю.Б. Внешние электромагнитные поля электродвигателей и способы их снижения / Е.А. Шумилов, А.В. Тамьяров, А.Н. Морозов //

Монография. Издательство: Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина. Иваново, 2017. С. 116.

44. Казаков, Ю.Б. Анализ дополнительных потерь и виброшумовых характеристик асинхронных двигателей при питании импульсным напряжением / Н.К. Швецов // Актуальные проблемы электромеханики и электротехнологий АПЭЭТ-2017. Сборник научных трудов. 2017. С. 163-168.

45. Казаков Ю.Б. Диагностика электромагнитных несимметрий по внешнему полю электрических машин / А.Н. Морозов, А.П. Океанский // Проблемы электротехники, электроэнергетики и электротехнологии (ПЭЭЭ-2017). V Всероссийская Научно-Техническая Конференция (К 50-летнему юбилею кафедры «Электроснабжение и электротехника» Института энергетики и электротехники). Министерство образования и науки российской федерации, Тольяттинский государственный университет, Институт энергетики и электротехники. 2017. С. 376-380.

46. Казаков, Ю.Б. Проблемы диагностики электромагнитных несимметрий электрических машин по внешнему магнитному полю / А.Н. Морозов, А.П. Океанский // Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии (XIX Бенардосовские чтения). Материалы Международной научно-технической конференции. 2017. С. 166-169.

47. Казаков, Ю.Б. Анализ виброшумовых характеристик частотнорегулируемых асинхронных двигателей / А.Б. Котов, Н.К. Швецов // Труды IX международной (XX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2016. 2016. С. 44-47.

48. Казаков, Ю.Б. Энергоэффективность тяговых асинхронных двигателей при питании от полупроводниковых преобразователей частоты / Н.К. Швецов // Электроэнергетика глазами молодежи. Труды VI Международной научнотехнической конференции. 2015. С. 385-388.

49. Казаков, Ю.Б. Исследование взаимосвязанных электромеханических процессов в системе асинхронный двигатель - генератор с общим валом / И.А. Палилов // Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии.

Материалы Международной научно-технической конференции: (XVIII Бенардосовские чтения). 2015. С. 139-141.

50. Казаков, Ю.Б. Исследование взаимосвязанных электромеханических процессов в системе тяговый асинхронный двигатель - асинхронный генератор с общим валом на основе полевых моделей / И.А. Палилов // Вестник ивановского государственного энергетического университета. 2015. № 2. С. 42-46.

51. Казаков, Ю.Б. Расчетный анализ потерь в стали асинхронных двигателей при питании от преобразователей частоты с несинусоидальным выходным напряжением / Н.К. Швецов // Вестник ивановского государственного энергетического университета. 2015. № 5. С. 42-46.

52. Казаков, Ю.Б. Численный анализ внешних электромагнитных полей асинхронных двигателей при питании широтно-импульсномодулированным напряжением / А.В. Тамьяров, Е.А. Шумилов, Д.О. Чуянов // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2011. № 5. С. 34-37.

53. Каримов, Р.Д. Методы анализа показателей надежности электромеханических систем / В.Е. Вавилов, А.О. Тимофеев, О.А. Юшкова, Д.Ю. Пашали, Е.О. Жарков, И.Ф. Саяхов, Г.С. Зиннатуллина, А.А. Бакиров // Электротехнические комплексы и системы. Международная научно-практическая конференция. Уфа, 2021. С. 168-172.

54. Каримов, Р.Д. Постоянные магниты, используемые в синхронных машинах постоянного тока / А.М. Веселов, И.И. Ямалов, О.А. Юшкова, Е.О. Жарков, Г.С. Зиннатуллина, А.А. Бакиров, И.А. Аюпов, И.Ф. Саяхов // Электротехнические комплексы и системы. Международная научно-практическая конференция. Уфа, 2021. С. 172-176.

55. Каримов, Р.Д. Эффективность применения в синхронных машинах с постоянными магнитами внешнего ротора / О.А. Юшкова, А.А. Меднов, Е.О. Жарков, Г.С. Зиннатуллина, К.А. Барабанов, А.А. Бакиров, И.А. Аюпов, И.Ф. Саяхов // Электротехнические комплексы и системы. Международная научно-практическая конференция. Уфа, 2021. С. 176-181.

56. Каримов, Р.Д. Обзор перспективных электрических машин / Ф.Р. Исмагилов, О.А. Юшкова, Е.О. Жарков, Г.С. Зиннатуллина, А.А. Подгузов, А.А. Бакиров, И.А. Аюпов, И.Ф. Саяхов // Электротехнические комплексы и системы. Международная научно-практическая конференция. Уфа, 2021. С. 181-187.

57. Каримов, Р.Д. Комплексная диагностика и мониторинг состояния современных электрических машин / Ф.Р. Исмагилов, Р.Р. Уразбахтин, И.И. Ямалов, К.А. Барабанов, М.С. Обуденов // Электротехнические комплексы и системы. Международная научно-практическая конференция. Уфа, 2021. С. 211-222.

58. Каримов, Р.Д. К вопросу об оптимизации электрических машин / Ф.Р. Исмагилов, Р.Р. Уразбахтин, И.И. Ямалов, А.А. Подгузов // Электротехнические комплексы и системы. Международная научно-практическая конференция. Уфа, 2021. С. 222-229.

59. Корнилов, Д.С. Разработка системы проектирования и совершенствование конструкции торцевого генератора с постоянными магнитами / Ю.Б. Казаков // Электроэнергетика глазами молодежи. Труды VI Международной научно-технической конференции. 2015. С. 371-374.

60. Корнилов, Д.С. Разработка системы проектирования торцевого генератора с постоянными магнитами / Ю.Б. Казаков // Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии. Материалы Международной научно-технической конференции: (XVIII Бенардосовские чтения). 2015. С. 142-145.

61. Копылов, И.П. Проектирование электрических машин: учеб. / И.П. Копылов. – М.: Высшая школа, 2005. – 767 с.

62. Левина Г.А., Бояршинова А.К. Решение упруго гидродинамических задач и анализ нагрузочных характеристик лепесткового газодинамического подпятника с профилированными лепестками // Машиноведение. – 1989. – № 5. – С. 88 – 94.

63. Леонов, С.В. Сравнительный анализ роторных систем синхронных электродвигателей малого диаметра / Д.Е. Растрепин // Молодежь и современные

информационные технологии. Сборник трудов XIX Международной научнопрактической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Томск, 2022. С. 285-286.

64. Леонов С.В. Вопросы моделирования магнитного поля электромеханических систем с постоянными магнитами / Решетневские чтения. 2011. Т. 2. С. 463-465.

65. Лифанов, В.А. Расчет электрических машин малой мощности: учебное пособие/В.А. Лифанов, Г.В. Помогаев, Н.П. Ермолин. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2008. – 127 с.

66. Лихачева, А.В. САПР торцевого синхронного двигателя с гладким статором из аморфной стали / А.И. Тихонов, А.В. Стулов, М.И. Никифоров, Д.В. Рубцов // Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии (XXI Бенардосовские чтения). Материалы международной научно-технической конференции, посвященной 140-летию изобретения электросварки Н.Н. Бенардосом. Иваново, 2021. С. 206-209.

67. Лихачева, А.В., Разработка системы проектирования синхронных машин с использованием библиотеки моделирования магнитного поля EMLIB / А.И. Тихонов, Д.В. Рубцов // Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии (Бенардосовские чтения). Материалы Международной (XX Всероссийской) научно-технической конференции. 2019. С. 171-174.

68. Макаричев, Ю.А. Анализ характеристик электромеханического стартера газотурбинной установки / Ю.В. Зубков, Ю.Н. Иванников, И.В. Гуляев // Электротехника. 2019. № 7. С. 24-32.

69. Макаричев, Ю.А. Комбинированный магнитный подвес / Ю.Н. Иванников, Я.А. Ратцев, Е.А. Полянский // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2020. Т. 28. № 4 (68). С. 142-154.

70. Макаричев, Ю.А. Магнитоэлектрический двигатель-генератор автономного мобильного объекта / Ю.В. Зубков, В.Е. Верещагин,

Д.А. Владимиров // Электроэнергия. Передача и распределение. 2021. № 3 (66). С. 118-127.

71. Макаричев, Ю.А. Энергетические процессы активного электромагнитного подвеса / Ю.Н. Иванников // Электроэнергия. Передача и распределение. 2020. № 3 (60). С. 112-119.

72. Макаричев, Ю.А. Исследование теплового состояния моментного двигателя с возбуждением от постоянных магнитов / Ю.Н. Иванников, В.Н. Овсянников // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2019. Т. 62. № 4. С. 36-43.

73. Минияров, А.Х. Разработка асинхронного двигателя с комбинированной обмоткой для системы вентиляции морских судов / Ф.Р. Исмагилов, А.А. Подгузов, Р.Я. Халиуллин //Актуальные проблемы развития судоходства и транспорта в азиатско-тихоокеанском регионе. материалы Международной научно-технической конференции. 2019. С. 62-65.

74. Минияров, А.Х. Исследования и разработка перспективного отказоустойчивого асинхронного двигателя с комбинированной обмоткой / А.М. Веселов // XXIV Туполевские чтения (школа молодых ученых). Материалы Международной молодёжной научной конференции. В 6-ти томах. Казань, 2019. С. 282-286.

75. Минияров, А.Х. Проектирование, оптимизация и испытание высокоскоростного магнитоэлектрического генератора для электроснабжения микробеспилотных летательных аппаратов / А.А. Герасин, Ф.Р. Исмагилов, В.Е. Вавилов, А.М. Веселов, В.В. Айгузина // Нано- и микросистемная техника. 2018. Т. 20. № 5. С. 267-276.

76. Меркулов В.И., Плыкин М.Е., Тищенко И.В. К вопросу об инженерной методике расчета лепестковых газодинамических подшипников турбокомпрессоров. Известия МГТУ «МАМИ», №2(14), 2012, т.1, С. 279 – 286.

77. Петренко, Ю.В. Теоретические основы электротехники. физические основы теории электрических цепей и методы их расчета: учебное пособие / Новосибирск, 2022.

78. Петренко, Ю.В. Теоретические основы электротехники: от теории к практике: учебно-методическое пособие / Новосибирск, 2021.

79. Петренко, Ю.В. Торцевой асинхронный электродвигатель для моторколес подвижных транспортных средств / В.Н. Зонов, В.А. Аксютин, Ф.Э. Лаппи //Современные проблемы теории машин. 2014. № 2. С. 122-123.

80. Петренко, Ю.В. Исследование перегрева электромагнитного двигателя на динамику его работы / А.А. Скотников, В.А. Аксютин, В.Н. Зонов, Ф.Э. Лаппи, , А.П. Хуан // Современные проблемы теории машин. 2014. № 2. С. 128-129.

81. Петренко, Ю.В. Сила одностороннего магнитного осевого тяжения торцевого асинхронного двигателя мотор-колеса / В.Н. Зонов, В.Ф. Гобелков // Автоматизированные электромеханические системы. сборник научных трудов. под общ. ред. В. Н. Аносова. Новосибирск, 2011. С. 194-201.

82. Приступ, А.Г. Проектирование электрических машин с постоянными магнитами: учебное пособие / А.Ф. Шевченко, Ю.Г. Бухгольц, Т.В. Честюнина, Д.М. Топорков, Г.Б. Вяльцев // Новосибирск, 2021.

83. Приступ А.Г. Актуальные вопросы разработки цифровой модели синхронной электрической машины с постоянными магнитами с дробной зубцовой обмоткой / А.Н Царегородцев // Наука. Технологии. Инновации. Сборник научных трудов XV Всероссийской научной конференции молодых ученых, посвященной Году науки и технологий в России. В 10-ти частях. Под редакцией Д.О. Соколовой. Новосибирск, 2021. С. 83-86.

84. Приступ, А.Г. Способы улучшения гармонического состава магнитного поля в электрических машинах с дробными зубцовыми обмотками /Д.Ю. Бабицкий, Д.М. Топорков, З.С. Темлякова // Электротехника. 2021. № 6. С. 31-36.

85. Работнов, Ю.Н. Сопротивление материалов: Москва, Физматгиз, 1962.– 456 с.

86. Расчет радиальных газостатических подшипников турбомашин атомной энергетики. Руководящий технический материал. РТМ 108.129.101-76.

Редакционно-издательский отдел НПО ЦКТИ им. И.И. Ползунова. 194, Ленинград, Политехническая, 24.

87. Розин, Л.А. Метод конечных элементов/Л.А. Розин // Соросовский образовательный журнал – 2000. – Т. 6, № 4. – С. 120 – 127.

88. Румянцев, М.Ю., Захарова Н.Е., Сигачев С.И. Опыт разработки высокоскоростных электротурбомашин на кафедре ЭКАО МЭИ // Вестник Московского энергетического института. 2007. № 3. С. 45 – 50.

89. Румянцев, М.Ю., Захарова Н.Е., Сигачев С.И. Применение лепестковых газодинамических подшипников в турбогенераторных агрегатах малой мощности. Известия МГТУ «МАМИ», № 4 (22), 2014, Т.1, С. 61 – 68.

90. Семенова, К.В. Моделирование теплового состояния технических систем на основе теории цепей в технологии цифровых двойников / А.И. Тихонов, А.В. Стулов, А.В. Подобный // Надежность и долговечность машин и механизмов. сборник материалов XII Всероссийской научно-практической конференции. Иваново, 2021. С. 342-347.

91. Сергеев, П.С. Проектирование электрических машин / П.С. Сергеев. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1969. – 632 с.

92. Смольянов И.А. Математическое моделирование электромеханических установок в среде Comsol Multiphysics / Ф.Н. Сарапулов, С.Ф. Сарапулов, С.А. Бычков, Ф.Е. Тарасов // Учебно-методическое пособие. Екатеринбург, 2021.

93. Согрин, А.И. Потери в роторе синхронной электрической машины с возбуждением от постоянных магнитов // Наука ЮУрГУ. Материалы 66-й научной конференции (Электронный ресурс). Ответственный за выпуск: Ваулин С.Д., 2014. С. 1264-1272.

94. Татевосян, А.С. Исследование индуктированной электродвижущей силы в обмотке магнитоэлектрического генератора / А.С. Татевосян, А.А. Татевосян, В.В. Фокина // Электротехника. Электротехнология. Энергетика: сб. науч. тр. VII. Междунар. науч. конф. молодых ученых. Ч. 1. Секция «Электротехника». – Новосибирск: НГТУ, 2015. – С. 67 – 71.

95. Тихонов, А.И. Разработка методики проектирования торцевых синхронных двигателей из аморфной стали с использованием технологии цифровых двойников / А.В. Стулов, А.В. Лихачева, М.И. Никифоров, И.В. Еремин // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2021. № 4. С. 38-46.

96. Тихонов, А.И. Моделирование тепловых процессов с использованием электрических схем замещения в цифровых двойниках технических устройств / В.Е. Мизонов, А.В. Стулов, М.С. Фадеева //Вестн ик Ивановского государственного энергетического университета. 2021. № 5. С. 51-59.

97. Тихонова, О.В. Определение параметров схемы замещения асинхронного двигателя с кольцевыми обмотками / И.В Малыгин., А.Т. Пластун // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2022. Т. 22. № 1. С. 21-35.

98. Феодосьев, В.И. Сопротивление материалов: учебник для вузов. – 10-е изд., перераб. и доп. – Москва: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999. – 592 с.

99. Центральный металлический портал. Сталь конструкционная H12K15M10. – https://metallicheckiy-portal.ru/marki_metallov/stk/H12K15M10.

100. Швецов, Н.К. Исследование виброшумовых характеристик частотнорегулируемых асинхронных двигателей / Ю.Б. Казаков // Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии (Бенардосовские чтения). Материалы Международной (XX Всероссийской) Научно-Технической конференции. 2019. С. 191-194.

101. Швецов, Н.К. Расчет и анализ потерь в стали асинхронных двигателей при питании от преобразователей частоты с учетом несинусоидального перемагничивания сердечников / Ю.Б. Казаков // Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии (XIX Бенардосовские чтения). Материалы международной научно-технической конференции. 2017. С. 162-166.

102. Al-Hinai, A., Feliachi, A. Dynamic model of a microturbine used as a distributed generator. In Proceedings of the 34th Southeastern Symposium on System Theory, Huntsville, AL, USA, 18–19 March 2002; pp. 209 – 213.

103. Calculation of Radial Gas-Static Bearings of Turbomachines of Nuclear Power; Technical Guidance Material. RTM 108.129.101-76; Editorial and Publishing Department of the NGO TSKTI Named after I. I. Polzunov. Polytechnic: Leningrad, Russia, 1976.

104. Campbell P., Principles of a permanent-magnet axial-field DC machine / Proceedings IEE, 121, December 1974, p.1489 – 1494.

105. Chalmers, B.J. Developments in electrical machines using permanent magnets / B.J. Chalmers // Journal of magnetism and magnetic materials. 1996. Vol. 157 –158. p. 131 – 132.

106. Chalmers, B. J. W. Wu and E. Spooner. An axial-flux permanent magnet generator for a gearless wind energy system, IEEE Trans. On Energy Conversion, Vol. 14, no. 2, pp. 251 – 257, June 1999.

107. Danilevich Y.B, Antipov V.N, Kruchinina I.Y., Khozikov Y.F. Super powerful micro-turbo-generators: capabilities and perspectives: International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology. 2008. № 1. P. 149 – 151.

108. Fengxiang, W., et al. Design considerations of high-speed PM generators for micro turbines. in Power System Technology, 2002. Proceedings. PowerCon 2002. International Conference on. 2002. IEEE.

109. Filippov S.P., M.D. Dil'man and M.S. Ionov. Russian electric power industry needs for gas turbines: current state and prospects. Heat power engineering, 2017, № 11, pp. 53 – 65.

110. Gandja, SA, Martyanov AS. Method of accelerated calculation of axial magnetic flux synchronous generators: International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology. 2014. № 5 (145); 42–44.

111. Gandja, SA. The analysis of electromagnetic capacity for various design of valve cars with the axial stream: Bulletin of the South Ural state university. Series Power Engineering.2010. iss.14, N_{2} 32; pp. 64 – 69.

112. Gandzha, S.A., Kiessh I.E. and D.S. Aminov, Development of engineering technique for calculating magnet systems with permanent magnets. Proceedings – 2018 International conference on industrial engineering, applications and manufacturing, ICIEAM 2018, № 10.15593/2224-9397/2019.1.04.

113. Gandzha, S.A. Aminov D.S. and B. Kosimov, Development of engineering method for calculation of magnetic systems for brushless motors based on the finite element method, 2019 International conference on industrial engineering, applications and manufacturing, ICIEAM 2019.

114. Gandzha, S.A. Features of building a computer-aided design system for machines with an axial gap. Vestn. Yuzh. Ural. Gos. Un.Ser. Energy 2007, 20, 19-23. (In Russian)

115. Gandzha, S.A., Modelling of Permanent Magnet Direct Current Motor with Electromagnetic Reduction, S.A. Gandzha, Collection of papers of Software Users Sixth Conference CAD_FEMGmbH (20–21 April 2006), Moscow, 2006, pp. 358 – 360.

116. Gandzha, S.A. Multilevel optimization of DC valve electric machines with an axial air gap (VMAZ). In Proceedings of the XXV Russian School on Problems of Science and Technology, Dedicated to the 60th anniversary of Victory, Miass, Russia, 21–23 June 2005, p. 57.

117. Gandzha, S.A. Optimization of parameters of brushless electric machines of a direct current with an axial air gap // State and prospects of development of Electrotechnology (XII Benardos readings): TEZ. Doc. International. Scientific - tech. Conf., 1–3 June 2005 / Ivan. stateenergy. Univ. of Illinois – Ivanovo, 2005. – Vol. 2. – C. 82.

118. Gandzha, S.A. Optimal design of electric drives based on valve electric machines with axial clearance. Bull. Yuzhno Ural StateUniv. Ser. Energy 2009, N_{2} 34, pp. 68 – 72.

119. Gandzha S.A. and R.L. Halstead, Optimal design of brushless axial gap electric machines for low power windmills. Design World (engineering solution for product manufactures), 2012, № 1.

120. Gandzha, S. Proposals for the design of high-speed electric machines. 2016 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2016 – Proceedings2016, South Ural State University Chelyabinsk; Russian Federation; 19 – 20 May 2016.

121. Gandzha, S., Kiessh, I. Selection of winding commutation for axial gap machines with any phases. Proceedings – 2018 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2018May 2018, Number of article 87286362018 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2018; Moscow Polytechnic University Moscow; Russian Federation; 15 May 2018 до 18 May 2018.

122. Gandzha S.A., Erlisheva A.V. Starter-generator for autonomous source of energy supply. Seria "Energetika", 2005, Vipusk 6. № 9, pp.84 – 86. (In Russian).

123. Gandzha, S.A. The comparative analysis of permanent magnet electric machines with integer and fractional number of slots per pole and phase / S.A. Gandzha, A.I. Sogrin, I.E. Kiessh // Procedia Engineering. – 2015. – Vol. 129. – P. 408–414. DOI:10.1016/j.proeng.2015.12.137

124. Gandzha, S.; Kiessh, I. The high-speed axial gap electric alternator is the best solution for a gas turbine engine. In Proceedings of the 17th International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM 2017, Vienna, Austria, 27–29 November 2017; Volume 17, pp. 791–796.

125. Gandzha, S.A. Valve electric machines of direct current with an axial gap. Analysis and synthesis. In Proceedings of the Fifth Conference of Software Users CAD_FEM GmbH, Moscow, Russia, 21–22 April 2005; pp. 372–376.

126. Gandzha S.A., Kiessh I.E. Varible speed power. Procedia Engineering 129, pp. 731–735, December 2015.

127. Gandzha, S.A. Modelling of Permanent Magnet Direct Current Motor with Electromagnetic Reduction, S.A. Gandzha, Collection of papers of Software Users Sixth Conference CAD_FEMGmbH (20–21 April 2006), Moscow, 2006, pp. 358–360.

128. Giemza Boleslaw. Gas-dynamic foil bearings application in high-speed turbines. Journal of KONBiN, 3, 4 (27, 28), 2013.

129. Gieras J. F., Wang R. J. and M. J. Kamper. Axial flux permanent magnet brushless machines" (2nd edition), Springer, 2005, p. 350.

130. Hajagos, L.M. and G.R. Berube, Utility experience with gas turbine testing and modeling, in Proceedings, IEEE PES Winter Meeting, vol. 2, 2001, pp. 671 - 677 Jan. / Feb. 2001, Columbus, OH.

131. Hannet L.N. and Afzal Khan, Combustion turbine dynamic model validation from tests. IEEE Transactions on Power Systems, vol. 8, N_{2} 1, pp. 152–158, Feb. 1993.

132. High-speed electric machines. [Online]. Available: https://w-elma.com/ catalog/vsem/.

133. Huang M.S. and T.A. Lipo. Axial Flux Permanent Magnet Disc Machines: A Review, In Conf. Record of SPEEDAM, May 2004, pp. 61 – 71.

134. Kopylov, I.P. Design of electric machines: textbook. Moscow: High school, 2005.

135. Kruchinina, I.Yu. Antipov, V.N. Creation Problems of High-Speed Mini Turbo Generators and Ways of their Solution: Informationno-upravliaiushchie sistemy (Information and Control Systems) 2012. – \mathbb{N} 4. – p. 25 – 34.

136. Lasseter, R. Dynamic models for micro-turbines and fuel cells. In Proceedings of the IEEE PES Summer Meeting, Vancouver, BC, Canada, 15 – 19 July 2001; Volume 2, pp. 761 – 766.

137. Malmquist, A. Analysis of a Gas Turbine Driven Hybrid Drive System for Heavy Vehicles. Ph.D. Thesis, School of Electrical Engineering and Information Technology, KTH, Stockholm, Sweden, 1999.

138. Malmquist, A., Aglen, O., Keller, E., Suter, M., Wickstrom, J. Microturbines: Speeding the shift to distributed heat and power. ABB Rev. 2000. No 3, p. 22 - 30.

139. Makarichev, Y.A. Analysis of the Characteristics of an Electromechanical Starter in a Gas Turbine Plant / Y.V. Zubkov, Y.N. Ivannikov, I.V. Gulyaev // Russian Electrical Engineering. 2020. T. 91. № 3. C. 235.

140. Makarichev, Y.A. Reduction of Magnetic Loss of Active Electromagnetic Suspension / Y.N. Ivannikov // Proceedings - ICOECS 2021: 2021 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems. 2021. C. 648-653.

141. Makarichev, Y. Effect of Using Permanent Magnets in a Radial Electromagnetic Bearing / Y. Ivannikov // Proceedings - ICOECS 2020: 2020 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems. 2020. C. 9278515.

142. Makarichev, Y.A. Analysis of the Characteristics of an Electromechanical Starter in a Gas Turbine Plant / Y.V. Zubkov, Y.N. Ivannikov, I.V. Gulyaev // Russian Electrical Engineering. 2020. T. 91. № 3. C. 235.

143. Menshchikov, I.A. Diagnostics of Emergency Conditions of the Engine DC / G.G. Ugarov, V.I. Moshkin, Y.V. Petrenko // Journal of Physics: Conference Series. 2020 International Conference on Information Technology in Business and Industry, ITBI 2020. BRISTOL, ENGLAND, 2020. C. 012153.

144. Merkulov, V.I.; Plykin, M.E.; Tishchenko, I.V. On the issue of engineering methodology for calculating lobe gas-dynamic bearings of turbochargers. Izv. MSTU MAMI 2012, № 1, p. 279 –286.

145. Metal Grader: Structural Steel H12K15M10. Available online: https://metallicheckiy-portal.ru/marki_metallov/stk/H12K15M10 (accessed on 6 August 2012).

146. Neustroev, N., Gandzha, S., Chuyduk, I.A. Passive Magnet Bearing Development for Axial Flux Permanent Magnet Generator with Diamagnetic Armature. In Proceedings of the Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research and Practice, Magnitogorsk, Russia, 25– 26 September 2020. – pp. 98–102. 147. Neustroev, N.I. Starter Generator Design Development for Modern Micro Gas Turbine Plant. 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM).

148. Rowen W. I., "Simplified mathematical representations of heavy duty gasturbines", Journal of Engineering for Power, Transactions ASME, vol. 105, no. 4, pp. 865–869, Oct, 1983.

149. Rumyantsev, M.Yu., Zakharova, N.E., Sigachev, S.I. Application of lobe gas-dynamic bearings in low-power turbo-generator units. Izv. MSTU MAMI 2014, № 1, p. 61–68. (In Russian).

150. Sitapati, K. and R. Krishnan, Performance comparisons of radial and axial field, permanent-magnet, brushless machines. IEEE Transactions on Industry Applications, 2001. № 37(5): p. 1219 – 1226.

151. Smolyanov I. Calculation of Linear Induction Motor Features by Detailed Equivalent Circuit Method Taking Into Account Non-Linear Electromagnetic and Thermal Properties / F. Sarapulov, F. Tarasov // Computers & Mathematics with Applications. 2019. T. 78. № 9. C. 3187-3199.

152. Sogrin, A. Study of Magnetic Losses in Rotor of Permanent Magnet Synchronous Machine // Proceedings of 2014 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems, MEACS 2014. 2014. C. 6986897.

153. Tikhonova, O.V. Electromagnetic Calculation of Induction Motor by ANSYS MAXWELL / A.T. Plastun // Proceedings of the 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2018. 2018. C. 822-826.

154. Website of the company Capstone. [Online]. Available: https://capstone.ru/.

155. YASA P400 R Series electric motors and generators. – https://www.yasa.com/yasa-p400/.

156. Zapadnya, M.F. Special-purpose high-velocity permanent magnet synchronous generator / M.F. Zapadnya, A.P. Shikhtin // Russian Electrical

Engineering. – 2016. – Vol. 87, no. 11. – P. 647–650. DOI: 10.3103/S1068371216110134.

157. Zubkov, Y.V. Mechanical Strength of the Rotor with Internal Permanent Magnets // Proceedings - ICOECS 2021: 2021 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems. 2021. C. 490-494.

158. Zubkov, Y.V. Selection of Permanent Magnet Material for Starter Excitation / D.A. Vladimirov // 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, Fareastcon 2020. 2020. C. 9271076.

159. Zubkov, Y.V. Finding Electromagnetic Loads and Magnetic-Field Factors in Design of Integrated Brushless Excitation Dc Generator / Y.A. Makarichev, V.E. Antropov // Proceedings - 2019 International Ural Conference on Electrical Power Engineering, UralCon 2019. 2019. C. 217-222.

160. Zubkov, Y.V. Heating the Starter with Magnetoelectric Excitation During Hot-Start and Dry Motoring of a Gas-Turbine Engine / V.N. Ovsyannikov // 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2018. 2018. C. 8602951.

161. Zhu Q., Aydin M., Lipo T.A., Huang S., Tapia J.A. Sizing equation analysis for field controlled PM machines: a unified approach // Electric Machines and Drives Conference, 2003. IEMDC'03. IEEE. International. Vol. 2.

162. Yu S.O. Mathematical Modeling of Electromechanical Characteristics of Linear Electromagnetic and Induction-Dynamic Motors / F.N. Sarapulov, D.N. Tomashevsky // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. «Advanced Problems of Electrotechnology» 2020. C. 012020.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1. ИНФОРМАЦИЯ О МИКРОГАЗОТУРБИННОЙ УСТАНОВКИ КОМПАНИИ CAPSTONE

Микротурбинные установки компании Capstone

является Capstone признанным лидером Фирма производстве B микротурбинных энергетических установок. В 1998 году Capstone Turbine Corporation первой предложила коммерческий продукт, основанный на микротурбиной технологии, явившийся результатом десятилетних усилий коллектива разработчиков. На сегодняшний день, Capstone Turbine, совместно со своими партнерами, установила более 3000 микротурбинных систем по всему миру. Турбоустановки Capstone отличаются несколькими существенными особенностями, обеспечнвшими им решающие преимущества перед установками фирмконкурентов. Эти особенности обеспечивают повышенную надежность, уменьшение затрат на эксплуатацию и малые габариты. К указанным особенностям микротурбин Capstone следует отнести:

 а) наличие воздушных подшипников у единого высокооборотного турбогенераторного ротора;

 б) использование компактного рекуператора, конструкция которого обеспечила малые габариты всей установки;

в) использование высокоэффективной камеры сгорания, обеспечивающей минимальный выброс окислов азота NOx. Воздушные подшипники обеспечили полный отказ от системы жидкой смазки, что позволило увеличить ресурс и сократить расходы на обслуживание.

Фирма Capstone выпускает установки на мощность 30 кВт, 65 кВт, 200 кВт, 600 кВт, 800 кВт, 1 МВт. Ниже представлен общий вид установки Capstone (рис. 2.3.1.1 - 2.3.1.3) и принципиальные тепловые и энерго схемы (2.3.1.4 - 2.3.1.6). Сводные данные по экономическим, эксплуатационным, массогабаритным параметрам установок Capstone представлены в таблице 2.3.1.1



Общий вид микротурбины Capstone

Продолжение приложения 1

Рынок газотурбинных энергоагрегатов мощностью до 100 кВт



Внешний вид микротурбинной установки (на примере модели С30)



Внешний вид микротурбинной установки (на примере модели С30)
Продолжение приложения 1

Рынок газотурбинных энергоагрегатов мощностью до 100 кВт

Основные составляющие части микротурбинной установки Capstone:

- Погодное и шумоизолирующее укрытие;
- б. Турбогенератор;
- в. Топливная система;
- г. Модуль управления мощностью;
- д. Блок аккумуляторных батарей (АКБ);
- е. Модуль управления блоком АКБ;
- ж. Модуль присоединений потребителя;
- з. Локальный пульт управления.

Таблица 2.3.1.1 – Основные параметры установок Capstone

Параметр	C 30	C 60 (C 65)	C 200
Электрическая мощность	30 кВт	60 кВт	200 кВт
КПД по электричеству	27%	29%	34 %
КПД общий	80%	80%	85 %
Напряжение на выходе,	400-480 вольт	400-480 вольт	400-480 вольт
Максимальный ток в фазе	46 ампер	100 ампер	310 ампер
Частота тока	50/60 герц	50/60 герц	1060 герц
Bec	478 кг	1000 kt	(3640) 3180 kt
Вес аккумуляторных батарей	173 кг	363 kt	726 кг
Габариты	1900х714х1344 мм	2108х762х1956 мм	3660*1700*2490 мм
Топливо	Газ, керосин, дизель	Газ	Газ
Давление топлива на входе	0,3-3,8 бар	5,2-5,6 бар	5,2 бар
Расход топлива Nном в час	12 м3	23,2 м3	71,4 м3
Выход тепловой энергии	-	571000 кДж/ч	1420 МДж/ч
Вредные выбросы при 15% О2	< 9 ppm NOx	< 5 ppm NOx	< 9 ppm NOx
Уровень шума на 10 м	65 dBA	70 dBA	65 dBA
Расход газа за турбиной	0,31 кг/с	0,48 kt/c	1,3 кг/с
Температура газа за рекуператором	275 oC	307 oC	280 oC
Скорость вращения	96000 об/мин	96000 об/мин	45000 об/мин

Продолжение приложения 1

Рынок газотурбинных энергоагрегатов мощностью до 100 кВт

Конструкция турбогенератора

Турбогенератор микротурбинной установки включает в себя газотурбинный двигатель и генератор. Газотурбинный двигатель состоит из компрессора, рекуператора, камеры сгорания, турбины и выхлопного газохода. Двигатель в разрезе показан на рис. Рисунок 2.3.1.6. Запуск микротурбинного двигателя осуществляется от встроенного блока аккумуляторных батарей. Двигатель охлаждается воздухом и не потребляет масло. Крыльчатка компрессора и ротор турбины смонтированы на одном валу с генератором. Малый вес вала двигателя уменьшает инертность микротурбины, позволяя быстрее реагировать на повышение и снижение выходной мощности. Этот вал поддерживается на воздушных подшипниках. Скорость вращения вала двигателя генератора 45 000 – 96 000 об/мин. При скорости 96 000 оборотов в минуту выходное напряжение составляет 277 В. Двухполюсный генератор на постоянных магнитах охлаждается потоком воздуха, поступающего в двигатель.



Конструкция микротурбинного двигателя Сб5





ПРИЛОЖЕНИЕ 2. ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МГТУ ОСНОВНЫХ ПРОИЗВОДИТЕЛЕЙ

Характеристики		Capstone		Calnetix - Elliott	Turbec	Ingersoll
Bec	KT	1000	600	1860 - 2040	2200 - 3700	1860
Мощность электрическая	кВт	60	30	100	105	70
частота вращения	об/ мин	96000	96000	68000	70000	38000
частота генератора	об/ мин	96000	96000	68000	70000	1500
подпипники		воздушные	воздушные	шарики + сколь	шарики	шарики
кпд (кпд сум)	%	29 (75)	27 (75)	29 (75)	30 (77)	28
коэф-т регенерации	%	80	80	90	90	90
тем-ра газа за рекуператором	oc	307	275	280	270	
тем-ра газа перед турбиной			>840 C	926 C	950 C	
особенности турбины	1	l ЦБ ступ	l ЦБ ступ	l ЦБ ступ	l ЦБ ступ	две турбины
сжатие газа в компрессоре		<5,0	3,54,0	4	4,5	
расход газа	кг/с	0,48	0,31	1	0,8	
материал колеса турбины		Ni сплав	Ni сплав	Ni сплав	Ni сплав	Si3N4 керам
топливо		газ и др	газ и др	газ и др	газ и др	газ
Экология - шум	дб	65	60	75	70	75
Выбросы NOx	ррт	< 9.0	< 9.0	< 24	< 15	9
Ресурс (Кап. ремонт)	चac	100 000 (60000)	100 000 (60000)	72 000 (24 000)	60 000 (30 000)	80 000

• Сравнение микротурбин разных производителей

ПРИЛОЖЕНИЕ 3. ПИСЬМО О ГОТОВНОСТИ ЗАКУПОК ГЕНЕРАТОРА ПРЕДЛАГАЕМОЙ КОНСТРУКЦИИ ОТ ИНДУСТРИАЛЬНОГО ПАРТНЕРА АО «СКБ «ТУРБИНА»



Акционерное общество «Специальное конструкторское бюро «Турбина» (АО СКБ «Турбина»), 454007. Россия, г. Челябинск, пр. Ленина, д. 2 б. тел: +7 (351) 775-10-37. факс: +7 (351) 775-10-36, E-mail: info@skb-turbina.com / www. skb-turbina.com

31.03.2022 г. № 13/1302

Ассистенту кафедры ТОЭ ЮУрГУ Н.И. Неустроеву Копия: Доктору технических наук Заведующему кафедрой ТОЭ ЮУрГУ

454080, г. Челябинск, проспект Ленина, 76, Главный корпус, аудитория 267 Тел. 89120810902

Уважаемые коллеги!

Настоящим сообщаем, что по итогам ознакомления с материалами по проекту «Разработка аксиального генератора на постоянных магнитах с аксиальным магнитным потоком и диамагнитным якорем на комбинированном газодинамическом подвесе», сообщаем, что АО СКБ «Турбина» выражает заинтересованность в приобретении результатов разработки, а именно высокооборотных генераторов, с частотой вращения не ниже 60000 оборотов, мощностью 100 кВт и 200 кВт, для установки в микрогазотурбинные агрегаты. Потребность в генераторах 100 кВт составляет 20 штук в год, начиная с 2023 года, орнентировочная стоимость изделия – 2 000 000 (Два миллиона) рублей без учета НДС.

Генеральный директор

Ħ

Э.Г. Баженов

Исп. Примаченко А.А., (351) 210-57-77, доб. 3-72, раз@skb-turbina.com



Система менеджмента качества сертифицирована в СДС «Ростех», соответствует требованиям ГОСТ Р ИСО 9001-2015 и дополнительным требованиям ГОСТ РВ 0015-002-2012

ПРИЛОЖЕНИЕ 4. ДОГОВОР О ПРЕДОСТАВЛЕНИИ ГРАНТА ОТ ФОНДА СОДЕЙСТВИЯ ИННОВАЦИЯМ

0067709: Неустроев Нахолай Игоревач Челябажская область - 2020

Федеральное государственное бюджетное

форм предприятий в научно-технической

сфере» (Фонд содействия инновациям)

учреждение «Фонд содействия развитию малых

119034, г. Москва, 3-ий Обыденский переулок,

Адреса и банковские реквизиты сторон

ФОНЛ:

Adpec:

д. 1, стр. 5

ГРАНТОПОЛУЧАТЕЛЬ: Неустроев Николай Игоревич

Дата рождения: 06.05.1993

Паспорт: 75-12-254797 выдан отделом УФМС России по Челябинской области в Тракторозаводском р-не гор. Челябинска 15.05.2013

ИНН: 745212034742

Адрес регистрации:

454080,обл. Челябинская, г. Челябинск, ул. Лесопарковая, д.7-Г, кв.235

Тел: +7 (495) 231-19-01, Факс: +7 (495) 231-19-02 Банковские реквизиты: п/с 21956002260 в Межрегиональном

ИНН/КПП: 7736004350/770401001

операционном УФК Операционный департамент Банка России г.Москва БИК 024501901 Единый казначейский счет 40102810045370000002 Казначейский счет 0321464300000019500 Банковские реквизиты: Лицевой счет Грантополучателя: 40817810772007887410 в банке ЧЕЛЯБИНСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ N8597 ПАО СБЕРБАНК (ЧЕЛЯБИНСК), БИК 047501602, k/c 3010181070000000602

Заместитель генерального директора Микитась А. В.

Грантополучатель Неустроев Н. И.

Документ подписан усиленной квалифицированной электронной подписью Серийный номер: 01С822A800C1ABBBB443A2E259EE36989C Владелец: ФОНД СОДЕЙСТВИЯ ИННОВАЦИЯМ Миютась Андрей

Владимирович Действие сертификата: с 20.05.2020 по 20.08.2021

Документ подписан усиленной квалифицированной электронной подписью Серийный номер: 025A74150112AD51A5410C18897138839A Владелец: Неустроев Николай Игоревич Действие сертификата: с 22.04.2021 по 22.04.2022

ПРИЛОЖЕНИЕ 5. ДОГОВОР О ПРЕДОСТАВЛЕНИИ ГРАНТА ОТ РОССИЙСКОГО ФОНДА ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ



Договор № 20-38-90175\20 о предоставлении гранта победителю конкурса и реализации научного проекта



6. Реквизиты

6.1. РФФИ

Федеральное государственное бюджетное учреждение "Российский фонд фундаментальных исследований" Ленинский проспект, д.32А, Москва, 119334 ИНН 7736064976 КПП 773601001 л/с: 21956006930 в Межрегиональном операционном УФК p/с: 40501810000002002901 в ОПЕРАЦИОННОМ ДЕПАРТАМЕНТЕ БАНКА РОССИИ, БИК 044501002 ОКПО 00046539 ОКВЭД 72.19

6.2. Грантополучатель

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)" адрес г.Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76 почтовый индекс 454080 ИНН **7453019764** КПП **745301001**, л/с 30696Г34690 в УФК по Челябинской области ОКВЭД **80.30.1** ОКПО **02066724** Название организации для платежного поручения **ФГАОУ ВО "ЮУрГУ (НИУ)", Южно-Уральский государственный университет**

Подписи сторон

РФФИ Грантополучатель

Продолжение приложения 5



Сведения об Исполнителе

ΟΚΟΠΦ	Категория исполнителя	Наименование организации	Сокращённое наименование организации	Учредитель (ведомственная принадлежность)	огрн
75101 - Федеральные государственные автономные учреждения	образовательная организация	Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)"	ФГАОУ ВО "ЮУрГУ" (НИУ), Южно-Уральский государственный университет	1322600 - Министерство науки и высшего образования Российской Федерации	1027403857568



ПРИЛОЖЕНИЕ 6 АКТ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ В АО «НПО «ЭЛЕКТРОМАШИНА»



ЭЛЕКТРОМАШИНА



154][17, г. Чалибинск, ул. Манинистригталев, 2, Тальфон/фант (251) 225-75-75, (351) 255-72-63 Тальфон/(351) 255-72-53, www.npodim.ru, e-mail: spodim.gapodim.ru, Of Pit 104/122507736 ОКПО 0/53443 ПИПАХИП Такуа4495/744901001

АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО «НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ОБЪЕДИЛЕНИЕ «ДЛЕХТРОМАШИНА»

АКТ внедрения результатов диссертационного исследования

Настоящим удостоверяю, что результаты диссертационной работы Неустроева Николая Игоревича «Разработка высокоскоростного вентильного генератора с аксиальным магнитным потоком и диамагнитным якорем на комбинированном магнитном и газодинамическом подвесе для микро газотурбинных установок» внедрены на предприятии АО «НПО «Электромашина». Полученные аналитические зависимости потокосцепления обмотки аксиальной машины с диамагнитным якорем и методика расчета высокоскоростного многосекционного вентильного генератора с аксиальным магнитным потоком и диамагнитным якорем используются при поверочных расчетах вновь разрабатываемых изделий на этапе эскизного проекта. Полученная методика расчета механической прочности бандажа индуктора научно-исследовательских работах н опытнопри используется конструкторских разработках, а также при сопровождении серийного производства.

С уважением, Заместитель генерального директог главный конструктор В.В. Кардаполов

