

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого  
Президента России Б.Н. Ельцина»



На правах рукописи

**Неустроев Николай Игоревич**

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

2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2022

Работа выполнена на кафедре «Электропривод, мехатроника и электромеханика» ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор,  
**Ганджа Сергей Анатольевич**

Официальные оппоненты: **Кзаков Юрий Борисович**, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», профессор кафедры электромеханики;

**Зубков Юрий Валентинович**, доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Самарский государственный технический университет», профессор кафедры электромеханики и автомобильного электрооборудования;

**Вавилов Вячеслав Евгеньевич**, доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», заведующий кафедрой электромеханики

Защита состоится « 14 » декабря 2022 г. в 12:30 ч на заседании диссертационного совета УрФУ 2.4.09.23 по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, ауд. И-420 (зал Ученого совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», <https://dissovet2.urfu.ru/mod/data/view.php?d=12&rid=4002>.

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2022 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Хальясмаа Александра Ильмаровна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** 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 электрической энергии ставится цель по снижению уровня потерь в электрических сетях.

В настоящий момент большая часть выработки электроэнергии обеспечивается объектами централизованной энергетики, но при этом имеется большое количество потребителей энергии, энергоснабжение которых невозможно обеспечить 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, расположение источников питания на подвижных объектах (самолетах, кораблях, железнодорожном и автомобильном транспорте). Обеспечение таких потребностей в электроэнергии возможно за счет введения в эксплуатацию объектов распределенной генерации. Развитие распределенной энергетики создает совокупность преимуществ: снижение стоимости электроэнергии по сравнению с покупкой из общей сети, возможность контролировать надежность и качество поставляемой энергии, подстраиваясь под индивидуальные потребности потребителя.

В настоящий момент агрегаты для автономных объектов 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 позитивно скажется на доступности агрегатов для систем распределенной генерации и их цене. **Самым зарекомендовавшим себя решением является использование микро газотурбинных установок для распределенной генерации электроэнергии.**

Газотурбинные установки (ГТУ) 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. По состоянию на 1 января 2017г. 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 являются важными и актуальными.**

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 день 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., Беспалов В.Я., 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;

- Ивановский государственный технический университет: ученые Казаков Ю.Б., Герасимов Ю.Б., Тихонов А.И., Новиков Н.Н. занимаются разработкой методик анализа электромагнитных полей, методик тепловых расчетов, разработкой систем автоматизированного проектирования электрических машин;

- Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина: ученые: Сарапулов Ф.Н., Миронов С.Е., Андреев Е.Н., Пластун А.Т. занимались разработкой конструкции многодисковых машин с аксиальным потоком, развитием теории и методик расчета синхронных машин;

- Национальный исследовательский Томский политехнический университет: работы ученых Буряниной Е.В., Леонова С.В., Федянина А.Л. по разработке математических моделей и методик расчета синхронных электрических машин торцевого исполнения;

- Новосибирский государственный технический университет: ученые Петренко Ю.В., Приступ А.Г. занимались разработкой теоретических основ и методик расчета торцевых электродвигателей для мотор-колеса;

- Самарский государственный технический университет: ученые Зубков Ю.В., Ануфриев А.С., Макаричев Ю.А., 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., Вавилов В.Е., Каримов Р.Д., Шемелин Д.И., Минияров А.Х. проводили междисциплинарную разработку ультра-высокоскоростной

электрической машины, исследовали математическую модель системы генерирования электроэнергии на основе машины с постоянными магнитами;

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

– Южно-Уральский государственный университет: ученые С.А. Ганджа, С.Г. Воронин, А.И. Согрин 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: M. 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.

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 изнашивают опору, при старте они вообще не работают. Магнитный подвес не зависит от скорости вращения вала, но не имеет достаточной жесткости. Идея совмещения этих опор может оказаться эффективной в разрешении противоречий.

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 ее синтеза и анализа.

**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.** Использовались аналитические методы общей теории электромеханических преобразователей энергии. Применялись аналитические и численные методы расчета физических полей на основе метода конечных элементов, реализованных программных средах.

**Научная новизна** представляет совокупность методик проектирования и анализа высокоскоростного вентильного генератора с аксиальным магнитным потоком и диамагнитным якорем на комбинированном магнитном и газодинамическом подвесе для микро газотурбинных 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 работы 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 сокращает время на проведение анализа и позволяет проводить оптимизацию геометрии магнитной цепи. Методика расчета механической прочности бандажа ротора аксиального генератора позволяет проводить точный анализ прочности бандажа с учетом распределенной инерциальной нагрузки от постоянных магнитов. Методики вентиляционного и теплового расчетов, 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 и качества функционирования 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.** 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 Automation 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, г. Челябинск.

**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 РФ 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 моделирование комплексной модели генератора и неуправляемого вентиляционного 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.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**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. Исходя из требований малых габаритов и веса, мировые производители делают МГТУ с высокой частотой вращения ротора до 70000-100000 об/мин, которая ограничивается только прочностью вращающихся частей, на которые воздействуют центробежные силы. 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 рис.1.

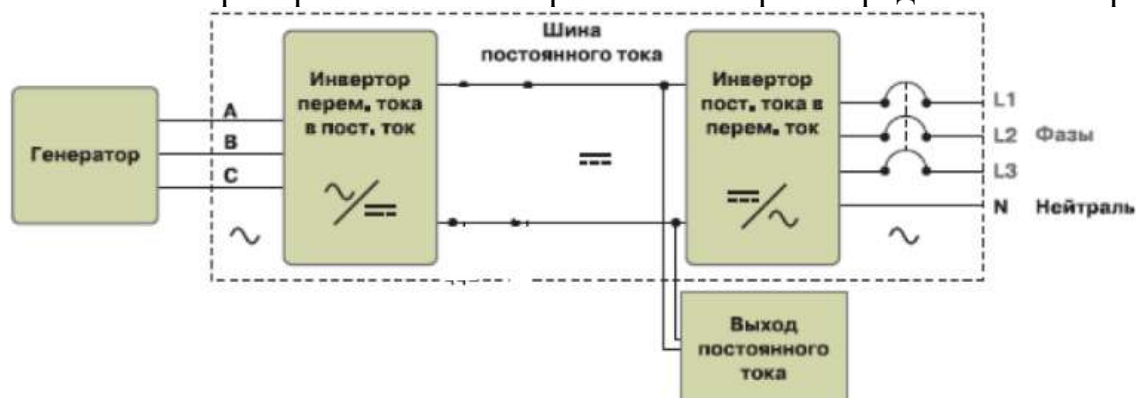


Рис.1. Схема преобразования постоянного тока в трёхфазный

Следует уделить особое внимание существующим ограничениям использования и дальнейшей модернизации генераторов в составе МГТУ на базе различных типов электрических машин. Асинхронные машины имеют низкие удельные показатели. Ввиду малых габаритов быстроходных электрических машин потери в обмотке и стали ротора асинхронной машины, создают угрозу перегрева. Машины постоянного тока непригодны в качестве генератора для МГТУ ввиду наличия щеточно-коллекторного узла, высоких потерь в стали и обмотке ротора. Наиболее рациональным вариантом генератора для высокоскоростной МГТУ может быть синхронная машина с возбуждением от постоянных

магнитов. Этот класс электрических машин лишен всех перечисленных выше недостатков. Известно два конструктивных исполнения синхронных машин на постоянных магнитах: с радиальным рабочим магнитным потоком и с аксиальным рабочим магнитным потоком. Отечественные и зарубежные фирмы делают генератор с радиальным магнитным потоком (рис.2), так как данный тип машин хорошо изучен, технологии отработаны, методики проектирования выверены.

Однако, радиальная конструкция синхронной машины на постоянных магнитах имеет следующие недостатки:

- частота перемагничивания составляет более 1000 Гц. Это приводит к повышенным потерям в стали и соответственно низкому КПД генератора;
- одностороннее магнитное притяжение снижает ресурс газодинамического подшипника газовой турбины в режимах разгона и торможения генератора;
- сложная система охлаждения ввиду существенных потерь на перемагничивание, а также размещения обмотки в пазах пакета статора;
- ограничение мощности генератора вследствие ограничения максимального диаметра ротора механической прочностью и длины колебательной устойчивости вращающихся элементов.



Рис.2. Генераторы радиальной конструкции, применяемые в МГТУ

Эти недостатки ограничивают дальнейшее развитие радиальной конструкции генераторов. Таким образом, в качестве базовой конструкции выбран вентильный многосекционный генератор с аксиальным зазором и диамагнитным якорем, у которого отсутствуют магнитные потери, имеется возможность повышения жесткости и исключения резонансных частот в диапазоне рабочих частот вращения за счет организации опор на поверхности индуктора, повышения мощности за счет увеличения количества секций. Элементы конструкции и активная часть аксиального генератора представлены на рис.3.

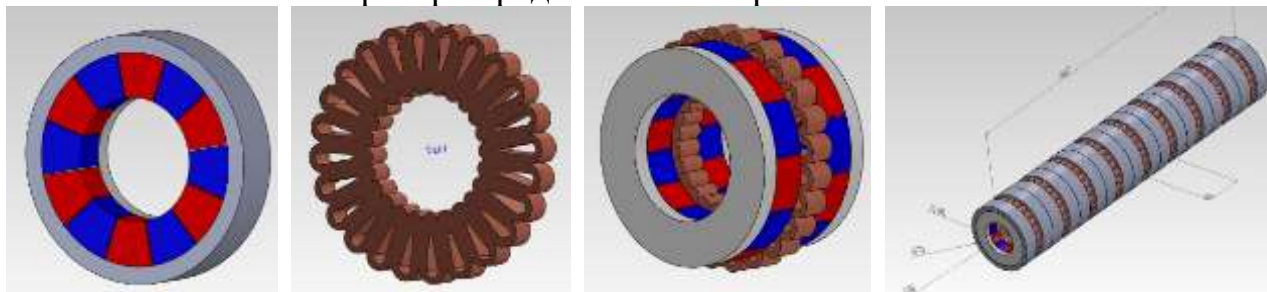


Рис.3. Индуктор, обмотка якоря, секция якоря и многосекционный генератор

По сравнению с радиальной конструкцией аксиальный многосекционный генератор с диамагнитным якорем имеет ряд существенных преимуществ:

1. Отсутствуют потери на перемагничивание, высокий КПД.
2. Повышается колебательная устойчивость вращающихся частей.
3. Снижается себестоимости за счет исключения электротехнической стали.

4. Повышается надежность разделением фаз в обмотке по секциям.
5. Повышается коэффициент унификации конструкции за счет модульности.

Исходя из проведенного анализа можно сделать вывод о том, что вентиляный генератор с аксиальным магнитным потоком и диамагнитным якорем позволяет устранить препятствия на пути дальнейшего наращивания удельных характеристик автономных источников генерации электрической энергии.

**Вторая глава** посвящена разработке методики определения диаметра бандажного кольца по пределу прочности от действия распределенных центробежных нагрузок постоянных магнитов и толстостенного бандажа. Электромагнитная мощность аксиальной машины имеет следующее уравнение:

$$P_{\text{эмmod2}(180-180/m)} = \frac{\pi}{2} A_{\text{ср}} B_{\delta} \omega \frac{(D_{\text{н}} + D_{\text{вн}})^2}{2} L_{\text{к}} K_{\text{mod2}(180-180/m)} K_{\text{эф}(180-180/m)};$$

где  $P_{\text{эмmod2}(180-180/m)}$  - электромагнитная мощность вентинной машины аксиальной;  $A_{\text{ср}}$  - линейная токовая нагрузка на среднем диаметре кольца индуктора;  $B_{\delta}$  - магнитная индукция в аксиальном зазоре;  $\omega$  - угловая частота вращения;  $D_{\text{н}}$  - наружный диаметр кольца индуктора;  $D_{\text{вн}}$  - внутренний диаметр кольца индуктора;  $L_{\text{к}}$  - толщина кольца индуктора;  $K_{\text{mod2}(180-180/m)}$  - коэффициент, определяемый типом конструкции;  $K_{\text{эф}(180-180/m)}$  - коэффициент, определяемый типом коммутации.

Из уравнения видно, что электромагнитная мощность при прочих равных условиях зависит от наружного диаметра кольца индуктора во второй степени. Это означает, что наружный диаметр кольца индуктора существенным образом влияет на энергетику аксиальной машины и его надо выбирать максимально возможным. Этот диаметр ограничен прочностью бандажа.

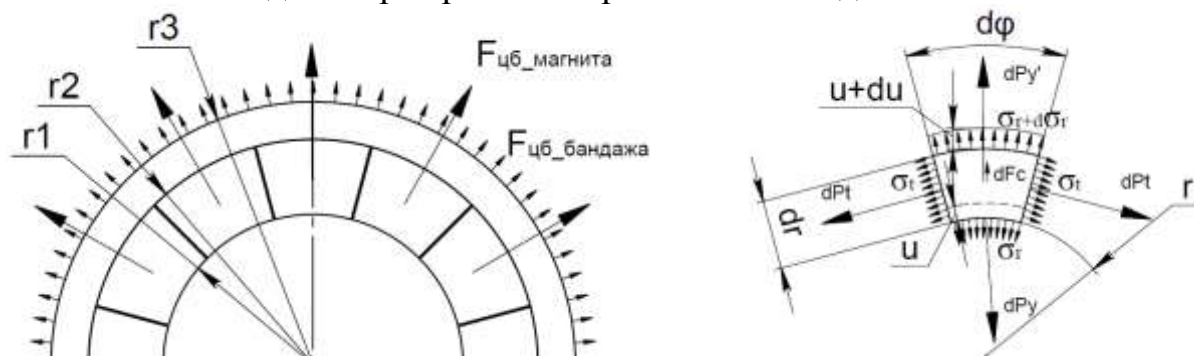


Рис.4. Схема инерциальных распределенных нагрузок, действующих на бандаж

Существующие методики механического расчета дают значительную погрешность. Было принято решение разработать методику точного анализа механической прочности для раскрытия резервов повышения наружного диаметра ротора и энергетики всей машины. Была определена схема нагружения и обозначены нагрузки для элемента бандажа бесконечно малого размера (рис.4).

Опираясь на общую теорию сопротивления материалов было получено решение предложенной системы инерциальных нагрузок в виде лаконичных уравнения, описывающих радиальные и тангенциальные напряжения:

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

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

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

Полученные выражения коэффициентов позволяют получить уравнения радиальных и тангенциальных напряжений, с последующим расчетом эквивалентных напряжений. Предложенная методика проверена более точным методом конечных элементов (рис.5) и показала погрешность на уровне, не превышающем 2,4%. Полученная методика дает возможность проводить оптимизацию толщины бандажа решением аналитических выражений без необходимости использования ресурсоемких инструментов, не снижая точность проводимых расчетов.

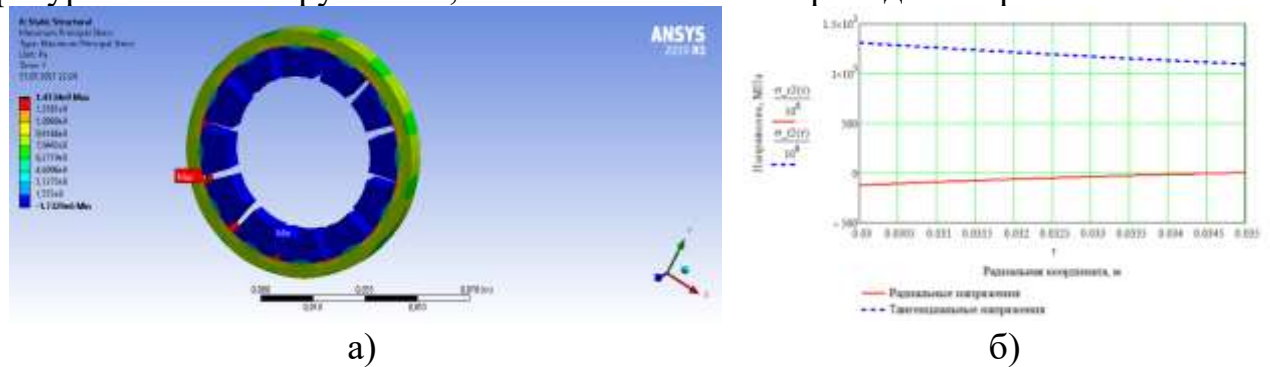


Рис.5. Сравнение результатов распределения напряжений по толщине бандажа, полученных по разработанной методике (а) и посредством ПО Ansys (б)

Рекомендована высокопрочная мартенситная сталь для бандажа ротора, позволяющая обеспечить максимально возможный диаметр индуктора.

**В третьей главе** была разработана методика расчета многосекционного аксиального генератора с диамагнитным якорем, опирающаяся на вновь разработанную математическую модель расчета потокосцепления обмоток аксиального генератора. Учитывая конструктивную особенность разрабатываемого генератора, заключающуюся в наборе генератора из одинаковых секций, существует возможность рассчитывать только одну секцию, при этом параметры всего генератора могут быть получены путем учета количества секций. Обмотки всех секций рекомендуется соединить последовательно, во избежание возникновения уравнительных токов при параллельном соединении.

Мощность фазы может быть определена:

$$P_{phA} = \frac{P}{m_1};$$

где:  $P$  – 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 380 В переменного тока:



$$U_{m_{line}} = U_{const};$$

Действующее значение фазного напряжения соответственно определяется:

$$U_{f_{phase}} = \frac{U_{m_{line}}}{\sqrt{2} \cdot \sqrt{3}};$$

Ток в фазе одной секции определяется из мощности на одну фазу и требуемого действующего значения фазного напряжения:

$$I = \frac{P_{phA}}{U_{f_{phase}}};$$

Требуемое значение тока в обмотке секции определяет предварительное значение минимального сечения провода:

$$S_{provoda} = \frac{I}{j};$$

где:  $S_{provoda}$  – сечение провода в кв. метрах,  $I$  – действующее значение фазного тока (А),  $j$  – допустимая плотность тока в амперах на кв. метр.

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

$$A_{provoda} = \frac{K_{B_{provoda}} \cdot \frac{\pi \cdot d_{magnet}}{2 \cdot p \cdot 2}}{W_p};$$

где:  $K_{B_{provoda}} = 0,5$  – коэффициент, определяющий использование тангенциальной длины половины полюсного деления,  $d_{magnet}$  – внутренний диаметр ротора,  $p$  – количество пар полюсов является независимой переменной,  $W_p$  – количество витков на один полюс является независимой переменной.

Необходимая аксиальная высота провода может быть получена из требуемого сечения провода и тангенциального размера провода:

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

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

$$\delta = 2 \cdot B_{provoda} + 2 \cdot \delta_{gap};$$

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

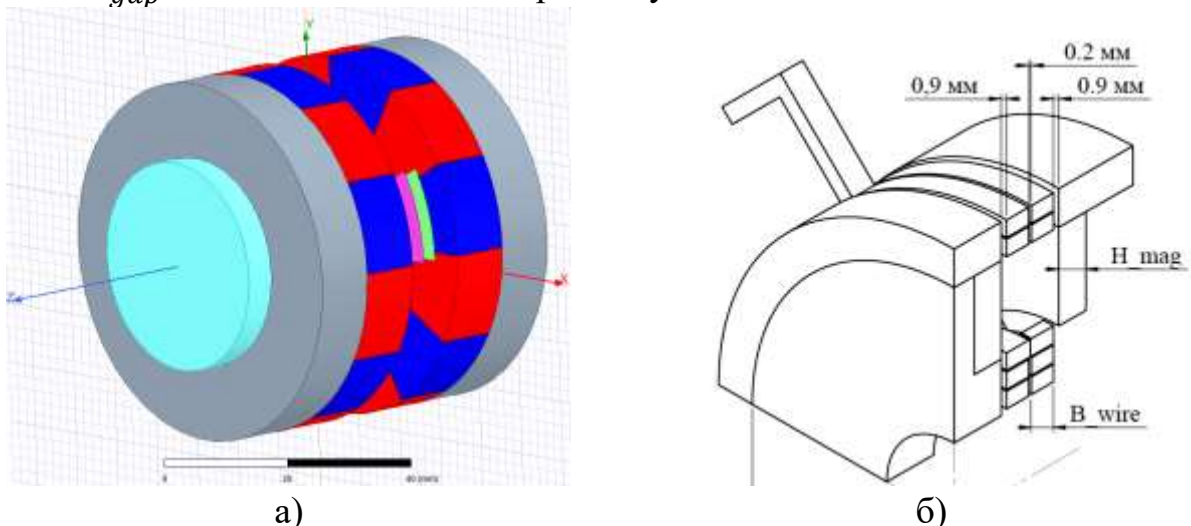


Рис.6. Трехмерная модель индуктора (а) для анализа потокосцепления конечно-элементным методом и параметрическая модель (б) аналитического анализа

Таким образом, определены независимые переменные в методике расчета, влияющие на оптимальность полученной с каждой секции мощности. При разработке математической модели особое значение имеет точность определения потокосцепления, которое зависит от описанных выше независимых переменных. Так как существующие методики дают существенную погрешность для определения рабочего магнитного потока был выбран метод сложных вложенных функций. В качестве параметров аппроксимации были выбраны размеры постоянного магнита и количество полюсов в магнитной системе (рис.6).

Путем конечно-элементного анализа в Ansys были получены зависимости потокосцепления витка обмотки от параметров магнитной. Для полученных зависимостей (рис.7) были определены линии тренда в MS Excel.

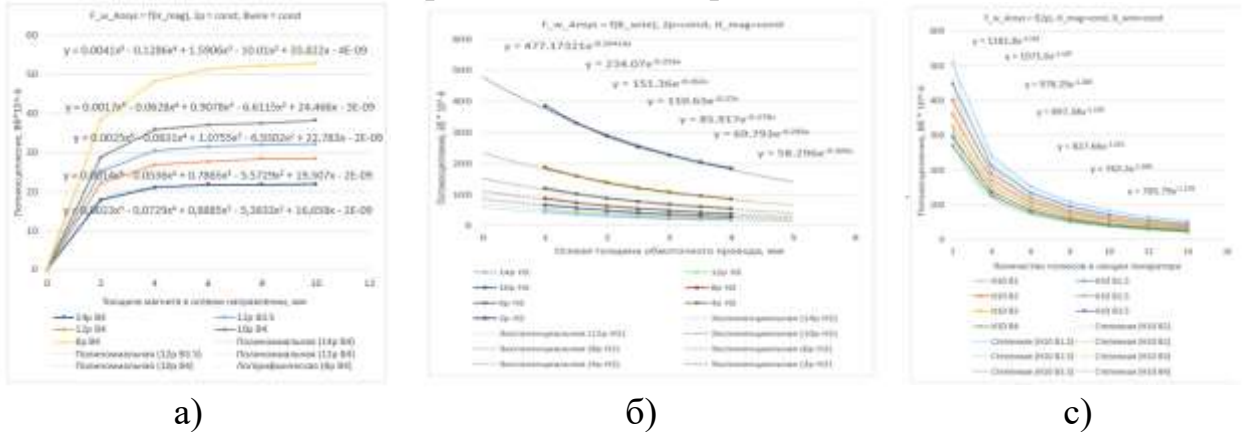


Рис. 7. Зависимости потокосцепления от осевой толщины магнита (а), осевой толщины провода (б), количества полюсов (в).

Записав выражение линии тренда как функцию от осевой толщины провода с коэффициентами, зависящими в свою очередь от других переменных получена система уравнений, описывающая зависимость потокосцепления витка:

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

Разработанная математическая модель расчета потокосцепления витка позволяет провести расчет ЭДС обмотки одной секции многосекционного генератора:

$$E1 = 4,44 \cdot f \cdot W \cdot F_{W_{rms}}$$

Опираясь на ЭДС одной секции генератора возможно определить количество секций, которое обеспечит требуемое напряжение на выходе генератора:

$$N = \frac{U_{f_{phase}}}{E1}$$

Для оценки жесткости внешней характеристики генератора также требуется рассчитать активное и индуктивное сопротивления обмотки. Проводимость потоков самоиндукции аксиального генератора с диамагнитным якорем:

$$\Lambda = \frac{1}{\frac{2 \cdot (\delta + 2 \cdot H_{magnet})}{\mu_0 \cdot \left[ \frac{(\pi \cdot D_{magnet}^2)}{4} - \frac{\pi \cdot d_{magnet}^2}{4} \right] \cdot 0,7}}$$



Рис.8. Внешняя характеристика генератора, построенная на основании разработанной методики расчета параметров генератора

Индуктивное и полное сопротивление обмотки, а также выходное напряжение генератора может быть рассчитано посредством классических выражений:

$$\begin{cases} L_{one\ coil} = 2 \cdot W_p^2 \cdot \Lambda \\ L_{phA} = 2 \cdot W_p^2 \cdot \Lambda \cdot N \cdot 2 \cdot p \\ x_{L_{phA}} = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_{phA} \\ z_{phA} = \sqrt{(R_{phA})^2 + (x_{L_{phA}})^2} \\ U_g = E1 \cdot N - I_g \cdot z_{phA} \end{cases}$$

Внешняя характеристика, построенная на основании предложенной методики расчета генератора представлена на рис.8.

Погрешность разработанной математической модели расчета потокосцепления обмотки генератора составила 10 %. В качестве эталона сравнения был выбран метод конечных элементов (рис.9) в Ansys Electronics Desktop.

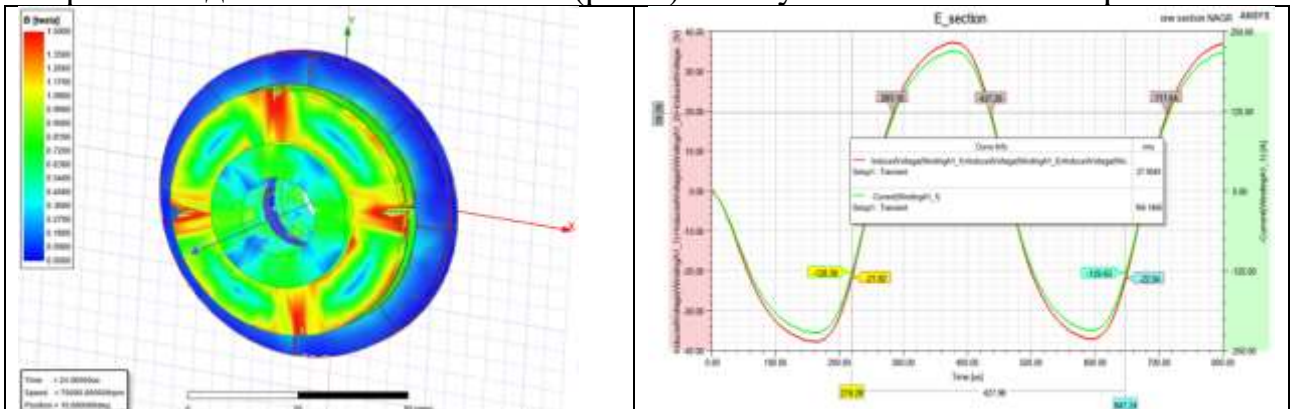


Рис.9. Результаты электромагнитного анализа генератора в ПО Ansys для определения точности разработанной соответствующей математической модели

Таким образом, разработана методика расчета многосекционного аксиального генератора с диамагнитным якорем, опирающаяся на математическую модель расчета потокоцепления обмотки якоря, полученную методом сложных вложенных функций, позволяющую минимизировать количество секций, массу генератора путем получения максимально возможной мощности от одной секции генератора. Погрешность не превышает 10%.

**Четвертая глава** посвящена разработке методики анализа теплового состояния генератора, нагрева якорной обмотки и математической модели вентиляционного расчета. Тепловой анализ был выполнен методом схем замещения. Классические методики имеют существенную погрешность, так как не учитывают изменение скорости воздушных потоков, снимающих тепло с обмотки генератора, вызванное вращением индуктора вблизи поверхности теплосъема с обмоток. Единственными существенными потерями являются электрические потери в обмотке. Так как охлаждающий воздух снимает тепло непосредственно с обмотки возможно составить тепловую схему замещения (рис.10).

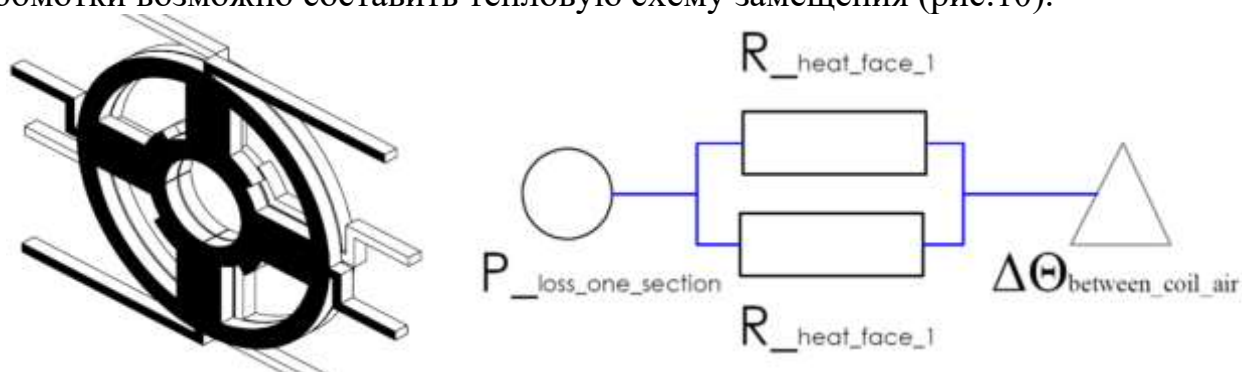


Рис.10. Пояснение к составлению тепловой схемы замещения генератора

Ввиду возможности расчета одной секции генератора с последующей экстраполяцией результатов следует рассчитать потери на одну секцию:

$$P_{loss\_one\_section} = \frac{P_{loss}}{N \cdot m1}$$

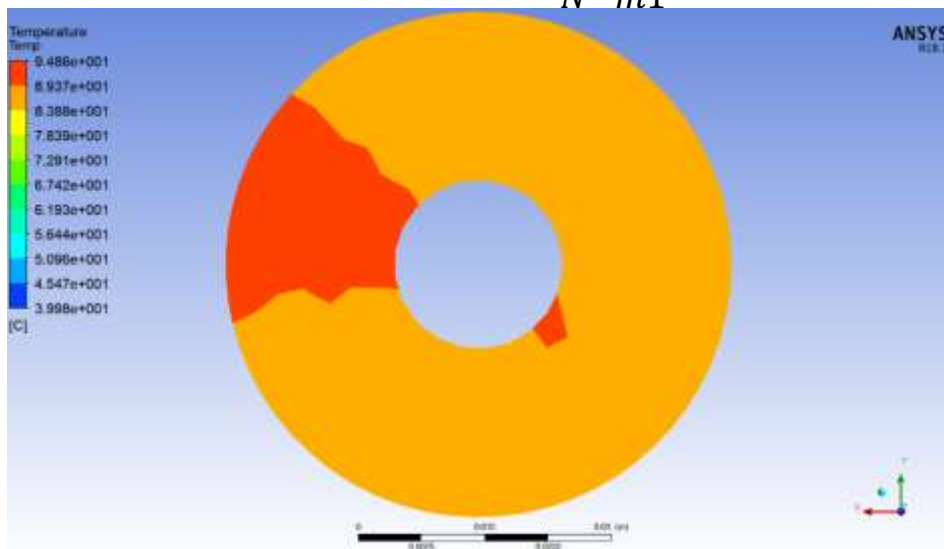


Рис.11. Результаты анализа теплового состояния обмотки в Ansys Fluent

Вследствие изменения скорости передвижения воздушных масс, вызванного вращением вблизи обмоток индуктора, 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. Коэффициенты схода тепла с поверхности обмотки могут быть описаны выражениями:

$$\begin{cases} \alpha_{outer} = 13,5 \cdot (1 + k_0 \cdot v_{outer}) \\ \alpha_{inner} = 13,5 \cdot (1 + k_0 \cdot v_{inner}) \end{cases}$$

Опираясь на общую теорию построения уравнений для определения превышений температуры поверхности, можно составить систему уравнений:

$$\begin{cases} R_{heat\_face\_1} = \frac{1}{\alpha_{outer} \cdot S_{cooling\_one\_section}} \\ R_{heat\_face\_2} = \frac{1}{\alpha_{inner} \cdot S_{cooling\_one\_section}} \\ \Delta\theta_{between\_coil\_air} = P_{one\_section} \cdot \frac{R_{heat\_face\_1} \cdot R_{heat\_face\_2}}{R_{heat\_face\_1} + R_{heat\_face\_2}} \end{cases}$$

Разработанная математическая модель анализа теплового состояния генератора проверена конечно-элементным методом в Ansys Fluent (рис.11). Подробная модель обмотки была заменена аналогом с равной площадью теплосъема.

Отклонение результатов разработанной математической модели от результатов, полученных конечно-элементным анализом не превышает 5%.

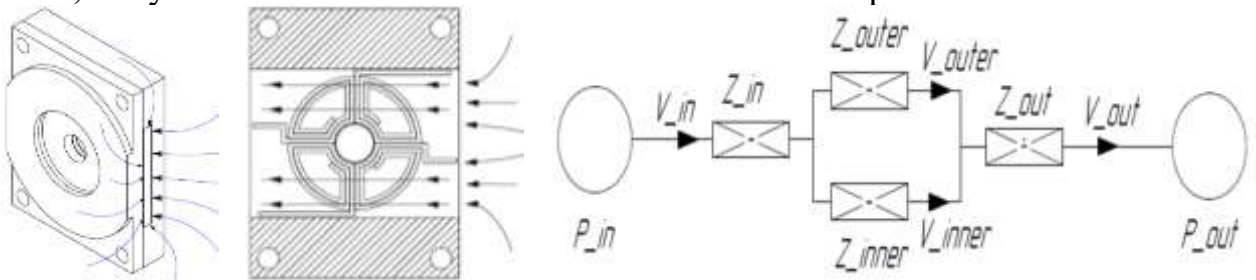


Рис.12. Разработка вентиляционной схемы генератора

В обеспечение теплового состояния генератора требуется создать достаточное давление на входе в вентиляционные каналы, образуемые поверхностями обмотки и статорной секции корпуса. Учитывая вязкое трение воздуха о вращающийся индуктор требуется разработать математическую модель вентиляционного расчета генератора. Для решения поставленной цели была описана вентиляционная схема секции и составлена вентиляционная схема замещения (Рис. 12).

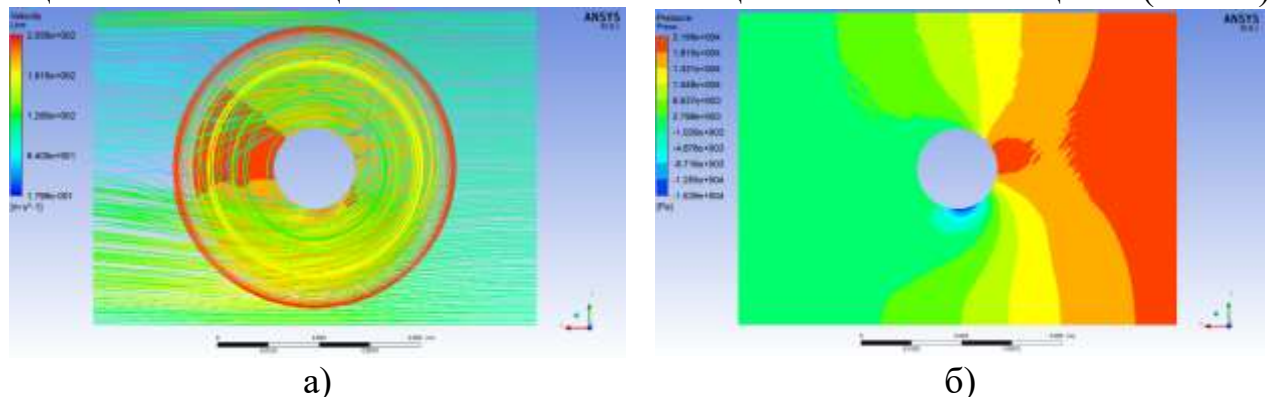


Рис.13. Результаты расчета методом конечных элементов скорости движения воздушных потоков (а) и распределения давления в сечении вентиляционного канала (б), полученные в ПО Ansys Fluent

Опираясь на распределение скоростей движения воздуха в вентиляционном канале секции генератора, становится возможным составить выражение для определения требуемого напора на входе в вентиляционный канал генератора:

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

Полученная математическая модель вентиляционного расчета была верифицирована конечно-элементным методом (рис.13) в ПО Ansys Fluent. Погрешность математической модели не превышает 10%.

**В пятой главе** определена конструкция магнитного подшипника, проведены расчеты усилия магнитного подшипника в стационарном режиме.

Расчет параметров генератора определяет массу активных частей, которую требуется подвесить. Так как усилие, развиваемое электромагнитом, пропорционально площади взаимодействующих поверхностей, необходимо выполнить механический расчет внутреннего кольца магнитного подшипника.

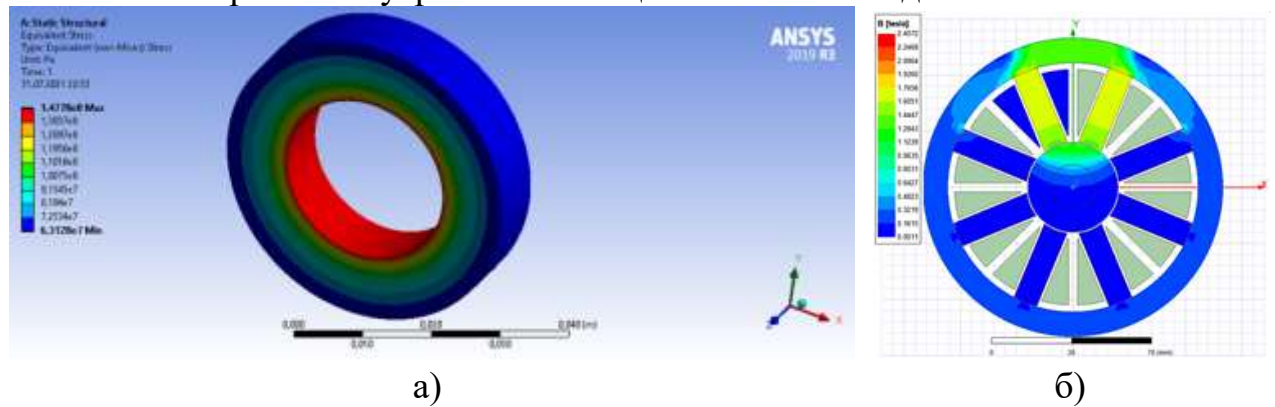


Рис.14. Результаты механического расчета внутренней обоймы электромагнитного подшипника (а) и электромагнитного расчета подвеса (б)

Наружный диаметр внутренней обоймы магнитного подвеса ограничен пределом прочности электротехнической стали. Механический расчет проверен в ПО Ansys Structural (рис.14а). Так как аналитические методы дают большую погрешность, для анализа магнитного подшипника был применен метод конечных элементов в Ansys Electronic Desktop (рис.14б).

Следует убедиться, что усилие, развиваемое электромагнитом, будет достаточным, чтобы подвесить ротор от положения с удвоенным зазором, при сохранении быстродействия подвеса в соосном положении с номинальным зазором. Были проанализированы зависимости несущей способности подвеса от тока в обмотках и от зазора между обоймами (рис.15).

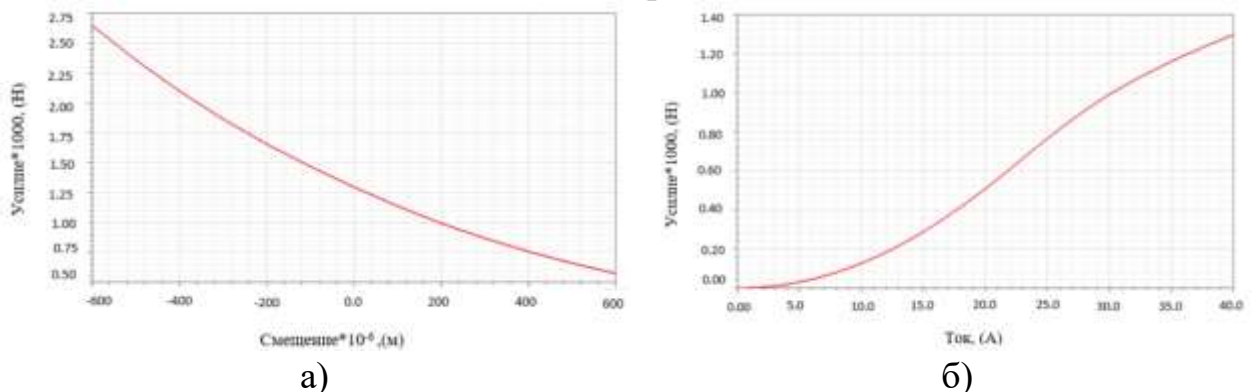


Рис.15. Результаты анализа зависимости несущей способности электромагнитного подвеса от смещения внутренней и внешней обоймы (а) и от тока (б)

Расчет магнитного подшипника показывает (рис.15), что удерживающее усилие одной магнитной опоры достаточно для удержания ротора генератора.

Газодинамический подшипник рассчитывался по традиционной методике. Следует отметить, что методика расчета газодинамических усилий в подшипнике достаточно сложна и описывается системой уравнений Навье-Стокса:

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho \left[ \frac{\partial u}{\partial t} + (u \text{grad})u \right] = -\text{grad}p + \mu \left( \Delta u + \frac{1}{3} \text{grad} \text{div}(u) \right); \\ \frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho u) = 0; \\ \frac{\rho}{t} = \Re T; \end{array} \right.$$

здесь:  $t$  – время,  $u$  – вектор скорости газа,  $p, \rho, T, \mu$  – его давление, плотность, абсолютная температура и вязкость,  $\Re$  – 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. Для оценки усилий газодинамических опор использована инженерная методика.

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  $\chi, \sigma, \varepsilon$ .

$$p_{rf\Sigma}(\chi, \sigma, \varepsilon) = p_{rf1}(\chi, \sigma, \varepsilon) + p_{rf2}(\chi, \sigma, \varepsilon), [\text{Па}]$$

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

$$\sigma_{rf} = \frac{W_{rf}}{h}, [\text{Н/м}]$$

Используемые безразмерные параметры равны:

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

где:  $\mu$  – динамическая вязкость,  $\omega$  – угловая частота вращения,  $r$  – радиус вала,  $\rho_0$  – статическое давление,  $h$  – зазор,  $L$  – длина подшипника.

Расчет по предложенной инженерной методике позволяет сделать вывод, что примененные газодинамические опоры обеспечат подвешивание ротора.

**Шестая глава** посвящена разработке конструкции многосекционного вентиляционного генератора с аксиальным магнитным потоком и диамагнитным якорем.

Разработка модели проводилась на основании анализа созданных математических моделей. Особенного внимания заслуживает индуктор генератора (рис.16), так как именно его наружный диаметр, ограниченный механической прочностью в рассматриваемом случае, является определяющим всю энергетику машины. Индуктор генератора состоит из одинаковых модульных секций. Бандаж индуктора выполняет также функцию внутренней обоймы газодинамического подшипника. Для обеспечения сдвига фаз 3-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 и усложнит сборку и ремонт разрабатываемого генератора. Смещение фазных ЭДС предлагается выполнить путем поворота секций друг относительно друга на 120 электрических градусов, сохраняя при этом взаимное положение обмоток секции генератора неизменным.

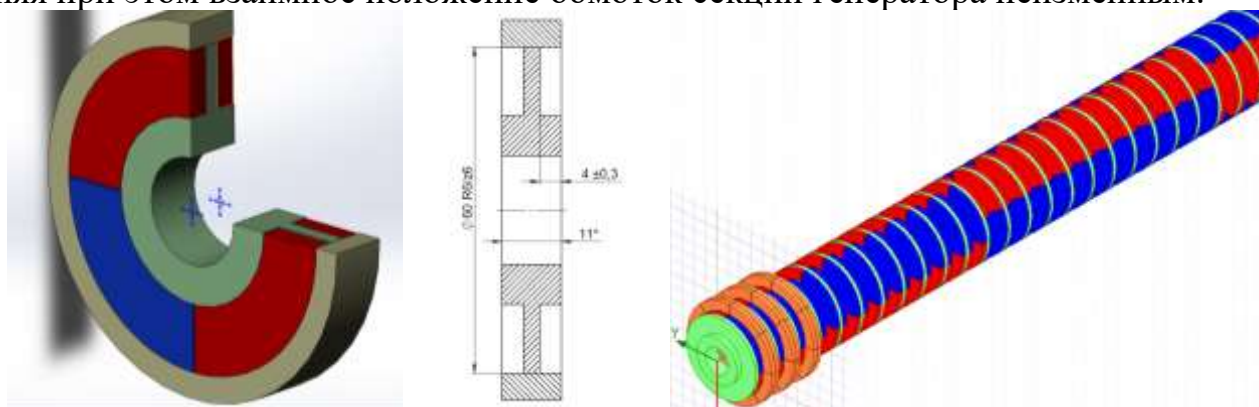


Рис.16. Конструкция индуктора аксиального генератора

Также предложено принципиально новое для машины с аксиальным магнитным потоком решение – разделить фазы генератора по разным секциям, обеспечив деля катушки на составные части пополам для реализации возможности сборки/замены обмотки на собранной электрической машине, то есть изготовить обмотку в виде кассеты, которую возможно просто заменить (рис.17).



Рис.17. Конструкция обмотки кассетного типа

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 отдельное внимание уделить магнитному подвесу. Структурно электромагнитный подвес (рис.18а) состоит из неподвижной части (статора) с обмотками и вращающейся части (ротора) на валу машины, свободное вращение которой требуется обеспечить. Пакет из электротехнической стали статора подвеса скреплен пластинами отмеченными желтым цветом и запрессован в оболочку. 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. Для уменьшения влияния вихревых токов, возникающих во внутреннем кольце подвеса, расположенном на роторе и вращающемся в магнитном поле главных полюсов электромагнитного подвеса, кольцо ротора выполнено шихтованным из



электротехнической стали. Для осуществления сборки и удержания полученного пакета применены гильзы с резьбой и зажимные гайки на роторе.

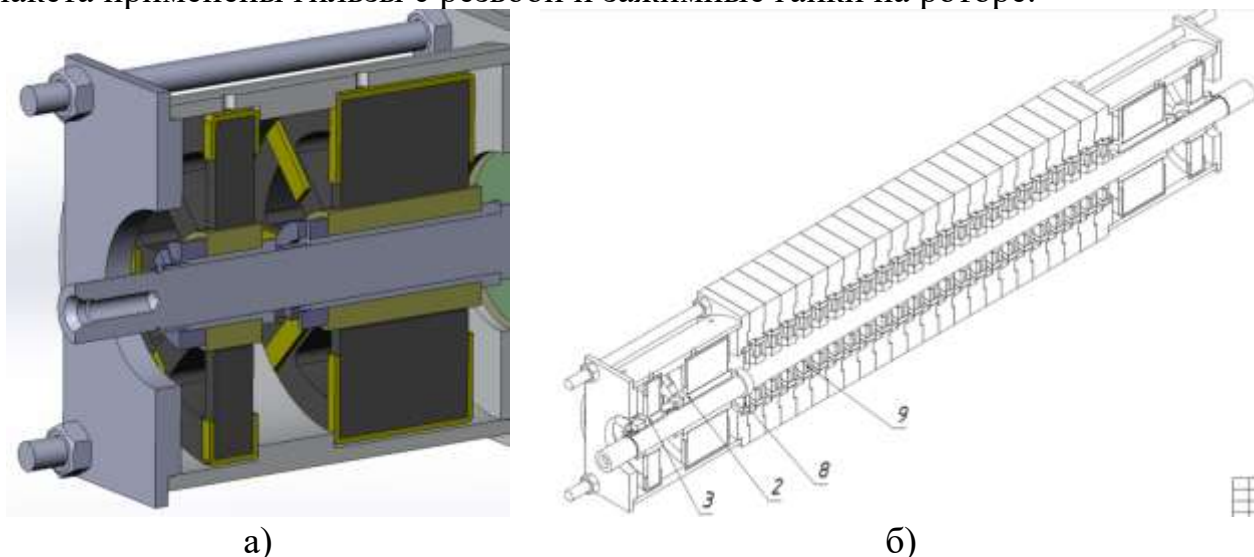


Рис.18. Трехмерная модель магнитного подвеса (а) и эскиз сборки генератора (б)

Для организации изготовления макетного образца была разработана трехмерная твердотельная модель генератора и эскизная конструкторская документация. В соответствии с разработанной эскизной документацией был изготовлен макетный образец генератора (рис. 19).

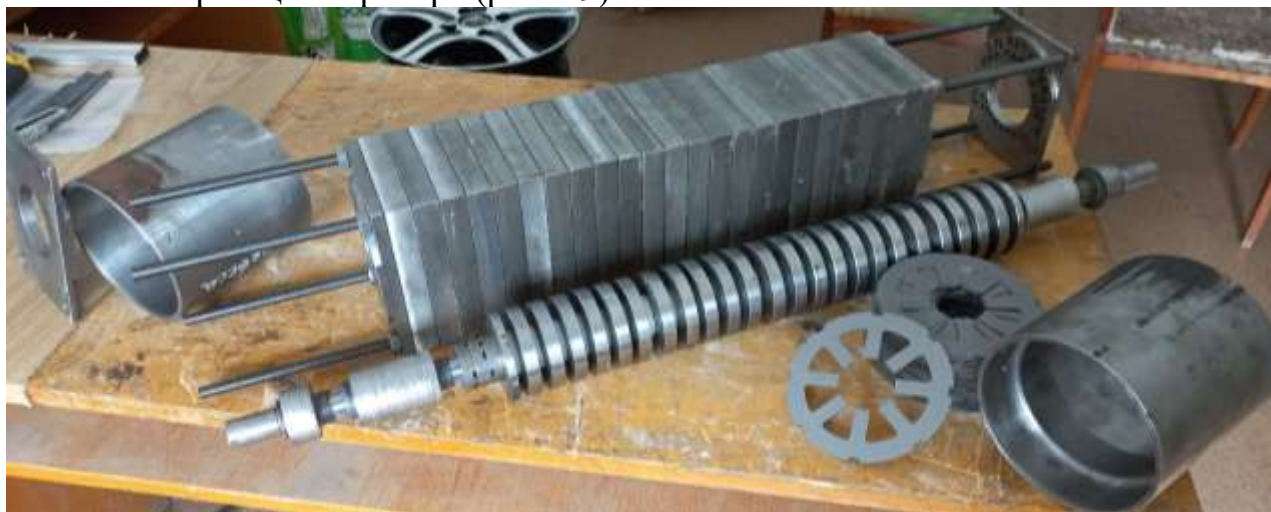


Рис.19. Макетный образец многосекционного аксиального генератора

Благодаря применению многосекционной конструкции генератора (рис.18б) становится возможным выполнить корпусные элементы в виде повторяющихся деталей, что повышает технологичность генератора в целом.

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В работе представлена разработка генератора для высокоскоростной газотурбинной установки, являющейся 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 установок, предназначенных для автономных источников 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 промышленного 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 проектирования 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.

### **ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

**Статьи, опубликованные в рецензируемых научных изданиях, определенных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ:**

1. Gandzha S. Design of a Combined Magnetic and Gas Dynamic Bearing for High-Speed Micro-Gas Turbine Power Plants with an Axial Gap Brushless Generator / S. Gandzha, **N. Neustroev**, I. Chuyduk, S. Shabiev // Processes 2022. Vol. 10 (6). 1067. 1,0 п.л./0,25 п.л., (Scopus).

2. Neustroev N. Starter Generator Design Development For Modern Micro Gas Turbine Plant / **N. Neustroev**, A. Kotov, I. Chuyduk // Proceedings – 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). 2020. № 9111922. 0,31 п.л./0,11 п.л., (Scopus).

3. Kotov A. Mathematical Modeling Asynchronized Synchronous Wind Turbine Generator On the Basis of Generalized Variables With The Purpose of Main Machine Geometrical Parameters Optimization / A. Kotov, **N. Neustroev**, I. Chyidyk // Proceedings – 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM. 2020. № 9111967. 0,437 п.л. /0,143 п.л., (Scopus).

4. Neustroev N. Passive Magnet Bearing Development for Axial Flux Permanent Magnet Generator with Diamagnetic Armature / **N. Neustroev**, S. Gandzha, I. Chuyduk // 2020 Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research & Practice (PEAMI)/ 25-26 Sept. 2020. № 9234313. P. 98-102. 0,31 п.л./0,11 п.л., (Scopus).

5. Котов А.А. Разработка математической модели асинхронизированного синхронного ветрогенератора для задачи оптимизации основных геометрических размеров на основе обобщенных переменных / А.А. Котов, **Н.И. Неустроев**, И.А. Чуйдук // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. 2020. № 33. С. 78-98. 1,25/0,42 п.л.

6. Gandzha S.A. Geometry optimization of Asynchronous Synchronous Alternator with Using Generalized Variables / S.A. Gandzha, A.A. Kotov, **N.I. Neustroev** // Proceedings – 2019 International Ural Conference on Electrical Power Engineering, UralCon 2019. 2019. № 8877634. С. 373-377. 21 October 2019. 0,31 п.л./0,11 п.л., (Scopus).

7. Неустроев Н.И. Применение системы автоматического проектирования Ansys Maxwell для количественной оценки влияния эффекта вытеснения тока в электрических машинах переменного тока / **Н.И. Неустроев**, А.А. Котов, И.Е. Киесш // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2018. Т. 18, № 1. С. 112–121. 0,62 п.л./0,22 п.л.

8. Неустроев Н.И. Применение генератора двойного питания для ветроэнергетических установок малой, средней и большой мощности / **Н.И. Неустроев**, А.А. Котов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2017. Т. 17, № 4. С. 80-89. 0,62 п.л./0,21 п.л.

**Патенты:**

9. Патент 203857 U1. Асинхронная тяговая электрическая машина привода городского электротранспорта: Заявка № 2020113159 от 27.03.2020, опубл. 23.04.2021 / **Неустроев Н.И.**, Благов С.А., Лютов М.А., Гильметдинов М.Ф., Кардаполов В.В.; заявитель и патентообладатель АО «НПО «Электромашина». Изобретения. Полезные модели. Бюл. №12. 8 с.

**Публикации в других изданиях:**

10. **Неустроев Н.И.** Синтез и анализ комбинированного магнитного и газодинамического подвеса для модельного ряда высокоскоростных микрогазотурбинных энергоустановок нового поколения / С.А. Ганджа, П.А. Тараненко // «Электричество». 2021. №11. С. 5-17. 0,81 п.л./ 0,28 п.л.

11. **Неустроев Н.И.** Обзор перспективных подвесов для быстроходных генераторов / С.А. Ганджа, И. Чуйдук // Тезисы доклада на конференции. Международная научно-техническая конференция «Автоматизация». Фундаментальные проблемы управления производственными процессами в условиях перехода к индустрии 4.0. Сочи, 06–12 сентября 2020 года. С. 155-159. 0.31 п.л./0,11 п.л.

12. Martyanov A.S. Ansys Maxwell Software for electromagnetic field calculations / **N.I. Neustroev** // Eastern European Scientific Journal. 2014. № 5. С. 203-207. 0.31 п.л /0,16 п.л.

*Неустроев Николай Игоревич*

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

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Издательский центр Южно-Уральского государственного университета

Подписано в печать . Формат 60×84 1/16. Печать цифровая.  
Усл. печ. л. . Уч.-изд. л. 1,0. Тираж 80 экз. Заказ

Отпечатано в типографии Издательского центра ЮУрГУ.  
454080, г. Челябинск, проспект Ленина,76.