

## **ОТЗЫВ**

официального оппонента доктора технических наук, профессора

Казакова Юрия Борисовича

на диссертацию Неустроева Николая Игоревича

«Разработка высокоскоростного вентильного генератора с аксиальным магнитным потоком и диамагнитным якорем на комбинированном магнитном и газодинамическом подвесе для микрогазотурбинных установок», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.2 - Электротехнические комплексы и системы

### **На отзыв представлены:**

- Диссертация, включающая введение, шесть глав, заключение, список использованных источников из 162 наименований, 6 приложений. Диссертация изложена на 152 страницах и содержит 121 страницу основного текста, 66 иллюстраций, 81 аналитическое выражение, 5 таблиц.
- Автореферат диссертации.

### **Актуальность темы диссертации**

Разработка источников автономного питания является актуальной задачей распределенной энергетики. Это обусловлено необходимостью освоения удаленных от централизованного энергоснабжения территорий, для которых строительство протяженных линий электропередач затруднено и, в целом, нерентабельно. Также объекты первой категории электроснабжения должны иметь резервный источник автономного питания на случай отказа основного источника: больницы, специальные высокотехнологичные производства, стратегические центры управления, объекты энергетической инфраструктуры и др. В автономных источниках энергоснабжения нуждаются подвижные объекты наземного, морского и воздушного транспорта. Разработка источников автономного питания становится более актуальной в связи с обострившейся политической и экономической обстановкой. Источники электроснабжения на базе высокоскоростных газотурбинных установок во многом способны решить проблему автономного электропитания. В связи с этим актуальность диссертации Неустроева Н.И., посвященной разработке и исследованию высокоскоростного вентильного генератора с аксиальным магнитным потоком и диамагнитным якорем с комбинированным магнитным и газодинамическим подвесом для микро газотурбинных установок, не вызывает сомнений.

**Цель диссертации** – улучшение энергетических показателей, повышение надежности и долговечности газотурбинной установки за счет разработки конструкции высокоскоростного вентильного генератора с аксиальным магнитным потоком и диамагнитным якорем, разработка методик синтеза и анализа генератора, соответствует направлениям исследований специальности 2.4.2 - Электротехнические комплексы и системы.

При решении поставленных в диссертации задач с проведением расчетов электромагнитных, тепловых, вентиляционных и механических процессов в генераторе автором использованы **современные методы исследований**: аналитические методы общей теории электромеханических преобразователей энергии, численные методы компьютерного моделирования физических полей на основе метода конечных элементов, реализованные в распространенных программных комплексах. Выполнено физическое моделирование генератора.

**Оценка содержания и оформления диссертации.** Диссертация написана ясно, использованная терминология и стиль соответствуют общепринятым нормам. Структура диссертации традиционная, имеет внутреннее единство, по каждой главе и диссертации в целом сделаны выводы, которые отражают результаты работы. Даны рекомендации практического применения результатов диссертации и перспективы развития темы. При использовании в тексте диссертации результатов других авторов сделаны соответствующие ссылки.

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, выполнен анализ научных разработок в рассматриваемой области, определены объект и предмет исследования, сформулированы цель и задачи исследования, перечислены положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** проведен анализ конструкций электромеханических преобразователей энергии для оценки возможности их применения в качестве высокоскоростного генератора для микро газотурбинной установки. Основным требованием, предъявляемым к такому генератору, является повышенная надежность при высоких частотах вращения ротора. Отмечено, что магнитоэлектрический генератор с радиальным ротором содержит сложно преодолеваемые недостатки: большие потери в стали, недостаточная жесткость вала, наличие нескольких резонансных частот при разгоне, сложности с аэродинамическими опорами. Сделан вывод, что в качестве применения целесообразна конструкция многосекционного аксиального магнитоэлектрического генератора с диамагнитным якорем и комбинированным электромагнитным и газодинамическим подвесами. В та-

ком генераторе отсутствуют магнитные потери, имеется возможность повышения жесткости за счет организации опор на поверхности бандажа, повышения мощности генератора путем увеличения количества секций. Одновременно отмечено, что для таких генераторов нет апробированных методик расчета.

**Во второй главе** диссертации рассматривается определение размеров бандажного кольца вращающегося индуктора, удерживающего торцевые постоянные магниты, что имеет решающее значение для обеспечения механической прочности конструкции высокоскоростного генератора. Разработаны математическая модель и методика механического расчета индуктора, определения диаметра бандажного кольца по пределу прочности от действия собственных распределенных инерционных нагрузок бандажа и усилий, действующих со стороны магнитов. Рассчитан максимально возможный диаметр и толщина бандажа для секции якоря. Выполнено компьютерное моделирование механического состояния индуктора в системе Ansys Workbench.

**Третья глава** содержит методику определения потокосцепления секции якоря аксиального генератора. Учтено влияние значительных магнитных потоков рассеяния в торцевой конструкции. Для аппроксимации зависимостей потокосцепления секций обмотки генератора от размеров аксиального индуктора и диамагнитного якоря, толщины медного слоя, высоты магнита и числа полюсов автор применил оригинальную методику вложенных функций, когда коэффициенты при переменных принимаются функциями других переменных. Получены аналитические зависимости потокосцепления секции обмотки якоря от принятых факторов. Погрешность аналитической аппроксимации по сравнению с результатами численного электромагнитного расчета методом конечных элементов, полученных в программе Ansys Electronics Desktop, не превысила 10%.

**В четвертой главе** диссертации выполнена разработка методик определения теплового состояния и вентиляционного расчета высоконагруженного малогабаритного магнитоэлектрического генератора на основе эквивалентных схем замещения. Учтено изменение коэффициентов теплоотдачи с быстро вращающихся поверхностей при изменении частоты вращения ротора, что позволило корректно оценить допустимые нагрузки и тепловые режимы работы генератора. Методика вентиляционного расчета секции учитывает наличие вала генератора, препятствующего движению воздушного потока, и зависимость аэродинамических сопротивлений элементов конструкции от скорости обдува обмотки якоря при вращении ротора. Точность разработанных методики оценена применением программы ПО Ansys Fluent для задач термодинамики.

**В пятой главе** решена задача применения комбинированных опор генератора, содержащих электромагнитные и газодинамические подшипники. Разработана конструкция магнитного подшипника, определены зависимости его несущей способности от радиального смещения осей обойм ротора и статора, тока обмоток. В программе Ansys Elektronics Desktop определены усилия электромагнитных сил в стационарном режиме. По известной методике проведен расчет газодинамического подшипника. Оценена возможность применения в качестве внутренней обоймы газодинамического подшипника поверхности индуктора генератора. Результаты расчетов продемонстрировали возможность гарантированного удержания ротора в подвешенном состоянии на малых частотах вращения с помощью магнитного подвеса и, начиная с частоты 52000 об/мин, устойчивого всплытия ротора при больших частотах и работе газодинамических подшипников. Развиваемые аэродинамические усилия достаточны для удержания ротора с помощью газодинамической опоры на больших частотах.

**В шестой главе** разработана конструкция макетного образца многосекционного генератора с аксиальным магнитным потоком и диамагнитным якорем с комбинированным магнитным и газодинамическим подвесами. Генератор состоит из двух симметричных половин (кассетного типа), что облегчает его сборку и ремонт при эксплуатации, обеспечивает технологичность производства. Представлены конструктивные особенности ротора с индуктором генератора, якорной обмотки, магнитного и газодинамического подшипников. В отличие от классической конструкции, где для сдвига фаз сдвигаются оси фазных обмоток якоря, сдвиг фаз в предлагаемой конструкции обеспечивается угловым поворотом постоянных магнитов. В качестве опор газодинамических подшипников используются радиальные поверхности бандажных колец. Проработана конструкция корпуса и процесс сборки генератора. Изготовлена «в железе» физическая модель генератора. Разработан коммутатор обмоток электромагнитного подвеса. Показаны количественные преимущества генератора в сравнении с аналогом.

**В заключении** обобщаются результаты проведенных исследований, содержатся выводы, определены направления дальнейших исследований по применению аксиальных генераторов торцевого типа.

### **Научная новизна результатов**

1. Совокупность разработанных уточненных методик:
  - методика электромагнитного анализа аксиального магнитоэлектрического генератора с диамагнитным якорем, отличающаяся возможностью учета

многосекционности конструкции с минимизацией количества секций, осевой длины и веса вращающихся частей;

- методика расчета механической прочности бандажа индуктора аксиального генератора, отличающаяся учетом радиальных и тангенциальных усилий от распределенных центробежных нагрузок постоянных магнитов и толстостенного бандажа;
- методика теплового анализа секции аксиального генератора с диамагнитным якорем, отличающаяся учетом изменения коэффициентов теплоотдачи с поверхности обмоток при изменении линейной скорости охлаждающего воздуха при вращении высокоскоростного индуктора;
- методика вентиляционного расчета секции аксиального генератора с диамагнитным якорем, отличающаяся учетом изменяемых аэродинамических сопротивлений в элементах аксиальной конструкции.

2. Аналитические зависимости потокосцепления секций обмотки генератора в виде вложенных функций, отличающиеся учетом размеров аксиального индуктора и диамагнитного якоря, толщины медного слоя, высоты магнита и числа полюсов.

3. Концепция комбинированного подвеса многосекционного высокоскоростного генератора, обеспечивающая исключение сухого трения при пуске генератора электромагнитным подшипником и эффективную работу подвеса и жесткость вала газодинамическими подшипниками при высоких частотах вращения.

### **Теоретическая и практическая значимость результатов**

Диссертационное исследование является развитием теории аксиальных магнитоэлектрических машин. Совокупность разработанных уточненных методик электромагнитного, механического, теплового и вентиляционного анализов аксиальных высокоскоростных многосекционных генераторов имеет теоретическую значимость в расширении представлений о электромеханическом преобразовании энергии. Разработанный автором метод аппроксимации потокосцеплений секций якоря генератора на основе вложенных функций может быть использован для аппроксимации других сложных зависимостей в электротехнике.

Практическая значимость результатов обусловлена возможностью использования разработанных моделей и методик в других типах электрических машин. Практическим результатом диссертации является разработка

конструкции многосекционного магнитоэлектрического генератора аксиальной конструкции, формирование структуры обмотки якоря. Концепция комбинированного электромагнитного и газодинамического подвесов имеет практическую значимость для высокоскоростных электромеханических преобразователей энергии, так как исключает недостатки обоих опор и использует их преимущества. Практическим результатом диссертации следует считать выполнение двух грантов РФФИ и ФСИ.

**Обоснованность и достоверность** научных положений, выводов и результатов обеспечена использованием известных математических методов теории электромеханического преобразования энергии, компьютерным моделированием электромагнитного, механического, теплового и вентиляционного состояния генератора на основе численного анализа методом конечных элементов в распространенных программных комплексах Ansys Electronics Desktop, Ansys Fluent, методов физического моделирования на натурном макетном образце.

**Оценка научной квалификации автора.** Неустроев Н.И. продемонстрировал высокую научную квалификацию - им разработаны уточненные методики анализа электромагнитных, тепловых, вентиляционных и механических расчетов оригинальной конструкции высокоскоростного многосекционного аксиального магнитоэлектрического генератора с диамагнитным якорем; разработаны и применены аналитические и численные модели генератора; выполнено компьютерное и физическое моделирование.

#### **Соответствие паспорту специальности.**

Диссертация соответствует следующим пунктам направлений исследования научной специальности 2.4.2 - Электротехнические комплексы и системы:

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.

**Рекомендации по дальнейшему использованию результатов работы.**

Результаты работы перспективны к использованию в АО «СКБ «ТУРБИНА», АО «НПО «ЭЛЕКТРОМАШИНА», других предприятиях по разработке и производству высокоскоростных генераторов, учебном процессе при подготовке профильных специалистов.

**Основные результаты диссертации опубликованы** в открытой печати в 12 научных работах, в том числе 8 статей в рецензируемых научных изданиях, определенных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ, из них 5 статей, индексируемых в международной базе Scopus.

**Апробация результатов диссертации.** Основные положения и результаты диссертации обсуждались на международных и всероссийских конференциях.

**Соответствие автореферата содержанию диссертации.** Автореферат в компактном виде отражает содержание и основные положения диссертации, содержит выводы и полученные результаты. По автореферату можно оценить значимость работы.

**Замечания по диссертации:**

1. Разработанные отдельные расчетные методики не объединены в систему проектирования высокоскоростного аксиального магнитоэлектрического генератора с диамагнитным якорем, что затрудняет их комплексное использование.

2. Найденные численные зависимости потокосцепления витка справедливы для конкретной конструкции. Целесообразно было бы получение соотношений в относительных единицах.

3. Не проработан вопрос выбора аксиальных опор для вращающихся частей генератора, нет сравнения критических частот вращающейся части генератора с аксиальным магнитным потоком с аналогами радиальной конструкции, что делает утверждение об отсутствии резонансов в области номинальных частот вращения рассматриваемого генератора декларативным.

4. Не исследованы возможные осевые колебательные процессы при вращении дисков с магнитами в плоскости перпендикулярной оси вращения с учетом их магнитного осевого тяжения при возможных несимметриях конструкции, осевого эксцентриситета зазора.

5. Нет алгоритма управления переключением работы электромагнитных и газодинамических подшипников.

6. Выполнено физическое моделирование генератора, но нет экспериментальных исследований генератора на физической модели.

7. Замечания оформления, стилистические и орфографические: удлиненное название диссертации – 20 слов; словосочетание «микро газотурбинная» в некоторых местах (название диссертации, Приложение 1 и др.) написано слитно, в других - раздельно; стр. 23 «... асинхронный генератор нагружен не (*пропущено*) только активной мощностью ...»; стр. 46 «Удовлетворительная точность ... проверена»??; в соотношении (3.5) рекомендуется очень высокая плотность тока в обмотке  $2 \cdot 10^7$  А/м<sup>2</sup>; в соотношении (3.20) не обосновано значение коэффициента длины лобовой части 1.2; не пояснено соотношение (3.27); не ясно присутствие последнего сомножителя в соотношении (3.28); соотношение (3.32) должно записываться и применяться в векторной форме; рисунки 1.3.6 и 6.14 одинаковые; не объяснено возникновение несимметричности нагрева торцевого генератора (рис. 4.2.1); не раскрыт поверочный расчет газодинамического подшипника (раздел 5.2).

Указанные недостатки имеют частный характер и не снижают научной ценности диссертации в целом.

## Заключение

Диссертация Неустроева Николая Игоревича «Разработка высокоскоростного вентильного генератора с аксиальным магнитным потоком и диамагнитным якорем на комбинированном магнитном и газодинамическом подвесе для микрогазотурбинных установок» является законченной научно-квалификационной работой, которая по содержанию, объекту и направлению исследований, полученным новым научно обоснованным результатам соответствует паспорту научной специальности 2.4.2 Электротехнические комплексы и системы.

Диссертационная работа выполнена лично, на актуальную тему, имеет научную новизну, теоретическую и практическую значимость, содержит решение актуальной научной задачи разработки высокоскоростного генератора для микро газотурбинных установок автономных источников питания. Диссертация удовлетворяет всем требованиям, установленным в пункте 9 Положения о присуждении ученых степеней ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»,

предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Неустроев Николай Игоревич заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.2 - Электротехнические комплексы и системы.

Официальный оппонент, доктор технических наук (докторская диссертация защищена по специальности 05.09.01 – Электромеханика), профессор, профессор кафедры «Электромеханика» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина».

153003, Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34, ИГЭУ, корп. А, ауд. 149.

Телефон: +7 (4932) 269-715

E-mail: elmash@em.ispu.ru

Я, Казаков Юрий Борисович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

07/11/2022

Казаков Юрий Борисович

Дата составления отзыва «18» ноября 2022 г.

Подпись Ю.Б. Казакова заверяю:

Ученый секретарь Ученого совета ИГЭУ



Ю.

Вылгина Юлия Вадимовна