

**ОТЗЫВ**  
официального оппонента доктора технических наук, доцента  
Зубкова Юрия Валентиновича  
на диссертационную работу 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

Диссертационная работа Неустроева Н.И. посвящена разработке основ проектирования и анализа электрического высокооборотного генератора в составе микрогазотурбинной установки, что на современном этапе частичной децентрализации производства электрической энергии и все более широкого использования автономной генерации является весьма важным направлением развития энергетики в Российской Федерации.

#### **Актуальность темы**

Автономные источники питания малых и средних мощностей, с приводом от высокоскоростных газотурбинных двигателей достаточно широко распространены в энергетике. Серийное производство этих агрегатов налажено в экономически развитых странах Европы и мира. Практически все производители выпускают агрегаты на базе вентильного генератора с радиальным потоком и постоянными магнитами на роторе. Не смотря на то, что данная концепция отлажена в серийном производстве, к настоящему времени она морально устарела. Кроме этого, она содержит технические противоречия, которые не позволяют ей развиваться дальше. Прежде всего, это большие магнитные потери из-за высоких частот перемагничивания, наличие большого количества резонансных частот при разгоне, износ газодинамических подшипников из-за частых пусков. Избавиться от этих недостатков в радиальной конструкции принципиально нельзя, их можно несколько смягчить и уменьшить и в этой связи на передний план выступает необходимость разработки новых конструктивных решений в области автономной генерации. Отечественный производитель в условиях жестких санкций не имеет возможностей закупать отлаженные зарубежные технологии. Необходимо разрабатывать свои проекты, которые по научному и техническому уровню превосходили бы зарубежные аналоги. В представленной к защите работе

делается такая попытка, поэтому эти исследования следует признать важными и актуальными.

## **Структура и объем диссертационной работы**

Диссертационная работа по своей структуре и объему соответствует требованиям, которые предъявляются к кандидатским диссертациям. Содержательная часть включает в себя 6 глав, заключение, список литературы и приложения. Работа изложена на 152 страницах, из них 121 страница основного текста, содержит 66 иллюстраций, 81 аналитическое выражение, 5 таблиц, 6 приложений.

**В первой главе** проведен анализ существующих конструкций генераторов мировых производителей для микрогазотурбинных установок. Обозначены основные недостатки радиальной конструкции. В качестве базовой конструкции выбран вентильный многосекционный генератор с аксиальным зазором и диамагнитным якорем, у которого отсутствуют магнитные потери. Увеличение мощности генератора осуществляется увеличением количества секций, из которых набрана его активная часть. Для опор выбран комбинированный магнитный и газодинамический подвес, который обеспечивает без трения разгон ротора и необходимую жесткость при номинальных оборотах.

**Вторая глава** посвящена разработке методики определения габаритов и прочности бандажа из условия максимально возможного диаметра аксиального генератора. Методика учитывает распределенные центробежные нагрузки, действующие на постоянные магниты и толстостенный бандаж. Предложенная методика проверена более точным методом конечных элементов.

**В третьей главе** приводятся аналитические зависимости потокосцепления от размеров торцевого магнита. Для получения аналитических выражений применен метод сложных вложенных функций. В качестве эталона сравнения был выбран метод конечных элементов. Данные зависимости использованы для определения энергетических параметров многосекционного генератора.

**Четвертая глава** посвящена анализу методов охлаждения и разработке методики оценки теплового состояния секции генератора. Предложенная методика учитывает влияние вращения индуктора на коэффициенты теплоотдачи с поверхности обмотки. В вентиляционном расчете учитывается наличие вала генератора, препятствующего движению воздушного потока. Оценочный расчет проверен методом конечных элементов.

**В пятой главе** определена конструкция магнитного подшипника, проведены расчеты его несущей способности магнитного подшипника в стационарном режиме, расчет газодинамического подшипника по традиционной методике.

**Шестая глава** посвящена разработке конструкции вентильного генератора с аксиальным магнитным потоком, диамагнитным якорем и комбинированным магнитным и газодинамическим подшипниками. Представлены фотографии макетного образца разрабатываемого генератора и приведены результаты сравнения с аналогом.

**В заключении** подведены итоги проведенного исследования по разработке высокоскоростного вентильного генератора с аксиальным магнитным потоком и диамагнитным якорем на комбинированном магнитном и газодинамическом подвесе для микрогазотурбинных установок, приведены основные выводы и результаты, намечены направления дальнейших исследований.

### **Научная новизна диссертации**

Многосекционные аксиальные генераторы для газотурбинных установок до настоящего времени не применялись, поэтому для продвижения данной научной тематики и их практического использования необходима разработка новых подходов к проектированию и анализу. В работе сделана попытка разработки этих методов, в частности: методики расчета механической прочности бандажа индуктора аксиального генератора, аналитические зависимости потокосцепления, методики расчета многосекционного аксиального генератора с диамагнитным якорем, методики теплового расчета секции аксиального генератора с диамагнитным якорем, способа подвеса высокоскоростного ротора газотурбинной установки, методики вентиляционного расчета секции аксиального генератора. Набор предложенных новаций является развитием теории многосекционных аксиальных генераторов.

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

Теоретическую значимость научного исследования представляет решение использования комбинированного подвеса, которое позволяет одновременно решить проблему износа опоры при пуске и обеспечить требуемую жесткость при высоких частотах вращения ротора. Кроме этого работа имеет практическую составляющую. В диссертации разработана конкретная конструкция генераторного узла для энергетической установки 10 кВт.

### **Рекомендации по использованию результатов работы**

В приложениях к диссертации приведен акт внедрения результатов диссертационной работы на НПО «Электромашин». Имеется письмо от индустриального партнера АО СКБ «Турбина» об использовании разработки на предприятии. Методики расчета бандажа, потокосцепления, теплового и вентиляционного расчетов следует рекомендовать для использования в учебном процессе при подготовке инженеров по профилю электрооборудования и электромеханики.

Работа поддержана грантами научных фондов РФ.

## **Достоверность результатов работы**

Точность всех представленных к защите методик расчета бандажа, потокосцепления, теплового и вентиляционного расчетов проверена на цифровых моделях, построенных с использованием метода конечных элементов. Это позволяет сделать вывод о достоверности полученных результатов.

## **Соответствие паспорту специальности**

Диссертация соответствует следующим пунктам 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.

## **Апробация диссертации и публикации**

Диссертация удовлетворяет требованиям к публикации основных результатов в рецензируемых научных журналах. 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, получен 1 патент РФ на полезную модель.

**Автореферат** соответствует предъявляемым к нему требованиям по объему и содержанию.

## **Вопросы и замечания по работе**

По работе имеется ряд вопросов и замечаний, по которым необходимо дать комментарии и пояснения.

1. Целью работы заявлено повышение удельных энергетических показателей, надежности, долговечности. Из содержания не ясно, проводилась ли оценка надежности и долговечности разрабатываемого генератора? Если да, то какими количественными критериями?

2. В разделе методы исследования указано, что применялись аналитические методы расчета физических полей. В какой части работы и какие физические поля исследовались аналитически?

3. Наружная поверхность индуктора является внутренней обоймой газодинамического подшипника. Учитывалось ли это конструктивное решение при реализации тепловых и вентиляционных расчетов?

4. В результате расчетов установлено, что зависимость потокосцепления от числа полюсов нелинейная. На основании этого утверждается, что существует оптимальное значение числа полюсов. Каким образом автор пришел к такому заключению и был ли найден этот оптимум?

5. «Потокосцепления в проведенном исследовании рассчитывалось в неподвижном состоянии ротора, значит полученные значения являются максимальными при переводе результатов анализа неподвижной модели к вращающейся». Из чего следует данное заключение?

6. На рис.3.4.1 приведена внешняя характеристика вентильного генератора, но представленная выше модель расчета не содержит связей параметров переменного и постоянного тока.

7. В массу вращающихся частей генератора включена масса якоря (или его обмотки)  $m_{armature}$ . Но якорь в предлагаемой конструкции неподвижен?

8. Не понятно смысловое значение данного высказывания «...таким образом, предлагаемый расчет учитывает наиболее нагруженный в тепловом отношении способ анализа теплового состояния генератора». (стр.76 о тепловом расчете).

9. Пояснения на рисунках необходимо размещать на русском языке, так как работа защищается на нем.

10. Для определения коэффициента теплосъема с поверхности при турбулентном движении среды принято использовать критерии подобия (например Рейнольдса). Каким образом учитывался характер движения среды при тепловом расчете в работе?

11. В выводах к главе 5 указано, что проведенные расчеты показали устойчивое «всплытие» ротора при частоте вращения 52000 об/мин. В тексте диссертации таких данных не содержится.

12. При сравнении с аналогом отсутствуют данные о величине КПД генератора и газотурбинной установки, но в цели работы заявлено улучшение энергетических показателей.

Решение данных вопросов и устранение замечаний могло бы способствовать повышению теоретической значимости и практической ценности проведенных исследований.

## **Заключение по диссертации**

Диссертационная работа на тему: «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, в которой решена важная научная задача по разработке автономного источника питания на базе аксиальной вентильной электрической машины с магнитоэлектрическим возбуждением.

Работа отвечает всем требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук, в том числе п.9 Положения о порядке присуждения ученых степеней в УрФУ, а также соответствует специальности 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы. Автор диссертации Неустроев Николай Игоревич заслуживает присвоения ученой степени **кандидата технических наук** по специальности 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы.

Официальный оппонент, доктор технических наук (05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты), доцент, профессор кафедры электромеханики и автомобильного электрооборудования Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Самарский государственный технический университет»

*Ю.Н.*

Зубков Юрий Валентинович

*УГ*

Дата составления отзыва 24.11.2022

г. Самара, ул. Первомайская, 18, каб. 134,

Тел.: +7(846) 242-37-90

e-mail: zub577@mail.ru

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

Подпись д.т.н., доцента, профессора Зубкова Ю.В. заверяю:

Ученый секретарь ФГБОУ ВО

«Самарский государствен-

ический университет»



Ю.А. Малиновская