

ОТЗЫВ

**официального оппонента, кандидата технических наук
Сташкова Алексея Николаевича на диссертацию
Горбунова Антона Евгеньевича на тему: «МЕТОДЫ И СРЕДСТВА
ВИХРЕТОКОВОГО КОНТРОЛЯ НАХЛЁСТОЧНЫХ ПАЯНЫХ
СОЕДИНЕНИЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН», представленную на
соискание ученой степени кандидата технических наук по
специальности 2.2.8. «Методы и приборы контроля и диагностики
материалов, изделий, веществ и природной среды».**

1. Актуальность темы диссертации

Тема диссертации является актуальной в связи с необходимостью обеспечения надёжности работы мощных электрических машин (турбо- и гидрогенераторов). Нахлёсточные паяные соединения токоведущих шин статорных обмоток являются критически важными элементами, выход которых из строя приводит к значительным потерям мощности, авариям и длительным простоям энергооборудования. Существующие методы неразрушающего контроля (ультразвуковой, тепловой, оптический и др.) не позволяют эффективно выявлять внутренние дефекты пайки (непропаи, пустоты) из-за особенностей геометрии соединений и свойств материалов. Разработка специализированного вихретокового метода и преобразователя направлена на решение данной практической задачи.

2. Научная новизна диссертации

Научная новизна работы подтверждается следующими положениями:

- предложена оригинальная конструкция двухэлементного тангенциального вихретокового преобразователя (ВТП) с активным экранированием, обеспечивающая чувствительность к дефектам в плоскости паяного соединения;
- разработана расчетная модель взаимодействия ВТП с объектом контроля, учитывающая мешающие параметры (изменение геометрических размеров и удельного электрического сопротивления);

ОТЗЫВ

ВХ. № 9-68 от 05.09.11
А У У С

- обоснован и реализован метод активного экранирования для подавления влияния соседних проводящих элементов и увеличения достоверности контроля.

3. Степень обоснованности и достоверности научных положений

Обоснованность и достоверность результатов подтверждаются применением современных методов компьютерного моделирования (с помощью программного обеспечения ANSYS Maxwell) с верификацией модели на экспериментальных образцах; экспериментальными исследованиями на образцах с искусственными дефектами; статистической обработкой данных и оценкой погрешностей; внедрением результатов исследований в производственный процесс ООО «КОНСТАНТА» (имеется акт внедрения); публикациями в рецензируемых журналах и участием в конференциях, в том числе международных; получением патента на изобретение (№ 2808437).

4. Научные результаты и их ценность

Ключевые научные результаты работы:

1) Разработан вихретоковый преобразователь тангенциального типа с активным экранированием, обеспечивающий измерение степени пропаянности нахлесточных соединений электрических машин в диапазоне от 0 до 100% с погрешностью не более 5%.

2) Создана конечно-элементная модель, позволяющая оптимизировать параметры ВТП и анализировать влияние мешающих факторов на результаты контроля.

3) Разработана методика контроля, включающая использование контрольных образцов, измерение удельной электрической проводимости и толщины контролируемых соединений, а также коррекцию результатов контроля с учетом мешающих факторов.

4) Проведена апробация в реальных условиях на турбогенераторах серии ТВФ, подтвердившая практическую применимость и эффективность метода.

Ценность результатов заключается в:

- повышении надёжности и безопасности работы энергетического оборудования;
- сокращении времени и затрат на контроль и ремонт;
- создании основы для дальнейших исследований в области вихретокового контроля сложных электропроводящих структур.

Результаты диссертационного исследования в достаточной степени освещены в 7 печатных работах, в том числе в 2-х статьях - в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, в 2-х статьях - в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus. Получен 1 патент на изобретение.

5. Теоретическая и практическая значимость результатов диссертации

Теоретическая значимость работы.

1) Развитие методов моделирования электромагнитных процессов. Разработана высокоточная конечно-элементная модель взаимодействия вихретокового преобразователя с объектом контроля, учитывающая мешающие параметры. Модель позволяет прогнозировать распределение вихревых токов в зоне паяного соединения и оптимизировать конструкцию преобразователя.

2) Обоснование принципа тангенциального возбуждения. Теоретически доказана возможность использования тангенциально расположенных катушек для создания вихревых токов с ненулевой нормальной составляющей, что обеспечивает чувствительность к дефектам в плоскости паяного соединения.

3) Методика коррекции влияния мешающих параметров. Предложены формулы и алгоритмы для учёта отклонений удельной

электрической проводимости и геометрических параметров контролируемого паяного соединения, что повышает достоверность измерений.

Практическая значимость работы.

1) Разработаны серийные образцы вихретоковых преобразователей (ПП-37, ПП-42, ПП-58), покрывающие типоразмеры паяных соединений турбогенераторов.

2) Разработаны контрольные образцы (0% и 100% пропаянности) и методика калибровки, обеспечивающие единство измерений.

3) Преобразователь и методика внедрены на предприятии ООО «КОНСТАНТА» для контроля паяных соединений статорных обмоток электрических машин. Результаты внедрения подтверждены актом (Приложение А).

6. Рекомендации по использованию результатов работы

Разработанные в работе вихретоковые преобразователи и способ вихретокового контроля рекомендуется применять на заводах-изготовителях турбогенераторов для контроля качества пайки соединений электрических машин.

7. Замечания и вопросы по работе

К работе имеется ряд вопросов и замечаний:

1) В работе указано, что для разных типоразмеров преобразователей используются разные частоты (75 Гц и 120 Гц). По какому критерию производился выбор оптимальной частоты возбуждения? Проводилось ли исследование зависимости чувствительности и глубины проникновения вихревых токов от частоты, и если да, то почему выбраны именно эти значения, а не, например, более низкие для большей глубины проникновения?

2) На стр. 35 диссертации ошибочно говорится об «узкой направленности разрабатываемых ВТП для конкретного типоразмера соединений и необходимости создания нового ВТП для другой типоразмера соединений». Дело в том, что ВТП с П-образным сердечником имеет высокую

однородность магнитного поля в межполюсном пространстве и при использовании непроводящих вставок в межполюсном пространстве один и тот же ВТП может применяться для контроля соединений различной толщины.

Также на стр. 35 диссертации приведено ошибочное утверждение о ВТП с П-образным сердечником, а именно: «ввиду того факта, что с двух сторон от плоскости нахлесточной пайки линии индукции магнитного поля однонаправлены, то генерируемые вихревые токи в центре паяного соединения непосредственно возле плоскости с припоем окажутся разнонаправлены, соответственно будут ослаблять друг друга». Вихревые токи в объекте контроля имеют замкнутый контур, как представлено на рис. 2.6. Отличий от тангенциального ВТП нет.

3) В экспериментальной части (раздел 3.3, стр. 92) установлено, что смещение преобразователя вдоль оси X всего на 5 мм приводит к погрешности в 48%. Какие конструктивные или программные меры предлагаются для обеспечения точного и повторяемого позиционирования преобразователя на реальном объекте, имеющем сложную геометрию?

4) Искусственные дефекты в работе моделируются как сквозные прямоугольные воздушные полости. Насколько адекватно такая модель описывает реальные дефекты пайки (несмачивание, усадочные раковины, поры, включения флюса), которые могут иметь сложную объемную форму и не быть сквозными? Проводились ли эксперименты на образцах с реальными производственными дефектами?

5) В чем заключается принципиальное отличие предложенного в диссертации подхода и первичных преобразователей тангенциального типа от известных решений, например, описанных в работах Mizukami K. с соавторами (ссылка [80] в диссертации) или Сясько В.А., Чертов Д.Н. (ссылка [71] в диссертации)?

6) Формула (3.1) на стр. 89 диссертации содержит очевидные ошибки и является некорректной с математической и физической точек зрения. Нельзя складывать величины, имеющие разные размерности. Результат сложения

величины ($k - \sigma_{OK}$) в См/м, корня квадратного из безразмерной величины и показания прибора Rez в процентах не имеет физического смысла.

7) В работе заявлена итоговая погрешность измерения степени пропайности не более 5%. Однако в разделе 4.2 (стр. 105 диссертации) расчетная суммарная погрешность от основных факторов (электропроводности и геометрии) уже составляет около 4,86%. Учтены ли в этом значении все возможные источники погрешности, такие как температура контролируемого объекта, вариация шага между шинами, неточность позиционирования, шумы аппаратуры, погрешность усреднения? Не является ли заявленная оценка погрешности слишком оптимистичной?

8. Заключение по диссертации

Вышеперечисленные вопросы не умаляют несомненных достоинств работы, таких как комплексный подход, глубокая проработка и успешное внедрение результатов. Диссертация представляет собой завершённое научное исследование, направленное на решение актуальной научно-практической задачи. Результаты работы обладают высокой научной и практической ценностью, подтверждены теоретически, экспериментально и внедрены в производство. Считаю, что, не смотря на изложенные выше замечания, диссертация **«МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ВИХРЕТОКОВОГО КОНТРОЛЯ НАХЛЁСТОЧНЫХ ПАЯНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН»**, представленная на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.8. **«Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды»** полностью отвечает требованиям раздела 2 «Положения о присуждении ученых степеней» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II», утвержденного приказом ректора Санкт-Петербургского горного университета Екатерины II от 20.05.2021 № 953 адм, а ее автор **Горбунов Антон Евгеньевич** заслуживает

присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности

2.2.8. «Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды».

Официальный оппонент

Ведущий научный сотрудник

ИФМ УрО РАН,

кандидат технических наук



Сташков Алексей Николаевич

Подпись оппонента Сташкова Алексея Николаевича заверяю



И.О. Сташков Секретарь ИФМ УрО РАН *И.И. Пеломыкин*
М.П. *29.08.2025*

Сведения об официальном оппоненте:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук (ИФМ УрО РАН)

Почтовый адрес: 620108, г. Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской, 18

Официальный сайт в сети Интернет: <https://www.imp.uran.ru/>

эл. почта: physics@imp.uran.ru

телефон: (343) 374-02-30