

На правах рукописи

Пищалев Константин Евгеньевич

Технология высокочастотного индукционного нагрева насадных деталей
роторов турбогенераторов и паровых турбин

05.09.10 – Электротехнология

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2014

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И.Ульянова (Ленина)» в межотраслевой лаборатории «Современные электротехнологии»

Научный руководитель: доктор технических наук
Дзлийев Сослан Владимирович
Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет «ЛЭТИ» им.
В.И.Ульянова (Ленина), профессор кафедры
электротехнологической и преобразовательной
техники

Официальные оппоненты: Фролов Владимир Яковлевич
доктор технических наук, профессор
Санкт-Петербургский государственный
политехнический университет, заведующий
кафедрой электротехники и электротехнологии

Растворова Ирина Ивановна
кандидат технических наук
Национальный минерально-сырьевой
университет «Горный», доцент кафедры
электронных систем

Ведущая организация: Федеральное Государственное Унитарное
Предприятие Всероссийский Научно -
Исследовательский Институт Токов Высокой
Частоты ВНИИТВЧ

Защита состоится " __ " _____ 2014 года в __ часов __ минут на заседании диссертационного совета Д 212.238.05 Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И.Ульянова (Ленина) по адресу: 197376, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, д. 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке СПбГЭТУ «ЛЭТИ» и на сайте <http://www.eltech.ru>.

Автореферат разослан " __ " _____ 2014 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.238.05

М.П. Белов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В связи с ростом мощностей турбогенераторов, используемых при выработке электроэнергии, а также применением новых материалов и конструктивных решений, традиционные методы нагрева при монтаже и демонтаже насадных деталей не могут в достаточной степени обеспечить успешное проведение данных технологических операций. Традиционно применяемые нагрев в муфельных печах, газопламенный нагрев и индукционный нагрев на промышленной частоте исчерпали себя в плане повышения эффективности и в отдельных случаях непригодны для выполнения требуемых технологических операций. Поэтому требуется внедрение новых методов нагрева, в частности индукционного нагрева токами высокой частоты, чему, в том числе, способствует появление надёжной элементной базы для создания высокоэффективных и достаточно мобильных транзисторных генераторов.

В сложившейся ситуации актуальной является разработка технологии высокочастотного индукционного нагрева крупногабаритных насадных деталей при монтаже и демонтаже. Разработка технологии требует проведения комплексного исследования, включающего разработку методики моделирования процессов, исследование моделей реальных технических объектов и проведение натурных экспериментов с целью выработки рекомендаций по выбору типа, числа и мест размещения индукторов, режиму нагрева и контролю процесса. Технология нагрева должна учитывать условия проведения такелажных работ, в частности положение вала при проведении работ, а также требования санитарных правил и норм по обеспечению безопасности обслуживающего персонала.

Целью работы является разработка технологии высокочастотного индукционного нагрева крупногабаритных насадных деталей роторов турбогенераторов и паровых турбин.

Для достижения этой цели в диссертации поставлены и решены следующие задачи:

- разработка методики моделирования системы "индуктор – насадная деталь – вал";
- разработка и исследование модели системы "индуктор – бандажное кольцо – зубцы ротора турбогенератора", представляющей собой случай высокочастотного индукционного нагрева немагнитной детали при горизонтальном положении вала ротора;
- разработка и исследование модели системы "индуктор – рабочее колесо турбины – вал ротора турбины", представляющей собой случай высокочастотного индукционного нагрева магнитной детали при вертикальном положении вала ротора;
- разработка технологии высокочастотного индукционного нагрева насадных деталей при монтаже и демонтаже (выбор типа, числа и мест размещения индукторов, режима нагрева и алгоритма управления процессом).

Методы исследования включают в себя численные расчёты и натурные эксперименты. Численные расчёты проведены в среде ANSYS, реализующей расчёты на конечно-элементных моделях, натурные эксперименты проведены в ООО "Интерм", а также на заводах "Электросила" и ЛМЗ ОАО "Силовые машины".

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Методика моделирования системы "индуктор – насадная деталь – вал".
2. Модель высокочастотного индукционного нагрева, термического расширения и схода с посадки немагнитного бандажного кольца ротора турбогенератора ТЗВ-1200-2 при горизонтальном положении вала.
3. Модель высокочастотного индукционного нагрева, термического расширения и схода с посадки магнитного рабочего колеса паровой турбины к-300-240 при вертикальном положении вала.
4. Технология высокочастотного индукционного нагрева насадных деталей при монтаже и демонтаже.

Научная новизна. В ходе исследования получены следующие новые научные результаты:

- подтверждена возможность и высокая эффективность использования токов высокой частоты для нагрева крупногабаритных деталей из магнитных и немагнитных металлов;
- рассмотрены физические явления, приводящие к отклонению от осевой симметрии при горизонтальном расположении вала, обусловленные действием гравитации, оценена вносимая ими неравномерность условий нагрева, охлаждения и расцепления контактных поверхностей по периметру, обоснована корректность использования двумерной осесимметричной постановки для их моделирования;
- на моделях оценено взаимное влияние близко расположенных индукторов при нагреве как магнитных, так и немагнитных деталей; установлено, что существенное взаимное влияние близко расположенных индукторов проявляется только при нагреве магнитных деталей (рабочих колёс паровых турбин), где индуктора должны располагаться на максимальном удалении;
- исследовано влияние переменного по ширине зазора между поверхностью немагнитной детали и ленточным индуктором, а также между токоподводами на активное сопротивление, индуктивность и распределение плотности тока по сечению индуктора и детали; при практически возможном отклонении от параллельности активное сопротивление меняется незначительно, в то время как увеличение индуктивности в разы и повышение концентрации плотности тока в области минимального зазора могут вылиться в рассогласование и перегрев соответственно;
- определена зависимость активного сопротивления индуктора-провода при нагреве деталей из магнитных материалов от шага намотки – с ростом шага сопротивление падает; в связи с этим для согласования

индуктора-провода с генератором без трансформатора при плотной намотке требуется меньшая длина индуктирующего провода (на ступицу рабочего колеса пятью витками наматывается около 14 м), чем при намотке с крупным шагом (на полотно рабочего колеса пятью витками свободно наматывается около 19 м);

- предложена стратегия группового нагрева крупногабаритных насадных деталей с использованием нескольких источников питания, позволяющая формировать необходимое температурное поле в нагреваемой детали.

Достоверность научных положений, результатов и выводов диссертации обуславливается корректным использованием методов исследования, применением современных компьютерных средств и программных комплексов, подтверждается совпадением теоретических результатов с экспериментальными данными, полученными при проведении реальных технологических операций.

Практическая ценность новых научных результатов следует из того, что предложенный метод нагрева успешно внедрён в производство и показал себя лучше, чем использовавшиеся ранее. Он позволяет точно контролировать процесс нагрева и способствует более высокой культуре труда.

Реализация и внедрение результатов исследований. Результаты работы внедрены на заводах ЛМЗ и "Электросила" ОАО "Силовые машины" в технологиях монтажа и демонтажа бандажных колец роторов турбогенераторов и рабочих колёс паровых турбин, а также в ООО "Интерм" при разработке оборудования и технологии для горячей посадки крупногабаритных насадных деталей.

Апробация. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на 63-65 и 67 конференциях профессорско-преподавательского состава СПбГЭТУ "ЛЭТИ" в 2010-2012 и 2014 годах и на

международном молодёжном форуме "Энергоэффективные электротехнологии" в 2011 году.

Публикации. Основные теоретические и практические результаты диссертации опубликованы в 10 статьях и докладах, среди которых 5 публикаций в ведущих рецензируемых изданиях, рекомендованных в действующем перечне ВАК. Доклады доложены и получили одобрение на 5 международных, всероссийских и межвузовских научно-практических конференциях, перечисленных в конце автореферата.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, 3 глав, заключения и списка литературы. Она изложена на 123 страницах машинописного текста, включает 51 рисунок, 4 таблицы и содержит список литературы из 48 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, рассматриваются применение горячей посадки в машиностроении и методы, традиционно применяющиеся для нагрева крупногабаритных деталей под горячую посадку и для снятия с неё – нагрев в муфельных печах, газопламенный нагрев и индукционный нагрев на промышленной частоте. Анализируются достоинства и недостатки этих методов, проводится их сравнение с высокочастотным индукционным нагревом. Формулируются цели и основные задачи работы, характеризуется новизна и практическая значимость полученных результатов, приводятся основные положения, выносимые на защиту.

Глава 1 посвящена разработке методики моделирования системы "индуктор – насадная деталь – вал". В ней произведена постановка задачи моделирования, определена структура модели (рис. 1), выбраны программные средства для разработки модели, а также выбраны параметры дискретизации модели по времени и в пространстве. Кроме того, в рамках разработки методики моделирования был поставлен ряд численных и

натурных экспериментов для подтверждения корректности принятых допущений.

Важным результатом, полученным в первой главе, является выбор типов индукторов для нагрева деталей, выполненных из магнитных и немагнитных металлов – для немагнитных, которым свойственно более яркое проявление эффекта близкодействия и меньшая теплопроводность, решено использовать широкий ленточный индуктор, для магнитных, распределение тока

по поверхности которых при использовании многовиткового индуктора более равномерно, а теплопроводность выше – многовитковый индуктор-провод (рис. 2). Кроме того, такой выбор типов индукторов определяется тем, что более простая, близкая к цилиндру, форма немагнитных деталей (бандажные кольца) удобна для использования ленточного индуктора, а заметно более сложная форма рабочих колёс из магнитной стали легче обматывается проводом.

Для снижения объёмов и времени расчётов была выбрана двумерная осесимметричная постановка задачи. Учёт взаимодействия электромагнитной задачи по первой гармонике и связанных тепловой и механической задач в переходной области осуществляется передачей распределения источников тепла из электромагнитной задачи в тепловую и температурных полей – обратно. При этом учитываются нелинейности, связанные со свойствами

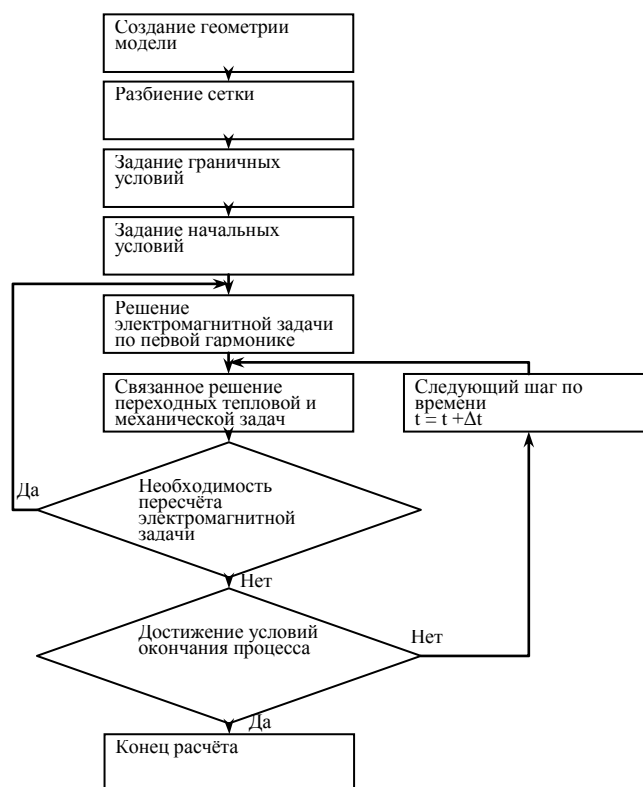


Рисунок 1. – Блок-схема алгоритма моделирования

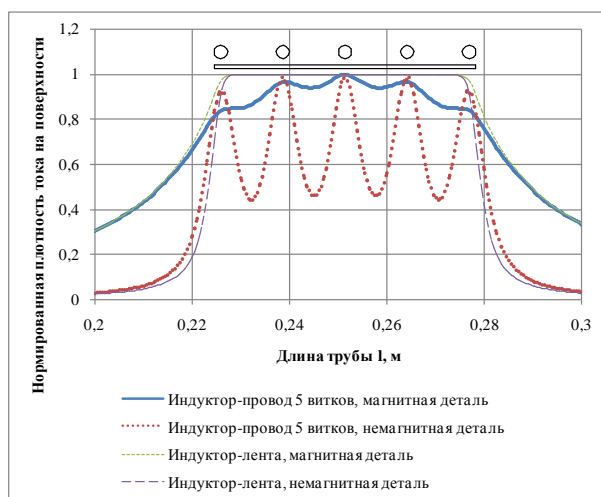


Рисунок 2. – Распределение плотности тока по поверхности немагнитных и магнитных деталей при использовании разных типов индукторов

Погрешности определения сопротивлений и индуктивностей при расчёте по первой гармонике по сравнению с более точным расчётом во временной области составили около 5% для немагнитной загрузки и около 10% – для магнитной. В силу заметно меньших затрат машинного времени принято решение использовать гармонический анализ, пренебрегая эффектами от воздействия высших гармоник.

Учёт в термостойком анализе индуктора и изоляции потребовал бы рассмотрения дополнительной контактной задачи. Кроме того, характер их взаимодействия по части теплопередачи излишне сложен. Исключение их приводит к погрешности по температуре в контрольных точках на поверхности 5-10% при нагреве и до 15% при охлаждении (рис. 3), что связано с поведением индуктора во время нагрева как теплового экрана. В силу того, что основной интерес при монтаже и демонтаже представляет нагрев насадных деталей, соответствующая ему при принятых допущениях погрешность допустима.

Наконец, были рассмотрены физические явления, приводящие к отклонению от осевой симметрии при горизонтальном расположении вала,

материалов и решением контактных задач. Условия охлаждения заданы аналитически рассчитанными коэффициентами теплоотдачи.

В главе произведена оценка погрешностей моделирования, внесённых упрощением реальных трёхмерных объектов до двух измерений, использованием при решении электромагнитной задачи вычислений по первой гармонике и исключением из термостойкой задачи индуктора и изоляции.

обусловленные действием гравитации, которые не могут быть учтены в выбранной для рассмотрения двумерной осесимметричной постановке – провисание индуктора и связанное с ним неравномерное распределение источников теплоты (рис. 4), непостоянные по периметру условия

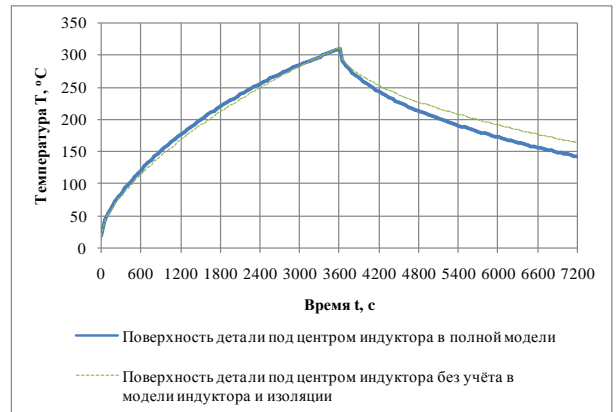


Рисунок 3. – Динамика температуры в различной постановке

охлаждения при свободной конвекции, образование зазора и сопутствующее ему прекращение теплопроводности через контактные поверхности (рис. 5). Вносимая этими явлениями неравномерность в распределении температуры и образовании зазора по периметру, поддающаяся учёту только в трёхмерной постановке, может быть частично компенсирована за счёт натяжения ленты индуктора. В этом случае неравномерность нагрева по периметру составляет порядка 10%, поэтому время схода и температура поверхности достаточно точно могут быть рассчитаны на двумерной модели, а неравномерность в распределении температуры рекомендуется учитывать при практическом применении – датчики контроля температуры должны располагаться в верхней точке горизонтально расположенного бандажного кольца, где наблюдается максимальная температура.

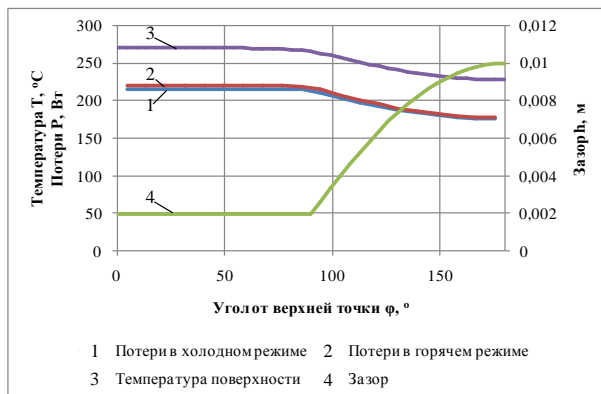
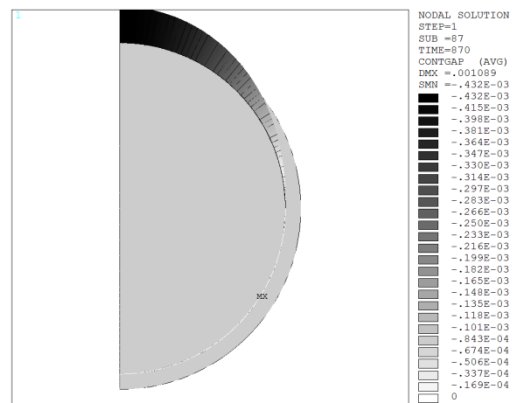


Рисунок 4. – Провисание индуктора, температура через час нагрева, распределение по периметру потерь в начале и через час нагрева



Глава 2 посвящена разработке технологии высокочастотного индукционного нагрева бандажных колец роторов турбогенераторов при монтаже и демонтаже.

Предложенная методика моделирования использована для разработки модели бандажного кольца ротора турбогенератора ТЗВ-1200-2. Разработанная технология предполагает нагрев бандажа при посадке и снятии с неё пятью индукторами ленточного типа, расположенными в соответствии со схемой на рис. 6: три индуктора шириной 225 мм запитываются каждый от отдельного транзисторного генератора, два индуктора шириной 75 мм подключаются к одному источнику параллельно. Оптимальная удельная мощность нагрева, при которой индуктор можно использовать без принудительного охлаждения составляет $3,5...4 \text{ Вт/см}^2$, поэтому оптимальная мощность каждого из источников составляет 40 кВт. Такое расположение и подключение индукторов обеспечивает наиболее равномерный и быстрый нагрев бандажного кольца и позволяет независимо регулировать температурный режим в отдельных областях.

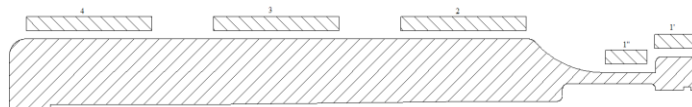


Рисунок 6. – Схема расположения индукторов на бандажном кольце ротора турбогенератора ТЗВ-1200-2

Исследован вопрос взаимного электромагнитного влияния индукторов друг на друга – установлено, что ленточные индуктора слабо влияют друг на друга и могут располагаться в непосредственной близости.

Также рассмотрены возможности согласования индукторов с источниками питания исходя из диаметра детали и ширины индуктора. На рисунке 7 представлена полученная в результате исследования номограмма для определения оптимального коэффициента трансформации блока согласования транзисторного генератора ТГИ-40/100, используемого в составе нагревательного поста в качестве источника питания при нагреве бандажных колец из титанового сплава ВТЗ-1 на частоте 66 кГц.

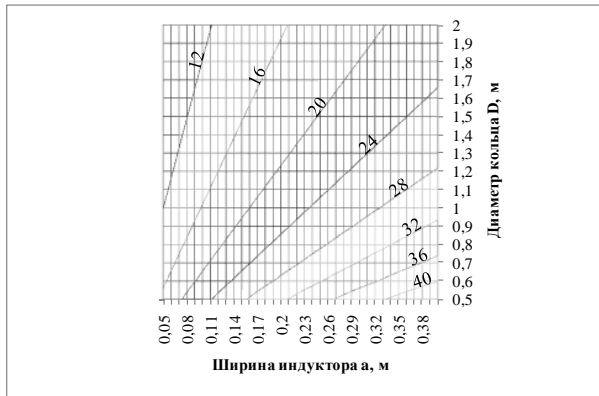


Рисунок 7. – Номограмма для определения коэффициента трансформации

оснастку, а соответствующие экспериментальные и расчётные графики нагрева представлены на рисунке 9. Расчётные температурные кривые качественно и количественно совпадают с экспериментальными с достаточно высокой точностью.

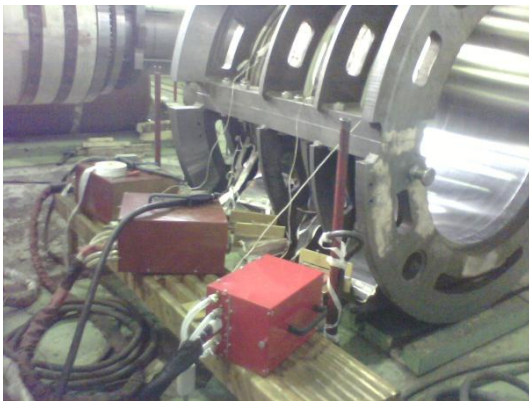


Рисунок 8. – Нагрев бандажного кольца для посадки на зубцы бочки ротора турбогенератора ТЗВ-1200-2

Разработанная технология апробирована и внедрена в производство на заводе "Электросила" ОАО "Силовые машины". На фотографии (рис. 8) показан рабочий момент процесса нагрева для посадки бандажного кольца ротора турбогенератора ТЗВ-1200-2, помещённого в специальную

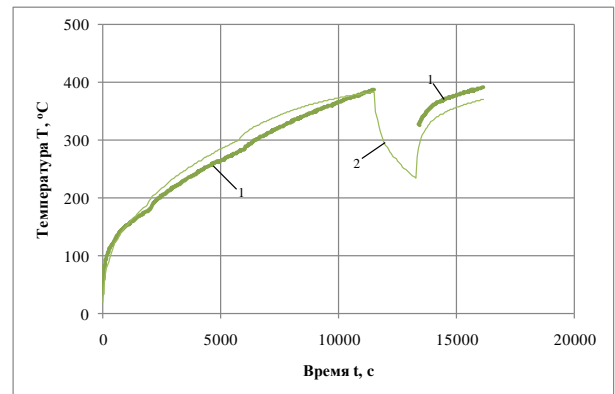


Рисунок 9. – Экспериментальный (1) и расчётный (2) графики изменения температуры

Глава 3 посвящена разработке технологии высокочастотного индукционного нагрева рабочих колёс паровых турбин при монтаже и демонтаже.

Исследование проводилось на модели ротора низкого давления паровой турбины к-300-240 (рис. 10). Масса дисков рабочих колёс находится в значительном диапазоне (от 665 кг для первой ступени до 3125 кг – для

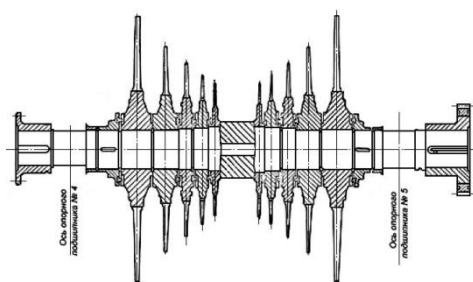


Рисунок 10. – Ротор низкого давления

пятой), сложная форма их поверхности не способствует равномерному их покрытию ленточными индукторами, кроме того, магнитные свойства не позволяют располагать индуктора от разных источников питания рядом. В силу этого используются три многовитковых индуктора из провода, разнесённых на максимально возможное расстояние и запитанных от отдельных транзисторных генераторов. При этом более лёгкие рабочие колёса первых двух ступеней снимаются с посадки одновременно. На рисунке 11 представлено принятое в итоге расположение индукторов при использовании трёх нагревательных постов.

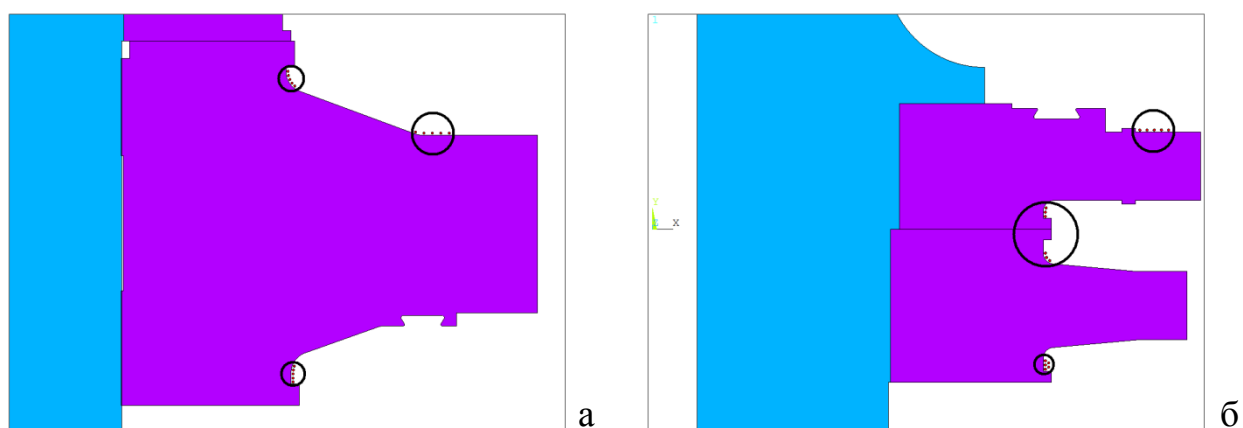


Рисунок 11. – Конечный вариант расположения витков индукторов на рабочем колесе пятой ступени (а) и первых двух ступеней (б)

Высокое сопротивление многовиткового индуктора с магнитной нагрузкой позволяет согласовать его с транзисторным генератором ТГИ-40/100, имеющим номинальное сопротивление нагрузки 5 Ом, без трансформатора. На рисунке 12 представлена номограмма для определения шага намотки пятивиткового индуктора из термостойкого провода для оптимального согласования на номинальное сопротивление нагрузки источника питания.

Исследование моделей при выбранном расположении витков показало, что мощность нагрева имеет ярко выраженный оптимум, при котором нагрев

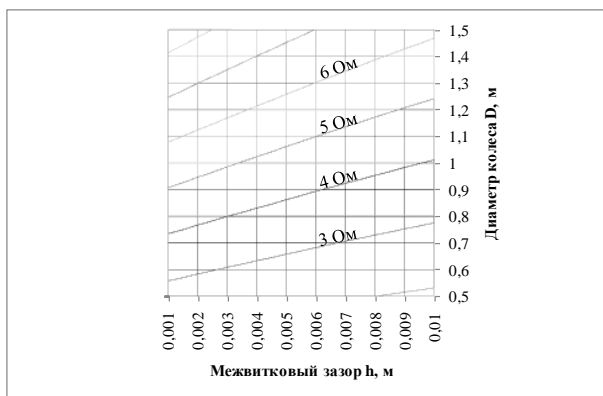


Рисунок 12. – Номограмма для определения активного сопротивления индуктора

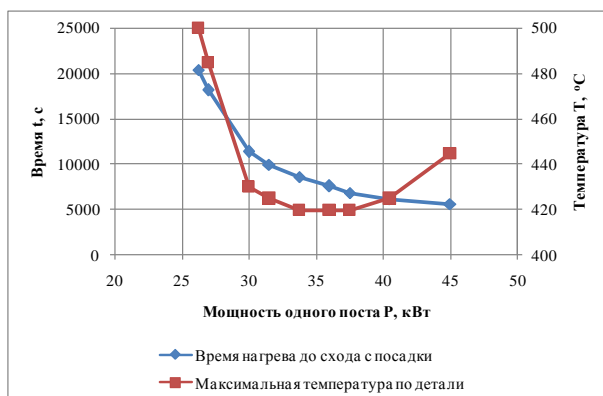


Рисунок 13. – Время нагрева рабочего колеса пятой ступени тремя нагревательными постами до схода с посадки и максимальная температура на момент схода в зависимости от мощности одного поста

Расчётные температурные кривые качественно и количественно совпадают с экспериментальными с достаточно высокой точностью.

В **заклучении** сформулированы основные научные и практические результаты

происходит за приемлемое время без излишнего перегрева поверхности (рис. 13).

Разработанная технология внедрена в производство на заводе ЛМЗ ОАО "Силовые машины". На фотографии (рис. 14) показан рабочий момент процесса нагрева для снятия с посадки рабочего колеса пятой ступени ротора низкого давления паровой турбины к-300-240, а соответствующие экспериментальные и расчётные графики нагрева представлены на рисунке 15.



Рисунок 14. – Нагрев рабочего колеса пятой ступени для снятия с посадки

диссертационной работы, сделаны выводы об эффективности предложенной технологии высокочастотного индукционного нагрева крупногабаритных насадных деталей, изготовленных как из магнитных, так и из немагнитных металлов, при монтаже и демонтаже.

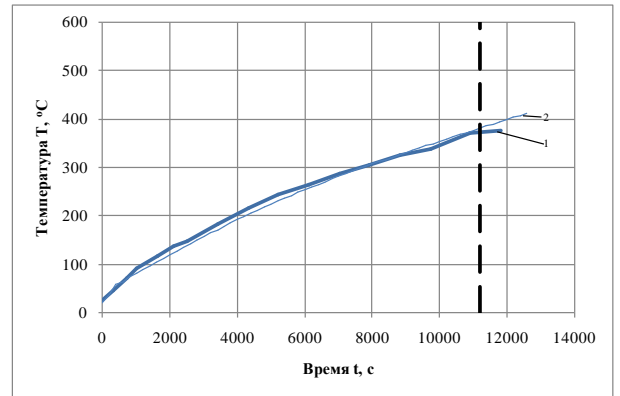


Рисунок 15. – Экспериментальный (1) и расчётный (2) графики изменения температуры

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Разработана методика моделирования высокочастотного индукционного нагрева крупногабаритных насадных деталей.
2. На моделях и экспериментально исследованы процессы, проходящие при высокочастотном индукционном нагреве цилиндрических крупногабаритных насадных деталей, выполненных из немагнитных материалов, при горизонтальном расположении вала ротора.
3. На моделях и экспериментально исследованы процессы, проходящие при высокочастотном индукционном нагреве дисковых крупногабаритных насадных деталей, выполненных из магнитных материалов, при вертикальном расположении вала ротора.
4. Разработана и успешно внедрена в действующее производство технология высокочастотного индукционного нагрева крупногабаритных насадных деталей при монтаже и демонтаже.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК России:

1. Высокочастотный индукционный нагрев при горячей посадке бандажных колец турбогенераторов и рабочих колёс паровых турбин / Пищалев К.Е., Дзлиев С.В., Жнакин Д.М., Перевалов Ю.Ю. // Индукционный нагрев. – 2012. – №2 (20) – с. 25-28.
2. Согласование транзисторных преобразователей частоты с индукционными нагревателями / Пищалев К.Е., Дзлиев С.В., Завороткин А.А., Перевалов Ю.Ю. // Индукционный нагрев. – 2012. – №3 (21). – с. 33-40
3. Неустойчивость при индукционном нагреве магнитной стали / Пищалев К.Е., Дзлиев С.В., Завороткин А.А., Жнакин Д.М., Перевалов Ю.Ю. // Индукционный нагрев. – 2013. – №1 (23). – с. 36-41.
4. Автоколебания при сканирующем индукционном нагреве ленты из немагнитной стали / Пищалев К.Е., Дзлиев С.В., Жнакин Д.М., Завороткин А.А., Перевалов Ю.Ю. // Индукционный нагрев. – 2013. – №2 (24). – с. 33-40.
5. Высокочастотный индукционный нагрев крупногабаритных деталей / Пищалев К.Е., Дзлиев С.В., Жнакин Д.М., Перевалов Ю.Ю. // Известия СПбГЭТУ "ЛЭТИ". – 2012. – №5. – с. 92-98.

Материалы конференций:

6. Пищалев К.Е. Технология высокочастотного нагрева при горячей посадке крупногабаритных деталей / 63-я научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава СПбГЭТУ "ЛЭТИ" 26 января – 6 февраля 2010 г.
7. Пищалев К.Е., Дзлиев С.В., Бондаренко Д.Н., Патанов Д.А., Тихомиров И.С. Высокочастотный индукционный нагрев крупногабаритных деталей: моделирование и экспериментальные исследования / 64-я

- научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава СПбГЭТУ "ЛЭТИ" 25 января – 5 февраля 2011 г.
8. Пищалев К.Е., Дзлийев С.В., Завороткин А.А., Перевалов Ю.Ю. Технологии низкотемпературного индукционного нагрева / 65-я научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава СПбГЭТУ "ЛЭТИ" 24 января – 4 февраля 2012 г.
9. Пищалев К.Е., Дзлийев С.В. Оборудование и технология высокочастотного индукционного нагрева бандажных колец роторов турбогенераторов и рабочих колёс паровых турбин при монтаже и демонтаже / 67-я научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава СПбГЭТУ "ЛЭТИ" 27 января – 3 февраля 2014 г.
10. Пищалев К.Е. Высокочастотный индукционный нагрев при монтаже и демонтаже крупногабаритных деталей роторов турбогенераторов и паровых турбин / Международный молодёжный форум "Энергоэффективные электротехнологии" 19 – 23 сентября 2011 г.