

С. В. ДЗЛИЕВ, доктор техн. наук,
К. Е. ПИЩАЛЕВ,
Д. М. ЖНАКИН,
Ю. Ю. ПЕРЕВАЛОВ,
СПбГЭТУ (ЛЭТИ), г. Санкт-Петербург

Выработка электроэнергии на тепловых и атомных электростанциях производится с помощью турбогенераторов, которые приводятся во вращение паровыми турбинами. Мощность этих агрегатов достигает 1200 МВА, масса – десятков тонн, а скорость вращения – 3000 об/мин, поэтому конструктивно для крепления деталей на валах роторов турбогенераторов и турбин используется способ горячей посадки, не создающий в деталях несимметричных напряжений, способных вызвать опасные локальные концентрации механических напряжений и вибрации.

На валу ротора турбогенератора способом горячей посадки крепятся бандажные кольца, контактные кольца, полумуфты, вентиляторы, а на валу ротора паровой турбины – до десяти рабочих колес с турбинными лопатками, полумуфты и другие детали. Масса одной насадной детали может достигать 3,5 тонн.

Суть способа горячей посадки заключается в том, что насаживаемую деталь с диаметром отверстия меньшим, чем диаметр вала, нагревают до температуры 200...400 °С для увеличения диаметра отверстия из-за температурного расширения металла и устанавливают в нагретом состоянии на вал. После остывания детали возникает прочное соединение, выдерживающее рабочие усилия. Разница между диаметрами детали и вала в холодном состоянии (натяг) составляет от долей миллиметра до нескольких миллиметров. Зазор между валом и нагретой деталью при посадке обычно не превышает 1...2 мм, так как предельная температура нагрева ограничена опасностью изменения структуры металла и термостойкостью близлежащей электрической изоляции.

Традиционно нагрев деталей производится в газовых или электрических печах, газовыми горелками или индукционным способом на промышленной частоте.

Индукционный нагрев на высокой частоте для монтажа и демонтажа крупногабаритных деталей способом горячей посадки сравнительно недавно начал внедряться на электромашиностроительных заводах и электростанциях России [1 – 4].

Эффективность индукционного нагрева столь крупногабаритных деталей на высокой частоте (10...66 кГц) не очевидна. Как правило, для нагрева массивных деталей применяется более низкая частота для быстрого прогрева глубинных слоев, однако при нагреве под горячую посадку на первый план выступают следующие преимущества высокочастотного индукционного нагрева:

- глубина проникновения тока меньше толщины нагреваемых деталей, поэтому не прогревается вал и не происходит электроискровая эрозия на границе «вал-деталь»;
- максимальную температуру имеет поверхность детали, где температура доступна для контактного или бесконтактного контроля и регулирования, что позволяет гарантировать качество нагрева без опасности ухудшения кристаллической структуры металла из-за перегрева.

Насадные детали роторов турбогенераторов и паровых турбин имеют сложную форму, отличаются материалом (магнитная или немагнитная сталь, титановый или алюминиевый сплав), диаметром и длиной посадочного контакта, натягом, числом мест посадки.

Высокочастотный индукционный нагрев при горячей посадке бандажных колец турбогенераторов и рабочих колес паровых турбин

Ключевые слова: высокочастотный индукционный нагрев, горячая посадка, бандажные кольца турбогенераторов, рабочие колеса паровых турбин

При монтаже целесообразно стремиться к равномерному нагреву бандажного кольца турбогенератора, чтобы увеличить его внутренний диаметр на всей длине, так как необходимо не только насадить кольцо на зубцы ротора, но и обжать лобовые части обмотки.

При демонтаже, наоборот, целесообразно нагревать только область посадки так, чтобы бандажное кольцо сошло с зубцов ротора. При этом из-за локального нагрева возникают внутренние напряжения с плавным переходом от расширенного горячего участка к недеформированному холодному. Это явление учитывается в конструкции бандажных колец, в которой предусматривается уменьшение толщины кольца в переходной зоне для снижения внутренних напряжений при нагреве.

Нагреть деталь равномерно по всему объему можно только в печи. При этом температура нагрева до требуемого расширения может быть определена по формуле (1)

$$T = \Delta D / (\alpha \cdot D), \quad (1)$$

где:

D – диаметр отверстия нагреваемой детали при температуре 20 °С,

ΔD – требуемое увеличение диаметра отверстия при нагреве,

α , °С⁻¹ – коэффициент линейного расширения металла [5, 6].

При индукционном нагреве температурное поле неравномерно как в процессе нагрева, так и во время про-

ведения операции монтажа или демонтажа. При этом для достижения требуемого расширения средняя температура детали, а, следовательно, и теплосодержание, должны быть больше, чем при равномерном нагреве из-за внутренних механических напряжений и деформаций. В этом случае значение температуры, полученное по формуле (1), является оценкой снизу. Кроме того, при снятии детали с посадки до момента потери контакта между деталью и валом происходит передача тепла в вал, что ведёт к его расширению. В этом случае оценка (1) представляет собой минимальную разницу температур между валом и деталью (в случае одинаковых коэффициентов линейного расширения материалов детали и вала).

Достаточно точные оценки достижения требуемых деформаций при ограничениях на температуру нагрева дает компьютерное моделирование – численное решение взаимосвязанные электромагнитных, тепловых и деформационных задач при точном задании формы и свойств материала детали и индуктора.

При разработке модели необходимо учитывать, что электромагнитные свойства материалов мало изменяются при нагреве в пределах допустимого диапазона температур 20...400 °С, и нет необходимости в частом пересчёте электромагнитной задачи. Кроме того, на высокой частоте с небольшой погрешностью можно считать структурно-тепловую задачу без расчета электромагнит-

ной, приняв постоянной удельную мощность, приложенную к нагреваемым поверхностям. При оценке реальной удельной поверхностной мощности нужно учесть, что электрический КПД системы «индуктор-провод – магнитная деталь» составляет около 95%, а КПД системы «индуктор-лента – немагнитная деталь» – около 80%.

На рис. 1. показаны полученное на компьютерной модели в программном комплексе ANSYS [7] температурное поле и деформация бандажного кольца (величина перемещений увеличена в 10 раз, а штриховая линия показывает контур недеформированной модели) при нагреве тремя индукторами на частоте 66 кГц, а на рис. 2 – расчетные и экспериментальные графики мощности (кривая 1) и температуры поверхности бандажного кольца под индуктором (кривая 2 – экспериментальная, кривая 3 – расчётная). Отклонение расчетных результатов от экспериментальных не превышает 10%, что говорит об адекватности моделей и возможности использования результатов моделирования для выработки практических рекомендаций и разработки технологии нагрева.

На рис. 3 показаны полученные на компьютерной модели температурное поле и эпюра контактного давления на посадочной поверхности рабочего колеса ротора паровой турбины в момент расцепления при нагреве тремя индукторами с одинаковой мощностью.

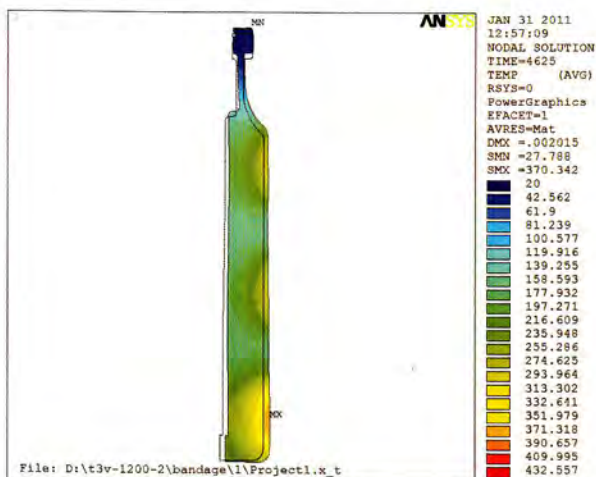


Рис. 1. Температурное поле и деформация бандажного кольца

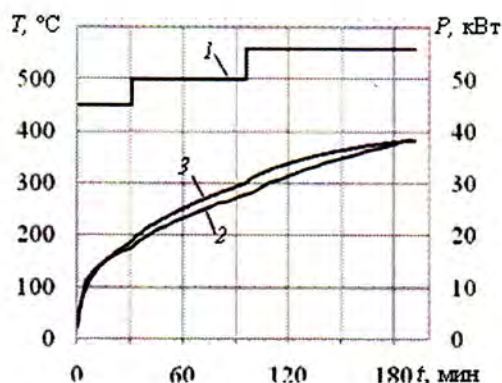


Рис. 2. Расчетные и экспериментальные графики мощности (кривая 1) и температуры поверхности бандажного кольца под индуктором (кривая 2 – экспериментальная, кривая 3 – расчётная)

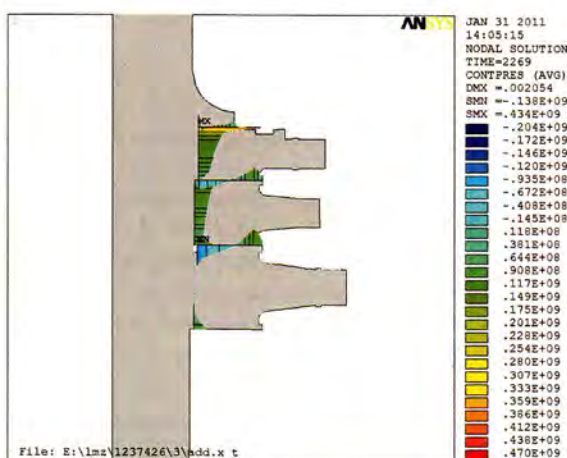
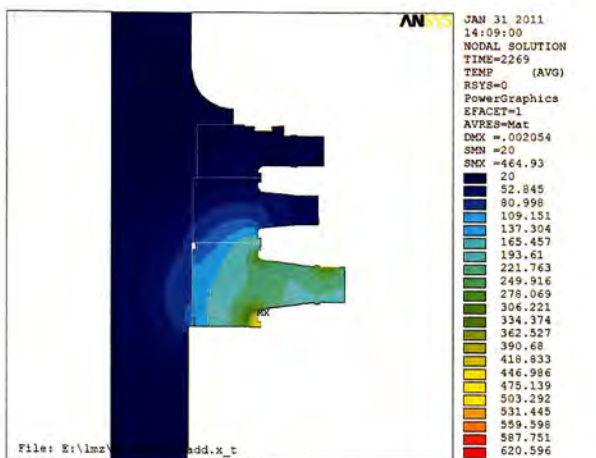


Рис. 3. Температурное поле и эпюра контактного давления

Модель позволяет отслеживать температурное поле и определить время расцепления деталей, которое является основным параметром процесса, а также оптимизировать параметры индукционной системы и режима нагрева и дать рекомендации для практики.

Примером таких рекомендаций, выработанных на базе компьютерного моделирования, является представленное на рис. 4 зависимости от мощности нагрева двух важных параметров – времени снятия с посадки рабочего колеса ротора турбины (кривая 1) и максимальной температуры нагрева колеса в момент его освобождения (кривая 2). По графикам можно выделить диапазон возможной мощности нагрева от 30 до 40 кВт каждым индуктором, в котором операция демонтажа рабочего колеса происходит без его перегрева выше 430°C. При снижении или повышении мощности нагрева разъединение рабочего колеса и вала происходят при более высоких температурах, которые могут ухудшить кристаллическую структуру металла. При мощности 30 кВт время нагрева составляет 3 часа 10 минут, а при 40 кВт – 1 час 40 минут.

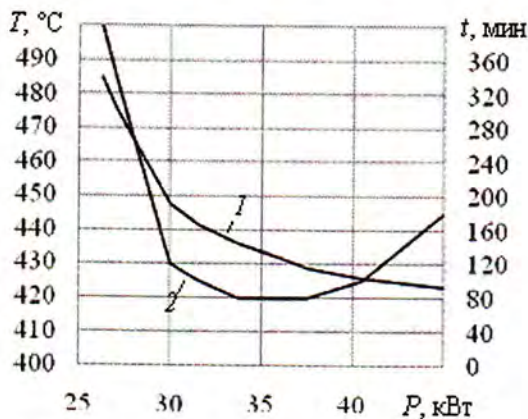


Рис. 4. Зависимость времени снятия (кривая 1) и максимальной температуры нагрева (кривая 2) от мощности

Ясно, что при технической возможности нагрева на максимальной мощности из допустимого диапазона, этот режим предпочтителен, однако возможно проведение операции и при нагреве на мощности 30 кВт.

На рис. 5 и 6 показано, как практически происходит



Рис. 5. Нагрев бондажного кольца ротора турбогенератора

нагрев бондажного кольца ротора турбогенератора и рабочего колеса ротора паровой турбины.

Нагрев производится на частоте 66 кГц с использованием высокочастотного нагревательного оборудования фирмы «ИНТЕРМ» [4] – транзисторных генераторов серии ТГИ с выносными блоками согласования, включающими высокочастотный согласующий трансформатор и конденсатор, компенсирующий реактивную мощность индуктора.

При нагреве бондажных колец роторов турбогенераторов, которые изготавливаются из немагнитных легированных сталей, титановых или алюминиевых сплавов, применяется индуктор-лента [2], показанный на рис. 5. При нагреве бондажных колец индуктор-лента имеет ряд преимуществ по сравнению с традиционными индукторами, изготавливаемыми из медной трубки с водяным охлаждением или индукторами из медного провода с высокотемпературной изоляцией. К ним относятся:

- отсутствие водяного охлаждения, что повышает надежность нагревательного оборудования, исключая возможность попадания воды в обмотку турбогенератора в аварийной ситуации;
- низкое напряжение на индукторе, обеспечивающее безопасность обслуживающего персонала и снижающее требования к изоляции индуктора;
- повышенный КПД, как электрический, так и тепловой, что связано с малым зазором между индуктором и поверхностью бондажного кольца, а также тем, что тепло, выделяющееся в ленте индуктора, не только блокирует теплопотери с поверхности бондажа, но и частично поступает в нагреваемую деталь, обеспечивая дополнительный нагрев бондажа и охлаждение ленты индуктора.
- низкая напряженность внешнего магнитного поля, что предотвращает нагрев прилегающих деталей, уменьшает радиопомехи и улучшает условия труда и экологическую обстановку в цехе; кроме того, при нагреве немагнитных металлов, это снимает проблему взаимного влияния близко расположенных индукторов при групповом нагреве одной крупногабаритной детали несколькими нагревателями, питающимися от независимых высокочастотных источников питания.



Рис. 6. Нагрев рабочего колеса ротора паровой турбины

Индуктор-лента может применяться и для нагрева деталей из магнитной стали, однако при нагреве рабочих колес паровых турбин (рис. 6) и других деталей сложной формы, изготовленных из магнитной стали, можно рекомендовать индуктор-провод, который в этих случаях имеет следующие преимущества перед индуктором лентой:

- универсальность, позволяющая нагревать различные по размерам и форме детали из магнитной стали одним и тем же индуктором без изменения параметров блока согласования;
- возможность согласования по напряжению с источником питания без применения высокочастотного трансформатора, что упрощает конструкцию и улучшает массо-объемные показатели блока согласования.

Кроме того, низкая добротность индуктора-провода при нагреве деталей из магнитной стали предотвращает

чрезмерную раскачку напряжения на индукторе и не создает проблем с изоляцией индуктора от поверхности детали, а проблема потенциальной развязки индуктора от сети для обеспечения безопасности персонала легко решается за счет конденсаторной развязки.

Индуктор-провод не может быть рекомендован к применению для нагрева деталей из немагнитных металлов, в частности бандажных колец роторов турбогенераторов, так как высокая добротность индукционной системы в этом случае приводит к раскачке напряжения на индукторе и возникновению высокочастотного разряда, не только опасного для обслуживающего персонала, но и способного вызвать за счет электрической эрозии повреждения поверхности бандажного кольца, которые при эксплуатации могут развиваться в трещины и привести к авариям с тяжелыми последствиями.

Список литературы

1. Кади-Оглы И.А., Кийло О.Л., Дзлиев С.В., Позняк И.В. Исследование нагрева бандажей роторов турбогенераторов высокочастотным индукционным методом. Электричество, 2003 г., №5. – с. 23-31.
2. Дзлиев С.В., Кади-Оглы И.А., Кийло О.Л. Гибкий индуктор для нагрева цилиндрических тел. Патент на изобретение №: 2251823, H05B, дата публикации: 10 мая 2005.
3. Дзлиев С.В. Источники питания индукционных нагревательных комплексов. – СПб.: изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2009. 214 с.
4. www.interm.su
5. Марочник сталей и сплавов. Под ред. Зубченко А.С. – М.: изд-во «МАШИНОСТРОЕНИЕ-1», 2003, 784 с.
6. Смирягин А.П. Промышленные цветные металлы и сплавы. – М.: «Металлургияиздат», 1956, 560 с.
7. Красновский Е.Е. Решение прикладных задач термомеханики с применением программного комплекса ANSYS. Методические указания – М.: изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008