



ИССЛЕДОВАНИЯ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ, РАСЧЕТЫ

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ РОТОРА ПАРОВОЙ ТУРБИНЫ В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ

Асп. Смирнов А.А.¹, к.т.н., доц. Голошумова В.Н.¹, д.т.н., проф. Бродов Ю.М.¹ (Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина)

АННОТАЦИЯ. Рассмотрены вопросы моделирования динамики процесса прогрева ротора паровой турбины. Физико-математической основой динамической модели, функционирующей в реальном времени, является решение задачи нестационарной теплопроводности методом конечных элементов. Представлены основные этапы разработки модели на примере ротора высокого давления турбины Т-110/120-130, оценена погрешность моделирования.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ротор паровой турбины, регулирующая ступень, режим пуска, нестационарная теплопроводность, модель реального времени, ANSYS, MATLAB, метод конечных элементов.

Вновь проектируемые и модернизируемые энергоблоки паротурбинных установок должны оснащаться системами АСУ ТП. На сегодняшний день уровень разработок в области автоматизации переходных режимов работы мощных энергетических паровых турбин, за редким исключением, ограничен созданием шаговых временных программ пуска, спроектированных по пусковым инструкциям или проводящих оценку текущего температурного состояния ротора турбины по одномерным математическим моделям [1 – 4].

Одномерная модель достаточно точно воспроизводит температурное поле в «критическом» сечении роторов – зоне промежуточных уплотнений внутреннего корпуса цилиндров с петлевой схемой движения пара в проточной части. Применение одномерной модели для роторов цилиндров с прямой схемой является не совсем адекватным [5].

В работе [6] приведен анализ результатов расчетов температурного и термонапряженного состояния ротора высокого давления (РВД) турбины Т-110/120-130 производства ЗАО «УТЗ» (далее по тексту Т-110). Показано, что практически на протяжении всего времени пуска (за исключением начального этапа) максимум температурных напряжений наблюдается не на обогреваемой внешней поверхности ротора, а на внутренней расточке под диском двухвенечной регулирующей ступени (РС). Установлено, что температурное поле ротора имеет существенно двухмерный характер, а под массивным диском РС расположено ярко выраженное так называемое «холодное пятно». На рис. 1 в качестве примера показаны изотермы, соответствующие моменту времени пуска через 20 мин после толчка ротора турбины. Зона максимальных температурных напряжений, ограниченная сечениями: первое – выход из диафрагменного уплотнения

2-ой ступени, второе – вход в переднее концевое уплотнение (ПКУ), фактически является критической зоной для РВД турбины Т-110.

В статье представлена методика разработки динамической модели двухмерного температурного поля критической зоны РВД Т-110. В качестве входной информации при формировании модели использованы непосредственно измеряемые параметры: частота вращения ротора, мощность турбины, температура свежего пара. Выходной информацией модели является температурное поле в критической зоне ротора, которое предполагается использовать для текущего контроля его состояния.

Авторами разработан подход, заключающийся в создании динамической модели критической зоны ротора, пригодной к использованию в реальном времени на ограниченных вычислительных ресурсах, физико-математической основой которой является решение осесимметричной задачи нестационарной теплопроводности методом конечных элементов (МКЭ). По сравнению с указанными выше методиками [1, 5, 6] данный подход, по мнению авторов, обладает следующими преимуществами:

- возможность моделирования с учетом реальной геометрии ротора турбины, теплофизических свойств материала в зависимости от температуры материала ротора, а также сложных граничных условий (ГУ) теплообмена;
- получение на выходе модели комплексной информации о температурном поле всего ротора;
- высокая степень автоматизации и унификации при проектировании моделей роторов турбин различных типоразмеров;
- относительная простота встраивания модели в существующие контуры АСУ ТП энергоблоков.

Авторами предлагается методика, включающая следующие этапы.

На первом этапе создается эталонная модель

¹ 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19

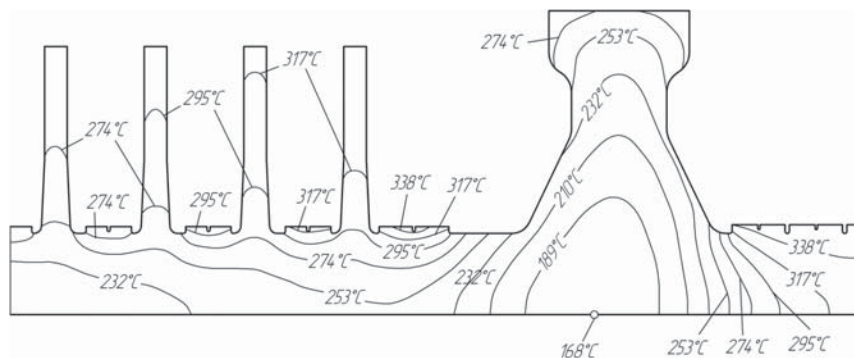


Рис. 1. Температурное поле ротора высокого давления турбины Т-110 при пуске из холодного состояния через 20 мин после толчка ротора.

для точного расчета. Для этого строится геометрическая модель ротора рассматриваемой турбины средствами САПР по чертежам завода-изготовителя и импортируется в используемый в данной работе программный комплекс ANSYS [7]. Строится подробная конечно-элементная модель путем генерации расчетной сетки из треугольных элементов типа PLANE77 (второй порядок аппроксимации). Начальные и граничные условия моделирования определяются предварительно из расчета турбины на переменные режимы работы. Коэффициенты теплоотдачи рассчитываются с использованием критериальных уравнений, приведенных в [8]. На втором этапе производится расчет температурных полей по графику пуска паровой турбины по подготовленной на предыдущем этапе эталонной модели. Полученное таким образом решение принимается за «точное». Анализ решения позволяет выделить из геометрической модели критическую зону так, что автономное моделирование этой зоны не вносит искажений в ее температурное поле по сравнению с полной моделью.

На третьем этапе путем оптимизации подробной конечно-элементной модели создается «рабочая» модель. Рабочая модель переводится в математическую форму записи (система обыкновенных дифференциальных уравнений). Вычисляются некоторые коэффициенты системы (для линейной модели – матрица массы и матрица жесткости).

На четвертом этапе на основании характеристик полученной рабочей модели, а также параметров реального времени, определяются минимальные технические требования к микропроцессорному устройству, производится выбор его, а также осуществляется подготовка рабочей модели для реализации на выбранном устройстве.

Геометрическая модель критической зоны РС турбины Т-110, а также соответствующие ГУ представлены на рис. 2. Ограничение критической зоны ротора в осевом направлении плоскостями, проходящими через первый отсек ПКУ и диафрагменное уплотнение второй ступени, подтверждено результатами расчетов. Показано, что тепловой поток в осевом направлении через ука-

занные плоскости (являющимися торцевыми плоскостями рабочей модели) практически отсутствует (изотермы параллельны оси ротора) на протяжении всего времени процесса пуска.

Как показано в [6], в процессе пуска из холодного состояния можно выделить два тепловых режима прогрева ротора – выраженный нестационарный (разворот ротора и взятие начальной нагрузки) и квазистационарный (набор мощности). Время выхода на квазистационарный тепловой режим

составляет 65 минут от толчка ротора. При этом оптимизацию характеристик конечно-элементной модели целесообразно проводить только на интервале времени, соответствующем нестационарному тепловому режиму. На квазистационарном тепловом режиме модель ротора становится слабо чувствительна к параметрам моделирования и погрешность относительно точного решения даже для сравнительно грубой модели оказывается пренебрежимо мала. Кроме того, на квазистационарном режиме прогрева ротора глобальная ошибка, накопленная при интегрировании нестационарного участка даже одношаговыми методами (например, методом Эйлера) нивелируется.

В качестве инструмента для реализации динамической модели был выбран программный пакет MATLAB [9]. Основным достоинством пакета является открытый, качественно документированный исходный код. Кроме того, можно отметить наличие мощного высокоуровневого языка математического программирования, а также возможность

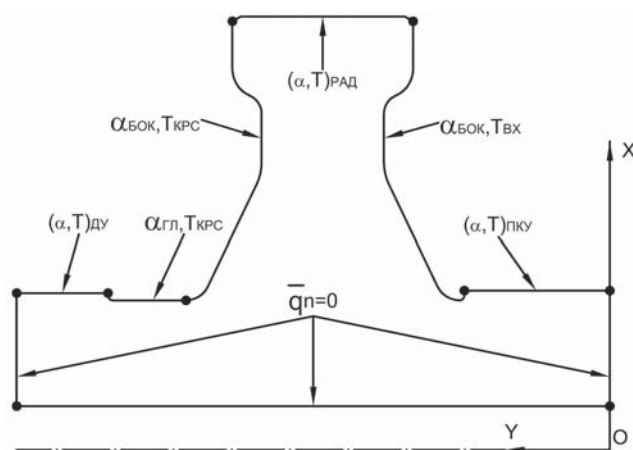


Рис. 2. Модель области РС турбины Т-110. Обозначения: $q_p = 0$ – идеально теплоизолированные поверхности, α, T – коэффициент теплоотдачи и температура пара соответственно. Индексами обозначены: ПКУ – первый отсек переднего концевое уплотнения, ВХ – вход пара в РС, БОК – боковая поверхность диска РС, РАД – радиальная поверхность диска РС, КРС – камера РС, ГЛ – гладкий участок вала в КРС, ДУ – диафрагменное уплотнение первой ступени давления.



генерации исходного кода на языке «С», что необходимо для последующей реализации модели. Наиболее существенными ограничениями реализации МКЭ в MATLAB являются использование только треугольной сетки с первым порядком аппроксимации, а также ограничение класса решаемых задач двумя пространственными измерениями, что, тем не менее, позволяет решать задачи в осесимметричной постановке, к которым относится и данная задача.

Для обмена данными между ANSYS и MATLAB в последнем были созданы программы, позволяющие импортировать в него расчетную сетку, а также узловые значения температуры, полученные в ANSYS.

Для проверки адекватности решения задач теплопроводности системой MATLAB проведен сравнительный анализ с комплексом ANSYS на известных задачах стационарной и нестационарной теплопроводности. Решение производилось на расчетных сетках, сгенерированных в ANSYS, в MATLAB, а также импортированных в MATLAB из ANSYS. По результатам проведенного анализа сделаны следующие выводы:

- Для задач стационарной и линейной нестационарной теплопроводности в двумерной постановке, решаемых на треугольных сетках, точность решения, полученного в программе MATLAB, соответствует точности решения в программе ANSYS.
- Генератор сетки MATLAB незначительно уступает генератору ANSYS как по качественным показателям сетки, так и по точности получаемых на ней результатов.

По результатам проведенного анализа было принято решение использовать в рабочей модели расчетную сетку, полученную в ANSYS.

Под оптимизацией конечно-элементной модели критической зоны турбины для работы в реальном времени авторами принят принцип ее минимизации (в отношении вычислительных ресурсов компьютера) при сохранении требуемой точности. В инженерной практике при расчете тепловых процессов допустимой считается погрешность порядка 10 – 15%. В процессе оптимизации модели были определены следующие основные параметры конечно-элементного анализа: плотность расчетной сетки, степень аппроксимации конечного элемента, возможность линеаризации модели. Кроме того, при моделировании в реальном времени важнейшим параметром, определяющим выбор вычислительного устройства, является максимальный допустимый шаг моделирования по времени.

Для оценки влияния различных параметров анализа МКЭ, представленная выше модель сформирована в программном комплексе ANSYS с условиями, соответствующими процессу пуска из холодного состояния турбины Т-110.

В ANSYS созданы две модели материала: первая модель с постоянными свойствами (усреднен-

ными по рабочему диапазону температур металла ротора) и вторая модель – со свойствами, зависящими от рабочих температур.

Поскольку реализация МКЭ в MATLAB позволяет оперировать только элементами треугольной формы, в комплексе ANSYS использованы соответствующие редуцированные элементы PLANE55 с первым порядком аппроксимации и PLANE77 со вторым порядком аппроксимации.

Размер сетки варьировался путем применения последовательных операций измельчения (*refinement*) элементов до достижения нечувствительности решения к данному параметру.

Шаг по времени в ANSYS задавался двумя способами. В первом случае использовались шаги нагружения (*load steps*) с автоматическим выбором шага по времени в интервале от 5 с до 6 мин на каждом шаге нагружения. Во втором случае решение было получено с постоянным шагом по времени, величина которого варьировалась до достижения требуемой точности.

Необходимо отметить, что «точное» решение получено с использованием постоянного шага по времени, равного 5 с, тогда как наибольшая погрешность решения, полученного с автоматическим выбором шага, составила 7% или 17°C.

При анализе полученных результатов возникала необходимость сравнения двух узловых решений, полученных в общем случае на различных пространственной и временной сетках. Для приведения узловых решений к другой временной сетке реализован алгоритм, основанный на применении линейной интерполяции. Сравнение решений, полученных на различных пространственных сетках, ввиду достаточной гладкости поля температуры ротора производилось в 17 характерных точках геометрической модели.

По результатам сравнения можно сделать следующие основные выводы относительно рассматриваемой задачи (приведенные значения получены для нестационарного режима прогрева ротора):

- Погрешность, вносимая применением упрощенной модели материала с независимыми от температуры свойствами, не превышает 5% или 9°C.
- Погрешность, определяемая понижением порядка аппроксимации (применением элемента PLANE55) не превышает 5% или 12°C.
- Значительное влияние на точность определения температурного поля оказывает плотность расчетной сетки. Сетка, полученная применением одной операции измельчения (1919 узлов, 3576 элементов), характеризуется погрешностью решения 5% или 9°C. Решение, полученное на начальной сетке, без последующего измельчения (513 узлов, 894 элементов) отличается от точного на 10% или 18°C.
- Погрешности, вносимые несколькими перечисленными выше факторами в решение данной



задачи, не обладают свойством аддитивности. То есть, решение, полученное на наиболее грубой из рассмотренных моделей (постоянные свойства материала, элемент типа PLANE55, начальная расчетная сетка), отличается от точного не более чем на 10% или 16°C.

• В связи со значительной инерционностью тепловых процессов в массивном роторе турбины Т-110 имеется возможность выбирать относительно большие величины шага интегрирования по времени. При выборе шага постоянным и равным 15 с, полученное решение отличалось от точного не более чем на 1,7% или 2°C.

По результатам выполненного анализа в качестве оптимальной конфигурации выбрана модель, обладающая следующими характеристиками: постоянные свойства материала, первый порядок аппроксимации элемента, расчетная сетка, полученная одной операцией измельчения (4234 узлов, 8072 элементов). Для достижения требуемой точности достаточно интегрирования с постоянным шагом по времени, равным 15 с. Погрешность решения, полученного на данной модели, не превышает 5%, или 12°C, что является допустимым значением.

В рамках исследования в системе MATLAB проведено имитационное моделирование полученной рабочей модели. Расчетная сетка генерирована и экспортирована из ANSYS. Поскольку рабочая модель является линейной, интегрирование задачи по времени производилось одношаговым методом по схеме Кранка-Николсона (второй порядок точности) с постоянным шагом, равным 15 с.

При моделировании на персональном компьютере (процессор Intel Pentium 4 2,8 ГГц, 2048 МБ ОЗУ) в системе MATLAB максимальное время, затрачиваемое на расчет одного шага решения, составило 0,7 с. При этом следует учитывать «накладные расходы» процессорного времени, связанные с работой операционной системы в многозадачном режиме, а также работу системы MATLAB в режиме интерпретации кода. При реализации данной модели на микроконтроллере подобные расходы будут отсутствовать.

Выводы

Разработана и апробирована динамическая модель двухмерного температурного поля критической зоны ротора высокого давления паровой турбины Т-110/120-130, физико-математической основой которой является решение осесимметричной задачи нестационарной теплопроводности с помощью МКЭ.

Созданная динамическая модель критической зоны ротора рекомендуется к использованию в реальном времени на ограниченных вычислительных ресурсах. Погрешность, обусловленная применением МКЭ как физико-математической основы данной модели, составляет 5%.

Литература

1. Похорилер В. Л., Макаров И.Н. Виртуальная аналоговая модель прогрева ротора паровой турбины для АСУ ТП энергоблоков. // Совершенствование турбин и турбинного оборудования: Региональный сборник научных статей. Екатеринбург, УГТУ, 2000. 436 с.
2. Автоматизация пуска турбины К-500-240-2 / В.Б. Кацнельсон, В.Л. Похорилер, А.М. Маркова и др. // Теплоэнергетика. 1977. № 10, с. 11-19.
3. Автоматизация пуска блока 800 МВт / В. Л. Похорилер, В. Б. Кацнельсон, В. М. Кременчугский и др. // Электрические станции. 1982. № 10, с. 32-37.
4. Лейзерович А.Ш. Технологические основы автоматизации пусков паровых турбин. М.: Энергоатомиздат, 1983. 176 с.
5. Култышев А.Ю., Похорилер В.Л., Голошумова В.Н. Обеспечение надежности пуска паровой турбины при помощи двухмерной модели прогрева высокотемпературного ротора. // Надежность и безопасность энергетики. 2008, № 2, с. 51-55.
6. Ивановский А.А., Похорилер В.Л., Голошумова В.Н. Исследование термонапряженного состояния ротора паровой турбины Т-110/120-130. // Энергетические машины и установки. 2008, № 3, с. 20 – 25.
7. Техноцентр компьютерного инжиниринга Уральского федерального университета. URL: <http://cae.ustu.ru/>
8. РТМ 108.020.16–83. Расчет температурных полей роторов и корпусов паровых турбин. Л.: НПО ЦКТИ, 1985.
9. Консультационный центр MATLAB компании Softline URL: <http://matlab.exponenta.ru/>

