

ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ РЕЖИМНЫХ КАРТ ТУРБИННЫХ УСТАНОВОК ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

NUMERICAL METHODS OF MODELING OF MODE MAPS OF TURBINE UNITS OF THERMAL POWER PLANTS

**S. Olimpiev
A. Neklyudov**

Summary. Purpose: This work is devoted to the development and study of an algorithm for numerical simulation of mode maps of turbine units of thermal power plants. The aim of the study is to create an algorithm that allows simulating the process of mode map operation and determining the sharp steam flow rate based on numerical methods. *Methods:* Numerical methods of interpolation and extrapolation are applied for approximation of characteristic dependencies presented in the mode map. This provides the possibility of determining parameter values at arbitrary points in the domain of definition, including extrapolation beyond known discrete values. *Results:* The results of using, the proposed algorithm, demonstrate minimal deviations of the initial and calculated values of the parameter under study. *Conclusions of the study:* An effective approach for numerical modeling of mode maps of turbine plants is proposed. The approach can be applied for analysis and optimization of turbine operation modes at thermal power plants.

Keywords: mode maps, modeling, interpolation, extrapolation, turbine, thermal power plants.

Олимпиев Сергей Александрович

Аспирант, Национальный исследовательский
университет, Московский Энергетический Институт
OlimpiyevSA@mpei.ru

Неклюдов Алексей Васильевич

кандидат технических наук, доцент,
Национальный исследовательский университет,
Московский Энергетический Институт
NeklyudovAIV@mpei.ru

Аннотация. Цель: Данная работа посвящена разработке и исследованию алгоритма численного моделирования режимных карт турбинных установок тепловых электростанций. Цель исследования состоит в создании алгоритма, позволяющего имитировать процесс работы с режимной картой и определять расход острого пара на основе численных методов. *Методы:* применяются численные методы интерполяции и экстраполяции для аппроксимации характеристических зависимостей, представленных в режимной карте. Это обеспечивает возможность определения значений параметров в произвольных точках области определения, включая экстраполяцию за пределы известных дискретных значений. *Результаты:* Результаты использования, предложенного алгоритма, демонстрируют минимальные отклонения исходных и рассчитанных значений исследуемого параметра. *Выводы исследования:* Предложен эффективный подход для численного моделирования режимных карт турбинных установок. Подход может быть применен для анализа и оптимизации режимов работы турбины на тепловых электростанциях.

Ключевые слова: режимные карты, моделирование, интерполяция, экстраполяция, турбина, тепловые электростанции.

Надежная и эффективная эксплуатация турбинных установок тепловых электростанций требует точного знания рабочих характеристик различных режимов работы турбины [1]. Ключевым инструментом, обеспечивающим информацию о режимах работы, являются режимные карты или диаграммы режимов работы турбинных установок.

Режимная карта представляет собой графическое отображение взаимосвязи основных параметров турбины в различных режимах работы. Такие карты используются для оптимизации режимов работы турбины, контроля текущего состояния и выявления отклонений от нормальных режимов, оценки эффективности работы турбинной установки, а также прогнозирования изменений ее работы, обеспечивая комплексный анализ рабочих характеристик [1].

Традиционно работа с режимными картами осуществляется визуально, что ограничивает возможно-

сти анализа и оптимизации режимов работы турбинных установок. Численное моделирование режимных карт позволяет автоматизировать процесс определения параметров работы турбины, проводить анализ больших объемов данных с высокой точностью и скоростью, создавать модели, учитывающие влияние различных факторов на работу турбины, а также оптимизировать режимы работы турбинной установки в реальном времени, что в совокупности ведет к повышению эффективности и надежности работы тепловых электростанций [2].

В рамках численного моделирования характеристик турбинных установок, основанного на использовании данных в виде графических поверхностей, возникает необходимость преобразования графических зависимостей в наборы дискретных численных значений. Для эффективной работы с такими наборами, характеризующими графические поверхности, был разработан метод формирования интерполяционных кривых, предназна-

ченный для создания и добавления интерполяционных функций в структурированный словарь.

Структура словаря представляет собой набор пар ключ-значение, где ключом выступает наименование характеристической поверхности, а значением — соответствующая интерполяционная функция. При работе с оцифрованной режимной картой, представленной в виде числовых данных, метод автоматически определяет размерность входного набора значений для выбора соответствующего типа интерполятора. В случае одномерного набора данных формируется одномерный интерполятор, а при наличии многомерного набора данных — многомерный интерполятор.

Интерполятор представляет собой математический объект, реализующий аппроксимацию значений функции в произвольных точках области определения на основе ее известных дискретных значений. Для одномерных данных используется метод линейной интерполяции. В рамках этого метода определяется интервал, ограниченный двумя опорными точками, содержащий целевую точку. На основе значений функции в опорных точках вычисляются весовые коэффициенты, отражающие их относительное влияние на значение в целевой точке. Итоговое значение функции в целевой точке получается путем линейной аппроксимации значений функции в опорных точках с использованием полученных весовых коэффициентов [8].

Для многомерных наборов данных применяется триангуляция Делоне, заключающаяся в разбиении пространства на симплексы, соответствующие размерности данных: треугольники для двумерных данных, тетраэдры для трехмерных, и n-мерные симплексы для n-мерных данных. Оценка значений функции в произвольной точке, расположенной внутри симплекса, также осуществляется с использованием линейной интерполяции. При этом искомое значение аппроксимируется как линейная зависимость значений функции в вершинах симплекса с весовыми коэффициентами, определяемыми барицентрическими координатами целевой точки относительно симплекса [7].

Для вычисления значений, выходящих за пределы области интерполяции, применяется метод экстраполяции, позволяющий интерполятору использовать линейную интерполяцию в области за пределами известных дискретных значений.

Таким образом, разработанный метод формирования кривых инкапсулирует логику создания интерполяционных функций, автоматически определяя тип интерполяции в зависимости от размерности входных данных. Создаваемые интерполяторы обеспечивают возможность вычисления значений функции в произвольных точках области определения, включая их экстраполяцию за пределы области интерполяции, обеспечивая необходимую гибкость при работе с режимными картами.

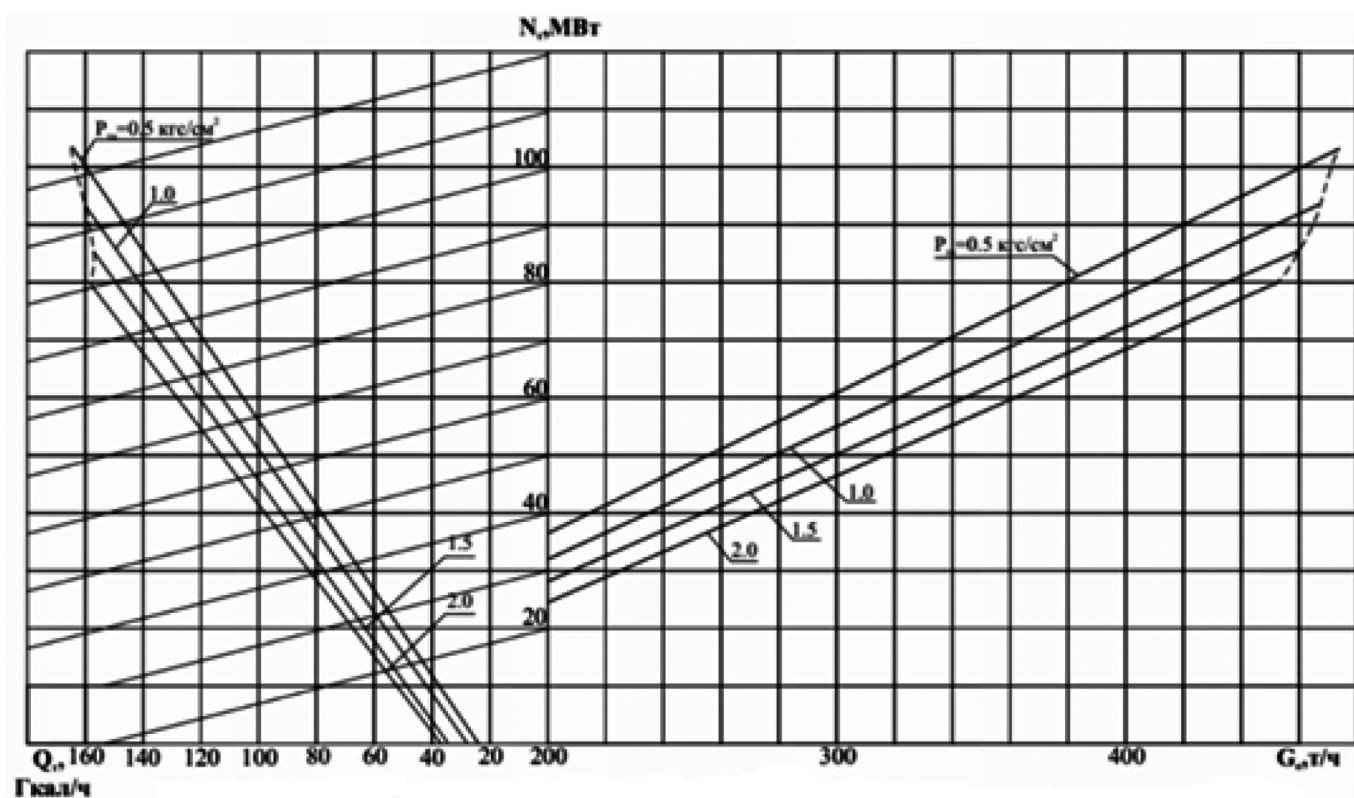


Рис. 1. Диаграмма режимов работы теплофикационной турбины при одноступенчатом подогреве сетевой воды

С использованием численных методов активно ведутся научные исследования для определения статических характеристик нагрузок в узлах систем электроснабжения. В рамках этих исследований применяются методы интерполяции и экстраполяции для построения статических характеристик активной и реактивной мощности в узлах систем электроснабжения 6 кВ [3]. Помимо этого, проводятся исследования в разработке методов оценки вероятности отказа элементов систем атомных электростанций. В основе этих исследований также лежит численный метод интерполяции [4].

В рамках данного исследования рассматривалась диаграмма режимов работы теплофикационной турбины при одноступенчатом подогреве сетевой воды, представленной на рисунке 1.

Для имитации процесса определения расхода острого пара G_o на основе режимной карты турбинной установки разработан алгоритм, включающий последовательность взаимосвязанных этапов. Этот алгоритм призван воспроизвести процедуру определения параметров работы турбины, используя графическую информацию, представленную на режимной карте, в виде набора цифровых данных.

На первом этапе алгоритма производится фильтрация исходных значений давления в нижнем тепловом отборе $P_{нто}$ в соответствии с ограничениями, накладываемыми диаграммой режимов работы. Значения $P_{нто}$ должны находиться в диапазоне от 0,5 до 2 кгс/см². Далее вычисляется первое приближение значения электрической нагрузки N с учетом коэффициента пропорциональности, отражающего угол наклона линий на диаграмме режимов работы.

После этого определяется интерполяционным значение теплового отбора Q_t с использованием разработан-

ного метода формирования интерполяционных кривых. Интерполятор моделирует зависимость теплового отбора пара Q_t от давления в нижнем тепловом отборе $P_{нто}$ и электрической мощности N . Этот этап соответствует процессу интерполяции левой части режимной карты, позволяя определить значение теплового отбора при заданных значениях давления и электрической мощности, даже если эти значения не представлены на самой карте в виде точек. Вследствие наличия двух независимых переменных, интерполяция выполняется в двумерном пространстве. Далее производится повторный расчет значений мощности N на основе интерполированных значений теплового отбора Q_t и коэффициента пропорциональности, характеризующего угол наклона линий на диаграмме. Эта итерация необходима для уточнения значения электрической нагрузки, согласовав его с интерполированным значением теплового отбора согласно представленным на режимной карте зависимостям.

Завершающий этапом является определение расхода острого пара G_o с помощью интерполяции по правой части режимной карты. В качестве входных данных используются исходное значение давления в нижнем тепловом отборе $P_{нто}$ и скорректированное значение электрической мощности N . Интерполяция выполняется в двумерном пространстве.

В завершении представленного исследования строится графическая зависимость исходного и рассчитанного расхода острого пара D_o с учетом поправок на отклонение параметров от номинального режима работы турбины.

Анализ графической поверхности показывает хорошее соответствие общей динамики изменения рассчитанных значений расхода острого пара, представленных оранжевой линией, с исходными значениями, представленных синей линией. Это свидетельствует о том,

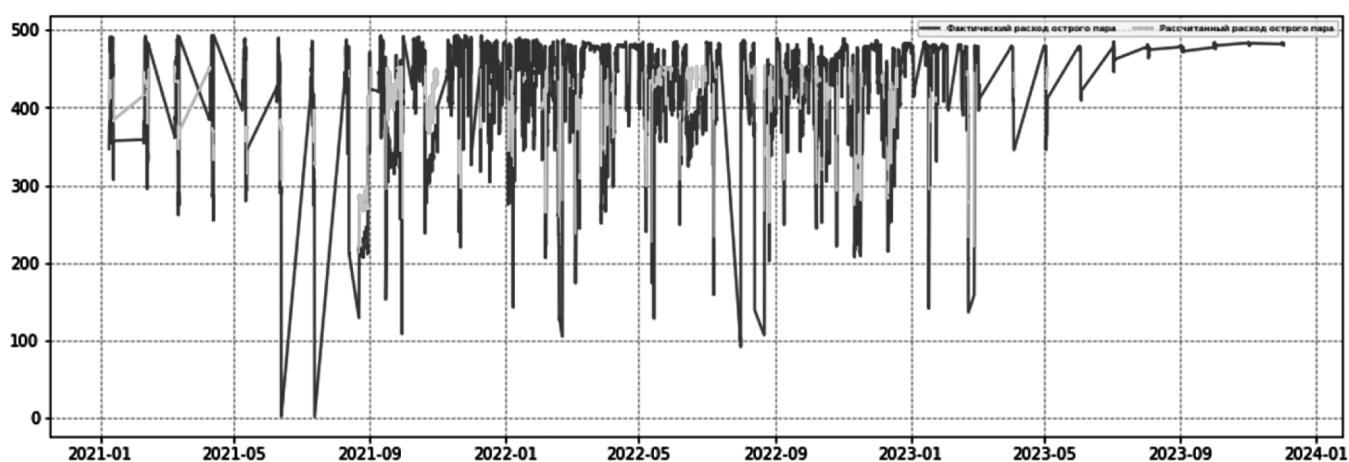


Рис. 2. Графическая зависимость фактических и рассчитанных значений расхода острого пара D_o с учетом поправок на отклонение от номинального режима работы турбины

что разработанный алгоритм успешно воспроизводит основные закономерности изменения расхода острого пара в зависимости от различных факторов. На большей части временного интервала рассчитанные значения достаточно близко соответствуют фактическим.

Предложенный алгоритм представляет собой эффективный инструмент для имитации работы с режимной картой и определения расхода острого пара турбины. Полученные результаты свидетельствуют о применимости разработанного подхода для анализа режимов работы турбины.

В данном исследовании был представлен алгоритм, имитирующий процесс работы с режимной картой, используя разработанный метод формирования интерполяционных кривых, для определения ключевых параметров работы турбинной установки. Разработанный метод обеспечивает возможность получения значений параметров, не представленных явно на режимной карте, путем интерполяции или экстраполяции, приближая численный расчет к визуальной работе с графическими данными режимной карты.

ЛИТЕРАТУРА

1. Андрияшин А.В. Решение задачи оптимизации режимов работы комбинированных теплоэнергетических систем в зависимости от выбранного метода / А.В. Андрияшин, Э.К. Аракелян, А.В. Неклюдов, Н.С. Долбикова, Ю.Ю. Ягупова // Киберфизические системы: моделирование и промышленное применение. 2022. С. 107–115.
2. Аракелян Э.К. Методические основы оптимального распределения нагрузки на тепловой электростанции со сложным составом оборудования с учетом требований рынка / Э.К. Аракелян, А.В. Андрияшин, А.В. Неклюдов, Ю.Ю. Ягупова, С.В. Мезин // Журнал «Физика»: Серия конференций. 2021.
3. Бигун А.Я. Экспериментальное определение статических характеристик нагрузок в узлах системы электроснабжения 6 кВ / А.Я. Бигун, Л.В. Владимиров // Вестник ЮГУ. 2023. №2. С. 112–120.
4. Горюнов О.В. Интерполяционный метод оценки вероятности отказа при сложном нагружении / О.В. Горюнов, Н.Н. Куриков, К.А. Егоров // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. 2023. №1. С. 42–52.
5. Исмоилова М.Н. Интерполяция функции / М.Н. Исмоилова, Ш.М. Имомова // Вестник науки и образования. 2020. №3–3. С. 5–8.
6. Кивчун О.Р. Методика режимного нормирования электропотребления объектов регионального электротехнического комплекса в условиях ресурсных ограничений / О.Р. Кивчун, Д.Г. Морозов // Известия ТулГУ. Технические науки. 2023. №11. С. 157–163.
7. Конопацкий Е.В. Геометрическая теория многомерной интерполяции // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. 2020. №1. С. 9–16.
8. Кривошеев А.С. Интерполяция и фундаментальный принцип / А.С. Кривошеев, О.А. Кривошеева // УМЖ. 2024. №3. С. 58–68.
9. Радин Ю.А. Влияние отклонений параметров в процессе пуска на термонапряженное состояние оборудования ТЭС / Ю.А. Радин, Т.С. Конторович, В.У. Мнацаканян // Вестник РУДН. Серия: Инженерные исследования. 2023. №2. С. 135–143.
10. Торопов Е.В. Цифровая модель теплового баланса котла / Е.В. Торопов, Л.Е. Лымбина // Вестник ЮУрГУ. Серия: Энергетика. 2021. №3. С. 14–23.

© Олимпиев Сергей Александрович (OlimpiyevSA@mpei.ru); Неклюдов Алексей Васильевич (NekliudovAlV@mpei.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»