Министерство образования и науки Российской Федерации

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Институт компьютерных наук и кибербезопасности

Высшая школа управления киберфизическими системами

|  |
| --- |
|  |

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА БАКАЛАВРА**

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЛИЧЕТСВА РАБОТАЮЩИХ ГОРЕЛОК ПО РАСХОДУ МАЗУТА И ИЗМЕНЕНИЯ ИХ КОЛИЧЕСТВА ПРИ ИЗМЕНЕНИ ДАВЛЕНИЯ МАЗУТА**

направление 27.03.04 – Управление в технических системах

профиль 27.03.04\_05 - Интеллектуальные системы обработки информации и

управления

|  |  |
| --- | --- |
| Выполнил  студент гр. 5132704/00501  Руководитель  к.т.н, доцент | А. В. Александров  В. Н. Хохловский |

Санкт-Петербург

2024

**Введение**

В современной промышленной эксплуатации одной из критически важных задач является контроль за работой технологических устройств, в частности, горелочных устройств, использующих мазут в качестве топлива.

Определение количества работающих горелок котлоагрегата является важной задачей для обеспечения эффективной работы тепловой установки. Горелки играют ключевую роль в процессе сжигания топлива и преобразования энергии в тепло, которое затем передается носителю тепла. Правильное определение количества работающих горелок напрямую влияет на эффективность и безопасность работы котельной.

**Целью данной бакалаврской работы** является разработка программного решения, которое позволит определять количество работающих горелок на основе анализа паропроизводительности, расхода и давлении мазута. Внедрение такой системы способно значительно повысить контроль за процессом сжигания мазута, что, в свою очередь, позволит не только экономить топливо, но и повысить общую безопасность работы оборудования.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения эффективности производственных процессов и минимизации человеческого фактора в контроле за критически важными параметрами работы оборудования. Разработка такой программы дает возможность операторам получать достоверную информацию о состоянии горелок, что способствует более точной настройке процессов и уменьшению времени реагирования на аварийные ситуации.

# 1 Общие положения об АСУ ТП и работе котлоагрегатов

АСУ ТП - это система, состоящая из персонала и совокупности оборудования с программным обеспечением, использующихся для автоматизации функций этого самого персонала по управлению промышленными объектами: электростанциями, котельными, насосными, водоочистными сооружениями, пищевыми, химическими, металлургическими заводами, нефтегазовыми объектами и т.д.

В данной главе будут рассмотрены общие положения о котлоагрегатах и режимных картах, на основе которых в котлоагрегатах выставляют оптимальные параметры работы.

## Общие положения о котлоагрегатах и принципе их работы

Котельная – здание (в том числе блок-модульного типа) или комплекс зданий и сооружений с котельными установками и вспомогательным технологическим оборудованием, предназначенных для выработки тепловой энергии.

Котельная установка – котел (котлоагрегат) совместно с горелочными, топочными тягодутьевыми устройствами, механизмами для удаления продуктов горения и использования тепловой энергии уходящего мазута (газа) и оснащенный.

Принцип действия котлов на мазуте следующий:

1. Подача топлива в форсунку под давлением, в данном случае мазут
2. Распыление жидкого топлива на выходе с образованием мелких частиц
3. Частицы растворяются, смешиваются с воздухом и образуют горючую смесь
4. Тепло и горячий выхлоп нагревают воду в котловом баке
5. Циркуляционный насос перемешает разогретую воду по контуру

## Преимущества и недостатки мазута

Существенный недостаток мазута — его сильный неприятный запах. Соответственно, от котельной установки тоже может пахнуть, что не слишком удобно для частного домовладения или жилого комплекса. Оно не слишком экологически чисто, особенно по сравнению с газом или биотопливом, и нуждается в серьёзном запасе мазута — то есть, в отдельной крупной ёмкости для хранения. Периодически все системы загрязняются, и их нужно чистить.

Преимущества:

* Повсеместная доступность мазута — это очень распространённое топливо
* Сравнительно высокая пожарная безопасность
* Отсутствие необходимости готовить многочисленные разрешения
* Независимость от централизованных магистралей
* Жидкий мазут недорог, он не растёт в цене так быстро, как дизтопливо. Его легко найти и закупить.

## Режимные карты и их роли в эксплуатации котлоагрегатов

Режимная карта является важным инструментом в управлении и эксплуатации котлоагрегатов на тепловых электростанциях и в других промышленных установках. Это документ, составляемый организацией-подрядчиком по завершению пуско-наладочных и режимно-наладочных работ. Каждый котел должен иметь заполненную режимную карту и эксплуатироваться согласно ей.

Роль режимной карты в работе котлоагрегата:

1. Определение рабочих параметров: режимная карта устанавливает основные параметры работы котла, такие как давление, температура, скорость потока теплоносителя и другие критически важные показатели. Эти параметры определяются на основе проектных характеристик агрегата и его эксплуатационных возможностей.
2. Обеспечение безопасности: Режимная карта помогает контролировать условия работы котлоагрегата таким образом, чтобы предотвратить аварийные ситуации. Она указывает на допустимые границы изменения параметров, выход за которые может привести к сбоям или несчастным случаям.
3. Оптимизация процессов: Использование режимных карт позволяет оптимизировать процесс сгорания топлива, повышать тепловую эффективность и уменьшать потребление топлива и выбросы вредных веществ.
4. Контроль и мониторинг: Режимная карта используется операторами и инженерами для мониторинга текущих условий работы котлоагрегата и его соответствия установленным нормам. Это позволяет своевременно выявлять отклонения и принимать меры для их корректировки.

Пример содержания режимной карты:

1. Основные параметры работы: давление пара, температура пара, уровень воды в барабане.
2. Режимы работы: номинальный, пониженный, повышенный.
3. Лимиты и предупреждения: максимально и минимально допустимые значения параметров.
4. Инструкции по регулировке: как реагировать на изменение параметров, в том числе настройки контрольно-измерительных приборов и автоматики.

В зависимости от типа и мощности котлоагрегата, а также от специфики производственного процесса, содержание режимной карты может значительно различаться, однако её основная цель — обеспечение безопасной, эффективной и стабильной работы остаётся неизменной.

## 1.4 Виды горелок и их особенности

Горелки, используемые в котлоагрегатах, могут различаться по конструкции, принципу действия и типу используемого топлива. В зависимости от этих факторов, горелки можно классифицировать следующим образом:

1. По типу топлива:

- Мазутные горелки: предназначены для сжигания жидкого топлива, такого как мазут. Они оснащены форсунками для распыления топлива и создания горючей смеси.

- Газовые горелки: работают на природном газе или сжиженном углеводородном газе. Они обеспечивают более чистое сгорание и меньшие выбросы вредных веществ.

- Комбинированные горелки: могут работать как на жидком, так и на газообразном топливе, что позволяет гибко переключаться между различными видами топлива в зависимости от их доступности и стоимости.

2. По конструкции:

- Одноступенчатые горелки: имеют одну ступень регулирования мощности и работают либо на полной мощности, либо выключены.

- Двухступенчатые горелки: позволяют регулировать мощность в двух ступенях, что обеспечивает более гибкое управление процессом сгорания.

- Модулируемые горелки: обеспечивают плавное регулирование мощности в широком диапазоне, что позволяет точно поддерживать заданные параметры работы котлоагрегата.

## 1.5 Определение количества работающих горелок

Количество работающих горелок в котлоагрегате напрямую зависит от текущего расхода мазута и требуемой тепловой мощности. Для определения оптимального количества работающих горелок необходимо учитывать следующие факторы:

1. Тепловая нагрузка: Зависит от текущих потребностей в тепловой энергии. В периоды пиковых нагрузок может потребоваться задействование всех доступных горелок, тогда как в периоды низкой нагрузки часть горелок может быть отключена.

2. Расход мазута: Чем выше расход мазута, тем больше горелок должно быть задействовано для обеспечения необходимой тепловой мощности.

3. Давление мазута: Важный параметр, влияющий на эффективность работы горелок. При изменении давления мазута необходимо корректировать количество работающих горелок для поддержания стабильного процесса сгорания.

## 1.6 Влияние изменения мазута на работу горелок

Изменение давления мазута оказывает значительное влияние на работу горелок и эффективность процесса сгорания. Рассмотрим основные аспекты этого влияния:

1. Снижение давления мазута:

- Уменьшение распыления: При снижении давления мазута ухудшается распыление топлива, что приводит к образованию крупных капель и снижению эффективности сгорания.

- Необходимость увеличения количества горелок: Для компенсации снижения эффективности сгорания может потребоваться увеличение количества работающих горелок.

2. Повышение давления мазута:

- Улучшение распыления: Повышение давления мазута способствует более тонкому распылению топлива, что улучшает процесс сгорания и повышает тепловую эффективность.

- Снижение количества горелок: При повышении давления мазута можно сократить количество работающих горелок без ущерба для тепловой мощности котлоагрегата.

# Общие сведения о математических методах

В рамках данной бакалаврской работы используются аппроксимация, интерполяция, метод «скользящего окна» и кластеризация.

## 2.1. Нахождение промежуточных значений на основе известных значений (интерполяция)

Интерполяция — это метод математического анализа, используемый для нахождения промежуточных значений функции на основе известных значений. Проще говоря, интерполяция позволяет предсказать значения функции в точках, которые находятся между известными значениями. Этот метод широко используется в различных областях, таких как обработка сигналов, численные методы, компьютерная графика и многие другие.

Существует несколько методов интерполяции, каждый из которых имеет свои преимущества и недостатки. Вот некоторые из наиболее распространенных методов:

1. Линейная интерполяция:

- Самый простой и широко используемый метод.

- Предполагает, что промежуточные значения лежат на прямой линии, соединяющей два известных значения.

2. Полиномиальная интерполяция:

- Использует полиномы для нахождения промежуточных значений.

- Более точная, чем линейная интерполяция, но может быть подвержена эффекту Рунге (осцилляции) при использовании высоких степеней полиномов.

3. Сплайн-интерполяция:

- Использует кусочно-полиномиальные функции (сплайны) для интерполяции.

- Наиболее распространенный тип — кубические сплайны.

- Обеспечивает гладкость и непрерывность первой и второй производных.

4. Интерполяция методом ближайшего соседа:

- Самый простой метод, при котором значение в неизвестной точке принимается равным значению ближайшей известной точки.

- Подходит для дискретных данных, но не обеспечивает гладкости.

5. Интерполяция методом Лагранжа:

- Использует полиномы Лагранжа для нахождения промежуточных значений.

- Подходит для небольшого количества точек, так как вычислительная сложность растет с увеличением числа точек.

Определение оптимального подхода в сглаживания исходных графиков

## 2.2. Нахождение приближенных значений функции (аппроксимация)

Аппроксимация — это метод математического анализа, используемый для нахождения приближенных значений функции или данных на основе известных значений. В отличие от интерполяции, которая стремится точно восстановить промежуточные значения, аппроксимация направлена на нахождение функции, которая наилучшим образом описывает набор данных или поведение системы. Аппроксимация широко используется в численных методах, машинном обучении, обработке сигналов и других областях.

Существует несколько методов аппроксимации, каждый из которых имеет свои преимущества и недостатки. Вот некоторые из наиболее распространенных методов:

1. Линейная аппроксимация:

- Самый простой метод аппроксимации.

- Использует линейную функцию для приближения данных.

2. Полиномиальная аппроксимация:

- Использует полиномы для приближения данных.

- Более гибкая, чем линейная аппроксимация, так как позволяет учитывать нелинейные зависимости.

3. Аппроксимация сплайнами:

- Использует кусочно-полиномиальные функции (сплайны) для аппроксимации данных.

- Наиболее распространенный тип — кубические сплайны.

- Обеспечивает гладкость и непрерывность первой и второй производных.

4. Экспоненциальная аппроксимация:

- Использует экспоненциальные функции для приближения данных.

- Подходит для данных, которые демонстрируют экспоненциальный рост или спад.

5. Аппроксимация методом наименьших квадратов:

- Общий метод, используемый для нахождения коэффициентов аппроксимирующей функции.

- Минимизирует сумму квадратов отклонений между аппроксимирующей функцией и данными.

Почему используется аппроксимация?

Аппроксимация является важным инструментом в математическом анализе и численных методах. Вот несколько причин, почему она часто используется:

1. Упрощение сложных функций:

- Аппроксимация позволяет заменить сложные функции более простыми, что облегчает их анализ и вычисления.

- Например, сложные нелинейные функции могут быть аппроксимированы полиномами или линейными функциями.

2. Обработка шумных данных:

- В реальных данных часто присутствует шум, который затрудняет анализ.

- Аппроксимация позволяет сгладить данные и выделить основные тенденции.

3. Прогнозирование и экстраполяция:

- Аппроксимация используется для прогнозирования значений функции за пределами известных данных.

- Например, в экономике и финансах аппроксимация используется для прогнозирования будущих значений на основе исторических данных.

4. Оптимизация и моделирование:

- Аппроксимация играет важную роль в оптимизации и моделировании сложных систем.

- Например, в инженерии аппроксимация используется для моделирования физических процессов и оптимизации конструкций.

## Метод «скользящего среднего»

Метод «скользящего среднего» (Simple Moving Average, SMA) — это статистический инструмент, используемый для анализа временных рядов путём создания серии средних значений из различных подмножеств полного набора данных. Суть метода заключается в вычислении среднего значения набора данных за определенный период времени, который "скользит" по мере добавления новых данных. Этот метод широко применяется в финансах, экономике, метеорологии и инженерии для сглаживания краткосрочных колебаний и выделения долгосрочных тенденций из временных рядов.

Формула простого скользящего среднего для точки :

где ​ — текущее значение, а n — количество точек с каждой стороны от текущей.

Преимущества

1. Уменьшение шума: Скользящее среднее помогает уменьшить "шум" в данных, вызванный случайными колебаниями, и облегчает восприятие основных тенденций и моделей.
2. Простота и понятность: Метод скользящей средней прост в реализации и интерпретации, что делает его доступным для широкого круга пользователей, не обладающих специальными техническими знаниями.

Недостатки

1. Фазовое запаздывание: Из-за особенностей расчёта скользящие средние отстают от текущих значений, особенно при больших размерах окон.
2. Потеря данных на краях: На начале и конце временных рядов скользящее среднее не может быть рассчитано для всех точек из-за отсутствия достаточного количества предшествующих или последующих данных.
3. Неадаптивность: Скользящее среднее не адаптируется к изменениям в поведении данных, что может быть критично в случаях, когда в данных присутствуют важные экономические или финансовые события.

## 2.4. Кластеризация

Кластеризация — это метод анализа данных, который используется для группировки объектов в кластеры, так чтобы объекты внутри одного кластера были более похожи друг на друга, чем на объекты из других кластеров. Это один из ключевых методов машинного обучения и анализа данных, который находит широкое применение в различных областях, таких как маркетинг, биоинформатика, обработка изображений и многие другие.

Основные методы кластеризации

1. K-means:

- Один из самых популярных методов кластеризации.

- Алгоритм делит данные на \(k\) кластеров, минимизируя сумму квадратов расстояний между объектами и центроидами кластеров.

- Требует заранее заданного числа кластеров \(k\).

2. Иерархическая кластеризация:

- Делится на агломеративную (снизу вверх) и дивизивную (сверху вниз).

- В агломеративной кластеризации каждый объект начинается как отдельный кластер, и кластеры последовательно объединяются.

- В дивизивной кластеризации все объекты начинаются в одном кластере, который затем последовательно делится.

3. DBSCAN (Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise):

- Основан на плотности данных.

- Может выявлять кластеры произвольной формы и справляться с шумом (выбросами).

- Не требует заранее заданного числа кластеров.

4. Gaussian Mixture Models (GMM):

- Предполагает, что данные генерируются из смеси нескольких гауссовых распределений.

- Использует метод максимального правдоподобия для оценки параметров распределений.

В вашем случае, когда центроиды уже заданы, вы используете метод, который можно назвать "кластеризация с фиксированными центроидами". Это действительно можно рассматривать как форму кластеризации, хотя и с некоторыми особенностями:

1. Фиксированные центроиды:

- В отличие от традиционных методов, где центроиды определяются в процессе кластеризации, здесь они заданы заранее.

- Это может быть полезно, когда у вас есть априорные знания о структуре данных или когда вы хотите использовать заранее определенные эталонные точки.

2. Евклидово расстояние:

- Вы используете евклидово расстояние для определения ближайшего кластера.

- Это стандартный подход в задачах кластеризации и классификации, особенно когда данные имеют метрическую структуру.

Применение в контексте котлоагрегата

Ваш подход к определению текущего режима работы котлоагрегата действительно можно рассматривать как форму кластеризации. Вот как это работает в вашем случае:

1. Режимная карта:

- Режимная карта содержит заранее определенные режимы работы котлоагрегата, которые можно рассматривать как центроиды кластеров.

2. Текущие параметры:

- Вы измеряете текущие параметры (паропроизводительность, давление, расход мазута) и сравниваете их с режимами из режимной карты.

3. Определение ближайшего режима:

- Вы вычисляете евклидово расстояние между текущими параметрами и каждым из режимов.

- Режим с минимальным расстоянием считается текущим режимом работы.

# Реализация программы

В данной главе мы приступим к решению задачи написания программного решения для определения количества горелок.

## 3.1 Серверная часть

## - Java: Это объектно-ориентированный язык программирования, широко используемый для разработки серверных приложений. Java обеспечивает высокую производительность, безопасность и масштабируемость.

## - Spring Framework: Это мощный фреймворк для разработки Java-приложений. Он предоставляет комплексные решения для создания веб-приложений, включая поддержку RESTful сервисов, управление зависимостями через Spring IoC контейнер, и интеграцию с различными базами данных.

## - PostgreSQL: Это объектно-реляционная система управления базами данных (ORDBMS), известная своей надежностью, функциональностью и производительностью. PostgreSQL поддерживает сложные запросы, транзакции и расширяемость.

## Архитектура и функциональность

## 1. RESTful API: Серверная часть предоставляет RESTful API для взаимодействия с клиентской частью. API включает эндпоинты для загрузки данных, запуска вычислений, и получения результатов.

## 2. Обработка данных: После получения файла с данными котлоагрегата, серверная часть выполняет следующие шаги:

## - Валидация данных: Проверка формата и целостности данных.

## - Интерполяция: Замена пропущенных значений и значений, равных 0.0, на интерполированные значения.

## - Сглаживание данных: Применение метода скользящего среднего для сглаживания временных рядов.

## - Кластеризация: Определение текущего режима работы котлоагрегата на основе евклидова расстояния до предопределенных центроидов режимов.

## 3. Сохранение результатов: Результаты вычислений сохраняются в базе данных PostgreSQL. Это позволяет в любой момент времени получить доступ к историческим данным и анализировать их.

## 3.2 Клиентская часть

- JavaScript: Это язык программирования, используемый для создания интерактивных веб-страниц. JavaScript позволяет динамически обновлять контент страницы без перезагрузки.

- React: Это библиотека для создания пользовательских интерфейсов, разработанная Facebook. React позволяет создавать компоненты, которые управляют своим состоянием и рендерятся при изменении данных.

Архитектура и функциональность

1. Загрузка данных: Клиентская часть предоставляет интерфейс для загрузки файла с данными котлоагрегата. Пользователь может выбрать файл и отправить его на сервер для обработки.

2. Отображение результатов: После завершения вычислений, результаты могут быть получены с сервера и отображены на графике. Для этого используются библиотеки для визуализации данных, такие как Chart.js или D3.js.

3. Исторические данные: Клиентская часть также предоставляет интерфейс для просмотра исторических данных. Пользователь может выбрать временной интервал и просмотреть результаты вычислений за этот период.

4. Интерактивность: React обеспечивает высокую интерактивность приложения. Компоненты могут обновляться в реальном времени при изменении данных, что делает интерфейс отзывчивым и удобным для пользователя.

## Алгоритм определения количества работающих горелок

Исходные данные собираются с котлоагрегата с интервалом в одну минуту. Эти данные включают в себя довольно много параметров, в том числе интересующие нас: паропроизводительность, давление мазута и расход мазута. Данные представлены в виде таблицы, где каждая строка соответствует одному моменту времени.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Время | Давление мазута на котел №9, кг/ | Расход мазута в котёл №9, т/ч | Расход перегретого пара от котла №9 (факт.), т/ч |
| 01.01.2023 | 19,216 | 4,066 | 44,336 |
| 01.01.2023 0:01 | 19,219 | 4,066 | 44,215 |
| 01.01.2023 0:02 | 19,216 | 4,066 | 44,061 |
| 01.01.2023 0:03 | 19,216 | 4,067 | 43,958 |
| 01.01.2023 0:04 | 19,216 | 4,065 | 43,865 |
| 01.01.2023 0:05 | 19,216 | 4,066 | 43,799 |
| … | … | … | … |

1. Обработка пропущенных и некорректных значений:

В данных могут встречаться пропущенные значения (NULL) и значения, равные 0.0 в те моменты времени, когда котлоагрегат работает на определённых мощностях.

Пример1

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Время | Давление мазута на котел №9, кг/ | Расход мазута в котёл №9, т/ч | Расход перегретого пара от котла №9 (факт.), т/ч |
| 01.01.2023 | 19,216 | 4,066 | 44,336 |
| 09.01.2023 17:39 | 16,837 | 2,978 | 32,181 |
| 09.01.2023 17:40 | Null | Null | Null |
| 09.01.2023 17:41 | 16,837 | 2,978 | 32,119 |

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Время | Давление мазута на котел №9, кг/ | Расход мазута в котёл №9, т/ч | Расход перегретого пара от котла №9 (факт.), т/ч |
| 13.01.2023 21:52 | 15,1 | 2,8 | 30,028 |
| 13.01.2023 21:53 | 15,097 | 2,801 | 30,227 |
| 13.01.2023 21:54 | 15,094 | 0 | 30,488 |
| 13.01.2023 21:55 | 15,087 | 2,801 | 30,563 |
| 13.01.2023 21:56 | 0 | 0 | 30,593 |
| 13.01.2023 21:57 | 15,087 | 2,8 | 30,609 |

Такие значения очевидно являются результатом некорректной работы датчиков. Эти значения необходимо обработать, чтобы они не искажали дальнейший анализ.

Пропущенные (NULL) и некорректные значения заполняются с помощью линейной интерполяции. Интерполяция позволяет плавно восстановить недостающие данные, основываясь на соседних значениях. Это помогает компенсировать сбои в работе датчиков и получить более полные и корректные данные.

3. Сглаживание данных:

- После интерполяции данные могут все еще содержать резкие скачки, которые негативно влияют на результаты анализа. Для сглаживания данных используется метод скользящего среднего.

- Скользящее среднее вычисляется для каждого параметра (паропроизводительность, давление мазута, расход мазута) с заданным размером окна. Это позволяет уменьшить влияние случайных колебаний и получить более стабильные значения параметров.

4. Определение текущего режима работы:

- После сглаживания данных необходимо определить текущий режим работы котлоагрегата. Для этого используется метод кластеризации с заранее заданными центроидами.

- Режимная карта содержит заранее определенные режимы работы котлоагрегата, которые можно рассматривать как центроиды кластеров. Каждый режим характеризуется определенными значениями паропроизводительности, давления мазута и расхода мазута.

- Для каждого момента времени вычисляются текущие параметры (сглаженные значения паропроизводительности, давления мазута и расхода мазута).

- Затем для каждого режима из режимной карты вычисляется евклидово расстояние между текущими параметрами и параметрами режима.

- Режим с минимальным евклидовым расстоянием считается текущим режимом работы котлоагрегата.

# Тестирование и оценка точности