

Колмогоров Алексей Геннадьевич,
к.т.н., доцент, зав. кафедрой автоматизации технологических процессов
ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет»,
e-mail: atp@angtu.ru

ОСОБЕННОСТИ ТРЕНАЖЕРНОЙ МОДЕЛИ ПАРОВОГО КОТЛА

Kolmogorov A.G.

FEATURES OF THE TRAINING MODEL OF THE STEAM BOILER

Аннотация. Приведен анализ парового котла БКЗ-160-100Ф, как объекта для построения тренажерной модели, входящей в состав компьютерного тренажерного комплекса, разработанного для ТЭЦ-1 АО «Группа ИЛИМ» в г. Коряжма.

Ключевые слова: компьютерный тренажерный комплекс, паровой котел, электростанция, математическое описание, тренажерная модель.

Abstract. The analysis of the BKZ-160-100F steam boiler as an object for building a training model, which is part of a computer training complex developed for CHPP-1 by JSC ILIM Group in Koryazhma, is presented.

Keywords: computer training complex, steam boiler, power plant, mathematical description, training model.

Энергетика играет ключевую роль в экономическом развитии России. Без энергетики невозможно представить себе современную жизнь, так как она является основой для комфорта и благополучия населения. Развитие этой отрасли способствует укреплению экономической стабильности и повышению качества жизни граждан.

В области производства электроэнергии чрезвычайно ответственной является задача обеспечения бесперебойности и безопасности работы электростанций. За успешное выполнение этой задачи отвечает оперативный персонал, в обязанности которого входит соблюдение технологических режимов работы электростанции, подготовка оборудования к пуску и обеспечение его надёжной и экономичной работы в соответствии с заданным режимом, быстрое реагирование на аварийные ситуации и проведение необходимых мероприятий по их ликвидации, соблюдение правил эксплуатации оборудования, изучение новых технологий и методов работы, участие в тренингах и семинарах и другие обязанности.

Несмотря на то, что руководство электростанций регулярно проводит тренировочные мероприятия, направленные на обучение персонала безопасной эксплуатации энергоустановок, аварийность из-за ошибок персонала остается весьма высокой. Так, по данным начальника Департамента технического контроля АО «Системный оператор Единой энергетической системы» (АО «СО ЕЭС») [1], доля аварий, связанных с некорректными действиями персонала при работе с генерирующим и тепломеханическим оборудованием электростанций, находится на уровне 9 %, при 21% невыявленных причин аварий.

Для повышения обученности персонала электростанций АО «СО ЕЭС» разработало стандарт «Профессиональная подготовка, поддержание и повышение квалификации персонала», определяющий подходы к подготовке персонала и этапы обучения. Стандарт предусматривает при проведении профессиональной подготовки, поддержания и повышения квалификации использование современных программных средств обучения и проверки знаний, различные виды компьютерных тренажеров и учебно-тренировочных комплексов.

Известно, что наибольший эффект в обучении оперативного персонала достигается путем использования компьютерных тренажеров. Их применение является сложившейся общемировой практикой профессиональной подготовки персонала. Наиболее продуктивными, с точки зрения эффективности подготовки операторов, являются полнофункциональные компьютерные тренажерные комплексы (КТК), включающие: динамическую точную модель технологического процесса (тренажерную модель), модели реальной системы контроля и управления, имитатора рабочего места оператора с мнемосхемами технологического процесса и органами управления, имитатора полевого оборудования и КИП, реализованными в виде технологических схем, фотопанорам или трехмерных экранных форм дополненной реальности с изображением интерактивной ручной запорной арматуры и органов управления по месту, а также набора готовых сценариев и упражнений для обучения и контроля профессиональных навыков оператора.

Один из таких КТК, включающих три котлоагрегата БКЗ-160-100Ф, введен в промышленную эксплуатацию для обучения машинистов парогенерирующих установок и котельного оборудования 1-й очереди котлотурбинного цеха ТЭЦ-1 АО «Группа ИЛИМ» в г. Коряжма.

Функционал данного КТК, его структура и интерфейс подробно описаны в работе [2]. Данная статья посвящена описанию особенностей математической модели парового котла БКЗ-160-100Ф (тренажерной модели), лежащей в основе математического описания КТК.

Котел БКЗ-160-100Ф – однобарабанный, с естественной циркуляцией, работает по схеме ступенчатого испарения с выносной второй ступенью испарения. Котел имеет следующие расчетные параметры:

- давление в барабане котла – 106 ата;
- температура перегретого пара – 540 °С;
- паропроизводительность – 160 т/ч;
- водяной объем – 29 м³;
- паровой объем – 48 м³;
- температура питательной воды – 215 °С.

В состав моделируемого на тренажере котлоагрегата БКЗ-160-100Ф входят:

- топочная камера с дымоходом;

- барабан котла с сепарационными устройствами;
- пароперегреватель;
- водяной экономайзер 1 и 2 ступени;
- воздухоподогреватель 1 и 2 ступени;
- дымососы – 2 шт;
- дутьевые вентиляторы – 2 шт;
- скрубберы, трубы Вентури – 4 шт;
- мельницы с питателями сырого угля – 3 шт;
- установка собственного конденсата – 2 шт;
- основные и вспомогательные трубопроводы, показанные на мнемосхемах участков, а также на предоставленных технологических схемах (включая дренажные, продувочные и байпасные линии);
- запорно-регулирующая арматура, показанная на мнемосхемах участков, а также на предоставленных технологических схемах в рамках границ моделируемого участка.

Принципиальная схема котлоагрегата БКЗ-160-100Ф представлена на рисунке 1.

Тренажерная модель котла БКЗ-160-100Ф строится на базе математического описания физических процессов, происходящих в реальном объекте, в виде систем нелинейных дифференциальных и алгебраических уравнений: уравнений состояния фазовых переходов, тепло- и массообменных процессов, теплового и материального баланса компонентов продуктов, гидродинамики и гидравлики. Определение параметров моделей производится на основе технологических характеристик и паспортных данных реального оборудования.

Модели охватывают оборудование и арматуру моделируемых узлов, они адаптированы к конкретным условиям установки по режимным параметрам, обозначениям и описаниям позиций, обвязке КИПиА, шкалам приборов, границам сигнализаций и т.п.

В моделях учитывается теплообмен с окружающей средой, приводящий к остыванию аппаратов и трубопроводов при их отключении и прекращении подачи продуктов. Динамические характеристики моделей аппаратов отражают максимально приближенную к реальной реакцию объекта на возмущения и управляющие воздействия.

Тренажерная модель котла БКЗ-160-100Ф содержит следующие компоненты:

- модели потоков (жидкостных и газовых);
- модель емкости (барабан котла);
- модели вентиляторов и дымососов;
- модели теплообменного оборудования;
- модель топочного устройства.

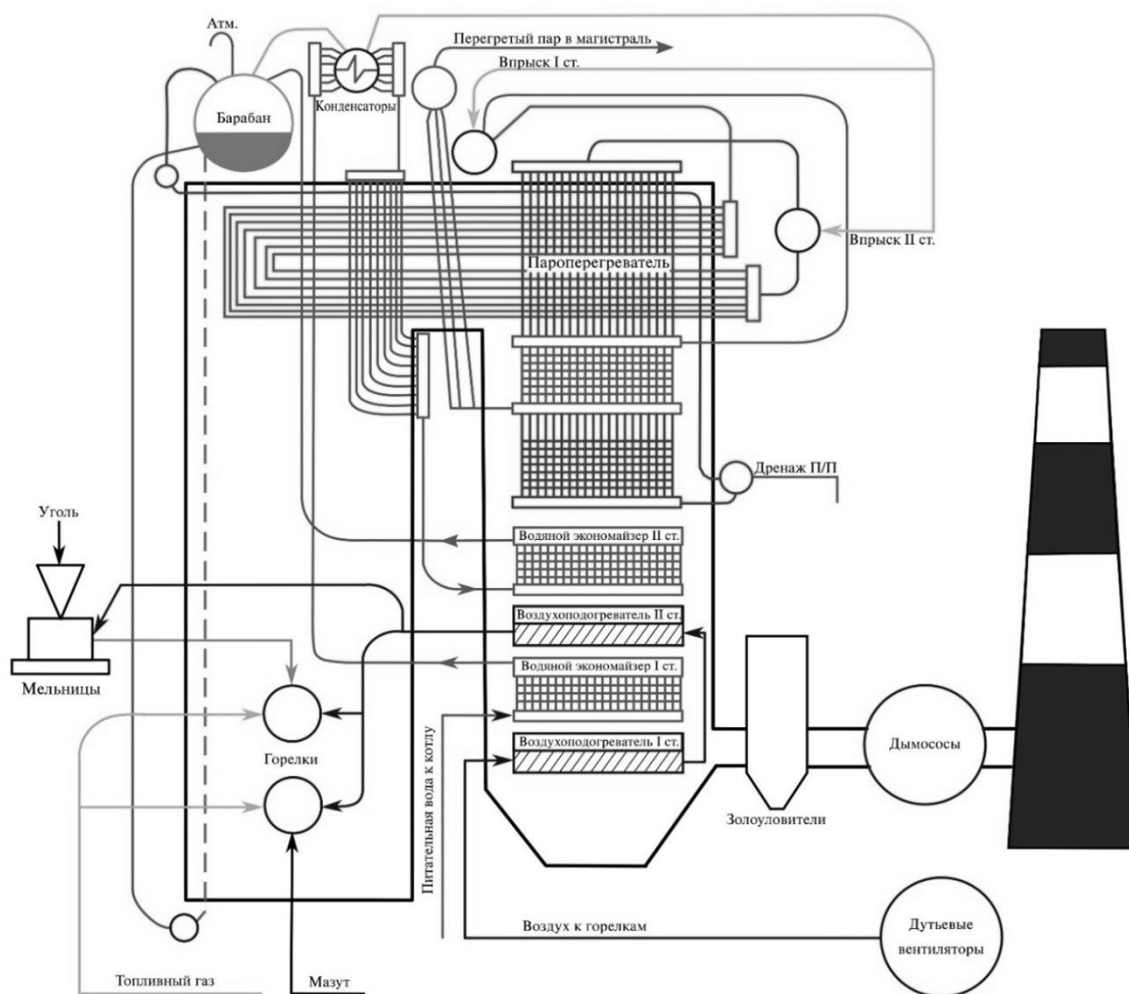


Рисунок 1 – Принципиальная схема котлоагрегата БКЗ-160-100Ф

Технические упрощающие допущения, принятые при реализации модели котла БКЗ-160-100Ф, основаны на необходимости расчета всех его переменных на современной ЭВМ не только в реальном масштабе времени, но и примерно с пятикратным ускорением. Основу математического описания составляют обыкновенные нелинейные дифференциальные уравнения первого или более высоких порядков. Дифференциальные уравнения, как функции нескольких переменных (в частных производных), разбиваются в компьютерной модели на обыкновенные нелинейные дифференциальные уравнения по методу сеток. Для численного решения нелинейных дифференциальных уравнений используется метод Рунге–Кутты четвертого порядка.

Допущения, принимаемые при построении моделей, обеспечивают воспроизведение качественно верной физической картины процессов, происходящих в объекте, во всех воспроизводимых на тренажере режимах работы. С учетом принятых допущений, модель адекватна реальному процессу. Отклонение

в поведении моделируемых параметров от реальных практически не различается обучаемыми и допускается экспертами при приемке тренажера. Температура окружающего воздуха считается постоянной для всей модели.

Параллельно работающее оборудование (дымососы, дутьевые вентиляторы, мельницы и др.) в тренажерной модели описывается одинаковыми уравнениями при их работе в нормальном режиме. Поэтому параллельно установленные датчики температур, давлений, концентраций, токов и др. (право-лево) будут показывать одинаковые расчетные значения. Различия в работе оборудования и в показаниях датчиков будут видны при реализации оператором или инструктором сценариев аварий с этим оборудованием или аварий в соответствующих трубопроводных трактах.

Представленное математическое описание легло в основу тренажерной модели компьютерного тренажерного комплекса «ИЛИМ-ЭНЕРГЕТИКА», введенного в промышленную эксплуатацию в 2023 году на ТЭЦ-1 АО «Группа ИЛИМ» в г. Коряжма.

Разработанные решения стали итогом совместной деятельности Ангарского государственного технического университета и Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна. Двухлетний опыт эксплуатации КТК показал высокую эффективность данного интерактивного инструмента при подготовке оперативного персонала станции. Итогом послужила заявка на продолжение работ по оснащению второй очереди ТЭЦ-1 подобным комплексом.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Акционерное общество «Системный оператор Единой энергетической системы»:** [сайт] / учредитель АО «СО ЕЭС». – Москва, 2024 – URL: https://www.soups.ru/fileadmin/files/company/events/2018/konf_5_231018_prez_05_inv.pdf/ (дата обращения: 28.09.2025). – Текст: электронный.

2. **Благодарный, Н.С.** Компьютерный тренажер для машинистов паровых котлов / Н.С. Благодарный, В.В. Борко, О.О. Иванов, М.В. Кривов, А.Г. Колмогоров, В.Ю. Кобозев. Текст : непосредственный // Материалы Всероссийской отраслевой научно-практической конференции «Инновационные решения в развитии целлюлозно-бумажной отрасли и лесопромышленного комплекса». – СПб.: ВШТЭ СПбГУПТД, 2024. – С. 144–159.