

ВНЕДРЕНИЕ ПОЛНОМАСШТАБНОГО КОМПЬЮТЕРНОГО ТРЕНАЖЕРА СОЧИНСКОЙ ТЭС

В.А. Чернаков, В.П. Страшных, Е.В. Минаев, Д.А. Прокопенко, (ООО "ЭНИКО ТСО")

А.Г. Свицерский, И.В. Крутицкий, К.А. Молчанов (ЗАО "Интеравтоматика")

Рассмотрен состав полномасштабного компьютерного тренажера, предназначенного для обучения персонала и оптимизации ТП и АСУТП в процессе пуска-наладки энергоблока ТЭС. Представлены основные подходы, принципы и инструменты разработки модели объекта. Описаны результаты внедрения тренажера на Сочинской ТЭС.

Сочинская ТЭС одной из первых в России использует для выработки электроэнергии новые высокоэффективные парогазовые установки (ПГУ). Мощность одного энергоблока составляет 39 МВт. Станция была введена в эксплуатацию в декабре 2004 г. АСУТП электростанции было разработано и внедрено ЗАО "Интеравтоматика" на базе современного, предполагающего полностью компьютерный способ управления ПТК Simatic PCS7 PS фирмы Siemens со специализированным для энергетики программно-алгоритмическим продуктом Power Solution.

Опыт эксплуатации подобных ТЭС и АСУТП в России практически отсутствует, поэтому крайне актуальным для Сочинской ТЭС было создание полномасштабного компьютерного тренажера как технического средства не только для обучения персонала, но и для оптимизации ТП и АСУТП в процессе пуска-наладки энергоблока. Внедрение такого тренажера было осуществлено фирмами ЗАО "Интеравтоматика" (разработка модели АСУТП), ООО "ЭНИКО ТСО" (разработка моделей физических процессов в технологическом оборудовании и интеграция ПО тренажера), ОАО "ВТИ" (верификация моделей физических процессов), подразделением Industrial Solution & Services фирмы Siemens AG (поставщик инструментальных средств разработки модели АСУТП).

Кратко рассмотрим тренажер Сочинской ТЭС, инструментальные средства, использованные при его разработке, и особенности внедрения комплекса.

Состав и полнота моделирования тренажера

Объектом моделирования является энергоблок, состоящий из газовой турбины GT10С фирмы ALSTOM Power Sweden AB с генератором AMS1120 ALSTOM, котла-утилизатора П-103 производства ОАО "ЗиО" и паровой турбины Т-10/11-5,2/0,2 производства ОАО "Калужский турбинный завод" с генератором ТАП-12-2 КУЗ производства ОАО "Электросила".

Основной особенностью тренажера является его полномасштабность, т.е. модель АСУТП и операторской станции полностью идентичны реальным системам на промышленном объекте. Это достигнуто за счет использования для разработки модели АСУТП инструментальных средств фирмы Siemens (разработчика средств для реальной АСУТП), обеспечивающих разработку модели АСУТП полностью адекватной реальному объекту.

¹Чернаков В.А., Осадчий М.А., Кориковский К.П., Краюшкин Ю.В. Программный комплекс ЭНИКАД // Автоматизация в промышленности. 2003. №7.

Компьютерный тренажер функционально состоит из трех частей:

- операторской станции, являющейся стандартной блочной операторской станцией, что обеспечивает идентичность рабочих мест оператора на блоке и тренажере;
- программного эмулятора контроллера, который работает с блочным проектом АСУТП и обеспечивает полное соответствие базового прикладного ПО тренажера и реальной АСУТП;
- модели физических процессов в технологических системах объекта, разработанные при помощи систем автоматизированного проектирования (САПР) моделей теплогидравлики, автоматики и электричества, входящих в состав оболочки ЭНИКАД¹, созданной фирмой "ЭНИКО ТСО" и успешно используемой ею для создания комплексных всережимных моделей РВ для инженерных тренажеров в атомной энергетике.

Обмен данными между функциональными частями тренажера осуществляется по стандарту OPC так же, как и в промышленной АСУТП блока. Структура тренажера представлена на цветной вставке.

Модели блока и АСУТП характеризуются объемом исследуемых сигналов контроля и управления: аналоговые сигналы — 350 ед.; дискретные входные сигналы — 280 ед.; регулирующие клапаны — 34 ед.; запорная арматура — 118 ед.; электрические механизмы собственных нужд — 28 ед. Кроме того, в модель процесса входит вся арматура с ручным приводом, часть которой выведена на формат инструктора для моделирования неверных действий и ручных операций, связанных с неавтоматизированным управлением.

На тренажере адекватно реализованы следующие основные режимы энергоблока:

- подготовка к пуску и пуск энергоблока из любого теплового состояния при заданных внешних условиях;
- плановый останов энергоблока без расхолаживания оборудования, с расхолаживанием котла-утилизатора, паропроводов и паровой турбины;
- аварийный останов энергоблока;
- работа энергоблока в регулируемом диапазоне нагрузок (в том числе в теплофикационном режиме) при различных внешних условиях и различном состоянии общестанционных систем;
- изменение состава работающего вспомогательного оборудования на энергоблоке, например, под-

ключение теплофикационной установки, отключение насоса и др.

- работа энергоблока в нештатных ситуациях (отказ любого регулятора; срабатывание любой локальной защиты; резкий сброс нагрузки; нарушение работы узла подпитки конденсатора, любого модуля КУ, основных насосов или любого маслоохладителя ПТ.

Оборудование АСУТП моделируется в полном объеме в соответствии с границами моделирования ТП. И наоборот, модель процесса построена так, что абсолютно все алгоритмы автоматического управления могут быть воспроизведены в тренажере.

Модель ТП, созданная "ЭНИКО ТСО", охватывает основное и вспомогательное тепломеханическое и электрическое оборудование энергоблока в объеме, достаточном для получения навыков управления и анализа ситуаций, возникающих на этом оборудовании. Детализация и объем моделирования определялась исходя из точности воспроизведения статических и динамических процессов, так и необходимостью обеспечения полноты интерфейса для модели АСУТП.

При разработке модели учитывались основные требования к ее функциональным характеристикам:

- информационная полнота, т.е. обеспечение расчета всех параметров, необходимых для воспроизведения и анализа режимов основного оборудования энергоблока ПГУ и его вспомогательных систем, а также для реализации воздействий со стороны органов управления оборудованием и восприятие этих управлений моделью;

- достаточная статическая и динамическая точность для использования тренажера как в учебных целях в системе профессиональной подготовки персонала, так и для инженерной поддержки при эксплуатации энергоблока и прогнозировании эксплуатационных характеристик оборудования.

Все элементы оборудования энергоблока, за исключением газотурбинной установки (ГТУ), моделируются в полном объеме. В частности, в полном объеме моделируются следующие системы: HAD, HAG, HAH – пароводяной тракт котла-утилизатора; HNA – тракт дымовых газов котла-утилизатора; LCA, LCB, LAC, LAB – основной конденсат и питательная вода; LBA, LBB – паропроводы высокого и низкого давления; LBF, LBG – подача пара на тепловые собственные нужды; LBD, NDD, LCN – пар и конденсат теплофикационного отбора паровой турбины; LBK, LCE – БРОУ высокого и низкого давления; LCQ – расширитель непрерывной продувки котла-утилизатора; LCR – добавок обессоленной воды в конденсатор; LFC – дренажный бак машзала; MAA – паровая турбина; MAG – конденсатор; MAJ – эжекторы; MAL – дренажи паровой турбины; MAV – маслосистема паровой турбины; MAW – подача пара на уплотнения; MAX – система регулирования паровой турбины; MKA – генератор паровой турбины; NDA, NDB – сетевая вода; PAB, PCB – охлаждающая вода; BAS, BAT, BBA, BFA, BFB, BFT – электро-техническое оборудование.

Модель газотурбинной установки из-за очень малой ее инерционности и высокой надежности (что исключает возможность и необходимость ее регулирования вручную) реализуется в упрощенном виде. Она представляет собой набор квазистатических зависимостей основных параметров с использованием баланса горения топлива, определяющих работу ГТУ и блока в целом (электрическая мощность ГТУ, расход воздуха, расход топлива, температура газов на выходе ГТУ), базирующихся на алгоритмах управления изготовителя (Alstom). Сами алгоритмы управления реализованы отдельным логико-динамическим модулем. При этом модель газовой турбины обеспечивает:

- учет влияния внешних условий, в том числе температуры наружного воздуха, атмосферного давления, относительной влажности воздуха и состава топлива;
- расчет мощности на валу генератора в зависимости от расхода топлива и внешних условий;
- расчет расхода, состава и температуры (энтальпии) выхлопных газов, предельной температуры выхлопных газов;
- обеспечивает динамические характеристики пуска/останова ГТУ.

Модели контроллеров систем автоматического управления газовой и паровой турбин ГТУ, функции которых не входят в блочную АСУТП, реализованы в объеме их функциональности и полноты интерфейса с АСУТП блока.

Основные подходы и принципы разработки модели объекта

Источником исходных данных для разработки модели является проектная документация, чертежи оборудования и его технические паспорта. Это длины, диаметры и толщины стенок труб, геометрические размеры поверхностей теплообмена, размеры баков, параметры дроссельных устройств, паспортные характеристики электрического оборудования, проектные расчеты и т.д. Иногда, из-за отсутствия необходимых данных в документации, приходилось производить обмер геометрических характеристик на реальном оборудовании. Так, для получения характеристик регулятора уровня в конденсаторе его вкладыши приложили к листу бумаги и скопировали размер проходных окон (рис. 1). Далее были получены зависимости относительного открытия окон от положения штока (рис. 2), которые и были заданы в модели. По этим характеристикам в модели рас-

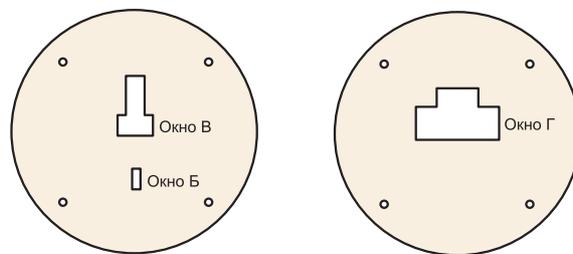


Рис. 1. Вид вкладышей с проходными окнами РУК

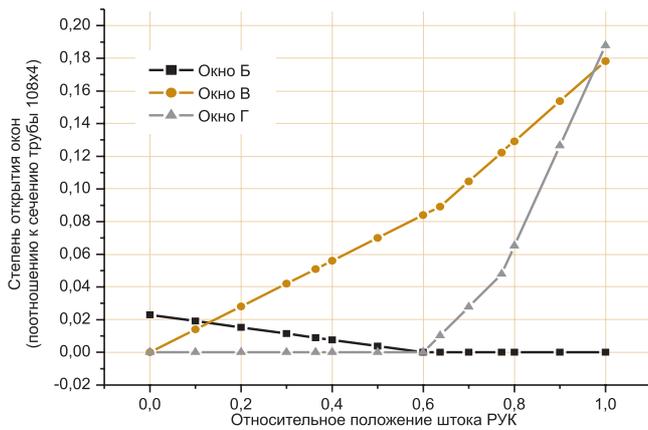


Рис. 2. Характеристики клапанов моделирующих отдельные проходные окна РУК

считываются коэффициенты гидравлического сопротивления с использованием инженерных формул расчета коэффициентов для случая сужения/расширения.

Для получения необходимой точности используется распределенное представление оборудования, т.е. разбиение трубопроводов и оборудования на расчетные участки. Детализация модели определялась различными факторами.

Первый фактор – топологический: каждая труба (за исключением теплообменных устройств) представляется индивидуально, и во всех точках смешения/разделения потока рассчитываются давление и энтальпия.

Второй фактор – расположение измерительной аппаратуры и специфика ее применения.

Третий фактор связан с повышением точности и обеспечением устойчивости расчетов (обычно участки с фазовыми переходами теплоносителя и сильными изменениями температур представляются более подробно). Так, участки трубопроводов за испарительными модулями котла-утилизатора были разбиты на участки длиной 1...2 метра. Для самих испарителей оказалось достаточным использование четырех расчетных участков при использовании логарифмического температурного напора на каждом из них.

Число "узлов" гидравлического тракта в модели блока Сочинской ТЭС, в которых проводится расчет давлений и температур, составило 608 ед., конструктивных элементов – 672 ед.

В процессе разработки модели блока основное оборудование тестировалось на отдельных простых схемах с граничными условиями, где проверялись статические характеристики на их соответствие паспортным и проектным данным. При несовпадении проводился анализ, в результате которого выявлялись и исправлялись ошибки в исходных данных или настроечных параметрах модели. Использование настроечных параметров обусловлено как недостаточной полнотой проектных данных, так и методологическими особенностями расчета моделей в масштабе РВ, необходимом для использования модели в составе тренажера.

Далее с привлечением специалистов ОАО "ВТИ" выполнялась комплексная наладка отдельных систем и тестирование полной модели.

Средства разработки моделей

При разработке комплексной модели для тренажера блока Сочинской ТЭС были использованы следующие средства разработки:

1. САПР автоматике ("ЭНИКО ТСО") – при реализации моделирования эмулятора контроллера газовой турбины, эмулятора контроллера паровой турбины и логики электрических переключений и защит;

2. САПР теплогидравлики ("ЭНИКО ТСО") – при реализации моделирования оборудования всей тепловой схемы блока за исключением газовой турбины;

3. САПР электрических процессов в оборудовании энергоблоков ("ЭНИКО ТСО") – при реализации моделирования электрического оборудования (генераторов, возбуждителей, трансформаторов, электродвигателей, оборудования систем собственных нужд);

4. Моделирующий комплекс Simit SCE (SIEMENS), работающий с блочным проектом АСУТП, – при реализации моделирования программного эмулятора контроллера, исполнительных механизмов приводов регулирующих клапанов и запорной арматуры, интерфейса рабочего места инструктора тренажера и системных функций управления тренажером (запуск/останов моделирования, загрузка и сохранение состояний).

Первые три средства разработки моделей объектов реализованы в рамках оболочки ЭНИКАД и обладают следующими общими особенностями, позволяющими обеспечить эффективность разработки модели и повысить ее качество:

- моделирование объекта строится на основе библиотек моделирующих элементов, специфических для каждого САПР. Элементы соответствуют либо отдельному типу оборудования, либо физическому закону или явлению, либо функции. При изменении библиотек, сделанные усовершенствования автоматически переносятся в модель объекта путем компиляции;

- задание топологии и других исходных данных проводится с помощью единого графического редактора, что позволяет удобно осуществлять ввод, проверку и модификацию исходных данных. В результате получается моделирующая схема. Большая по объему схема может быть разбита на произвольное число отдельных листов схемы с сохранением связей между ними;

- исполняющая система ЭНИКАД позволяет контролировать рассчитываемые величины в любой точке схемы в РВ, изменять параметры настройки элементов схемы без ее перекомпиляции. Связь с внешними системами осуществляется через интерфейсные элементы, параметры на которых также можно менять непосредственно в процессе моделирования, что позволяет вести автономную отладку отдельных модулей;

- связь между моделируемыми системами осуществляется посредством правил формирования глобальных имен. Например, для обеспечения интерфейса электродвигателя и гидравлической части насоса на моделирующих схемах соответствующим элементам надо задать одинаковые имена.

САПР автоматике

Объектом САПР автоматике является технологическая система, моделирование которой допускает ее разбиение на отдельные элементы, связанные по сигналам между собой, с последовательным обходом каждого элемента и с учетом возникающих при разбиении обратных связей. К технологическим системам могут быть отнесены любые системы сигнализации, защиты и управления технологическим оборудованием. В случае моделирования системы управления, построенной на логических элементах, возможно прямое моделирование схемы системы. В качестве элементов схемы системы могут использоваться как простейшие логические, аналоговые и смешанные элементы, так и элементы пользователя, реализующие отдельные блоки моделируемой системы (при заданной полноте моделирования). При таком подходе возможно как прямое, так и блочное моделирование технологической системы управления с любой необходимой степенью детализации.

Мнемоника схемы САПР автоматике соответствует стандартным схемам устройств технологической автоматике и логики. Она может быть создана методом прямой аналогии с отображением на ней всех реальных элементов схемы устройства и связей между ними. Фрагмент моделирующей схемы САПР автоматике представлен на цветной вставке.

САПР теплогидравлики

Объектом моделирования САПР теплогидравлики являются технологические системы и оборудование, процессы в которых определяются законами сохранения массы, импульса и энергии. К таким системам могут быть отнесены системы, включающие трубопроводы, запорную, регулируемую и предохранительную арматуру, насосы, теплообменное оборудование, ступени турбин, сосуды с уровнем.

Система базовых уравнений для основной части моделируемого оборудования (за исключением моделей сосудов с уровнем) основывается на моделировании сжимаемой среды, описываемой четырьмя уравнениями сохранения для гомогенной пароводяной смеси и неконденсируемых газов. В моделируемой смеси учитывается теплообмен теплоносителя с конструктивными элементами и со средой в окружающем помещении. Уравнение сохранения импульса рассматривается в одномерном приближении с учетом конвективной части и звукового ограничения скорости потока на ветви. Модель может описывать динамику процессов в паровых трактах с учетом звуковых ограничений по скорости потока и учетом скоростного напора в уравнении сохранения энергии.

Для сосудов с уровнем и устройств с сепарацией и конденсацией рассматривается неравновесная модель (т.е. вода может находиться в перегретом состоянии, а пар — в недогретом до насыщения). Под уровнем рассматриваются жидкая и парогазовая фазы, а над уровнем — жидкая, паровая и газовая фазы.

Эти основные уравнения дополняются замыкающими соотношениями, которые представляют собой корреляции для расчета коэффициентов теплоотдачи, коэффициентов гидравлических сопротивлений, поправок к нормальным характеристикам оборудования в зависимости от параметров среды, режимов течения и геометрических параметров.

В качестве моделируемых сред рассматриваются пар-вода, различные типы масла и продукты сгорания органического топлива.

Моделирование отдельного технологического оборудования, в котором происходят сложные для расчета в масштабе РВ процессы, осуществляется на базе характеристик, которые получаются экспериментально или по расчетам проектной организации. К такому оборудованию относятся ступени турбин и компрессоров, насосы, эжекторы. Фрагмент схемы, моделируемой в САПР теплогидравлики, приведен на цветной вставке.

САПР электрических процессов в оборудовании энергоблоков

Объектом моделирования САПР электрических процессов являются системы и оборудование энергоблока, предназначенные для генерации, потребления и передачи электрической мощности. К таким системам относятся синхронные генераторы, асинхронные двигатели, трансформаторы, кабельные или воздушные линии, а также коммутационные устройства.

Система узловых уравнений для расчета режимов сети строится на основе закона Кирхгофа для узловых токов. Матрица системы автоматически формируется САПР на основе электрической схемы, создаваемой в редакторе оболочки ЭНИКАД. Библиотека элементов охватывает стандартное технологическое оборудование энергоблоков. Это позволяет достаточно просто переносить реальные технологические схемы в среду САПР. Начальными данными, задающими свойства элемента, в большинстве случаев являются стандартные паспортные характеристики оборудования.

Модель синхронного генератора основана на классических уравнениях Парка-Горева, которые позволяют описать электрические процессы в синхронной машине при помощи дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами. Модель адекватно описывает как стационарные, так и различные переходные процессы.

Модели асинхронных двигателей используют двухконтурное и трехконтурное представления, что позволяет кроме номинальных режимов достаточно точно описывать режимы пуска, разворота и выбега двигателя, используя в качестве начальных данных каталожные данные.

Модели трансформаторов описывают двух- и трех-обмоточные трансформаторы, а также автотрансформаторы. Все модели трансформаторов содержат модели регулирования под нагрузкой. Начальными данными, задающими свойства, являются также каталожные данные.

Кроме перечисленных устройств, библиотека САПР электрических процессов содержит вспомогательные модели устройств таких, как шина, измерители разности фаз, реакторы, обобщенные нагрузки, конденсаторные батареи.

Программный комплекс Simit SCE

Объектом моделирования программного комплекса Simit является программируемый логический контроллер – полный аналог реального контроллера, управляющего энергоблоком Сочинской ТЭС, что позволяет даже в процессе наладки АСУТП блока иметь на тренажере последнюю версию разработки контроллера. Загрузка полного проекта АСУТП в эмулятор занимает порядка 30 минут.

Также в программном комплексе Simit имеются средства разработки логико-динамических моделей и создания интерфейсных форматов.

Результаты внедрения тренажера

В ходе пуско-наладки АСУТП блока тренажер наиболее активно использовался для отладки пошаговых программ, в частности, для пошаговых программ разворота блока из холодного состояния. Кроме того, на тренажере оптимизировались видеокадры операторской станции. Отлаженные пошаговые программы и видеокадры автоматически переносились в реальную АСУТП энергоблока благодаря свойствам моделирующего комплекса Simit SCE (Siemens).

Особенно был важен тренажер для тех операторов смены, кто впервые столкнулся с современными автоматическими системами управления блока. На тренажере можно в спокойной обстановке, не боясь вывести из строя оборудование, попробовать осуществить любые режимы и переключения, получить навыки управления АСУТП, наглядно посмотреть принципы работы технологических систем, "почувствовать" блок.

Минаев Евгений Валерьевич – ведущий инженер, Прокопенко Дмитрий Алексеевич – ведущий инженер, Страшных Вадим Петрович – начальник отдела,

Чернаков Виктор Алексеевич – генеральный директор ООО "ЭНИКО ТСО".
Контактный телефон (495)323-95-99. [Http://www.eniko.ru](http://www.eniko.ru)

Крутицкий Игорь Валентинович – ведущий инженер, Молчанов Константин Алексеевич – ведущий инженер, Сви́дeрский Алексей Георгиевич – канд. техн. наук, директор по маркетингу ЗАО "Интеравтоматика".
Контактный телефон (495)275-61-90. [Http://www.ia.ru](http://www.ia.ru)

МНИИРЭ "Альтаир" применяет VxWorks в системе управления корабельным зенитно-ракетным комплексом

Морской НИИ Радиоэлектроники "Альтаир" разрабатывает зенитные ракетные комплексы (ЗРК) для кораблей ВМФ РФ и зарубежных ВМС. Система управления ЗРК "Штиль-1" является распределенной по способу сбора, обработки информации и управления объектами и ра-

ботает под управлением ОС РВ VxWorks производства компании Wind River. При разработке системы управления применены магистрально-модульный стандарт CompactPCI формата 3U и процессорные модули на базе Intel Pentium-M.

Тренажер позволил персоналу ТЭС своевременно отработать навыки управления и изучить различные режимы работы нового энергоблока, в том числе и те, которые еще не встречались на реальном объекте, в частности, режимы подключения теплофикационного отбора и работы в теплофикационном режиме (теплофикационное оборудование еще не введено в эксплуатацию).

Разработчиком АСУТП блока на тренажере было проведено обучение персонала цеха АСУТП в рамках программы ввода систем автоматического управления в эксплуатацию. Внедрение полномасштабного тренажера позволяет персоналу ТЭС не только отрабатывать навыки управления в условиях максимально приближенных к реальным, но и детально изучать особенности протекания различных переходных режимов энергоблока. Так, в процессе наладки режимов управления паровой турбины происходило срабатывание защит по расходу в циркуляционном контуре высокого давления. Суть явления заключалось в том, что при относительно высокой скорости открытия регулирующих клапанов паровой турбины происходил провал давления в барабане и циркуляционном контуре высокого давления, из-за чего и возникал срыв насосов. Тренажер позволил детально изучить этот режим.

В заключение следует особо подчеркнуть, что описанная выше технология разработки полномасштабного тренажера блока Сочинской ТЭС позволяет создавать инженерные полномасштабные тренажеры до ввода самого блока в эксплуатацию, что особенно важно для новых типов энергоблоков, опыт эксплуатации которых отсутствует как в смысле подготовки персонала, так и в смысле инженерной поддержки пусконаладочных работ.

Кроме того, в составе оболочки ЭНИКАД имеется аналогичный по своим функциональным возможностям Simit SCE (SIEMENS) моделирующий комплекс для АСУТП на базе средств ТПТС (Teleperm ME), выпускаемых в России по лицензии фирмы Siemens и широко применяемых при создании АС ТП как в тепловой, так и атомной энергетике. Это позволяет создавать тренажеры, аналогичные вышеописанному, и для энергоблоков с АСУТП на базе средств ТПТС.

[Http://www.vxworks.ru](http://www.vxworks.ru)