

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) мощностью 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 энергетике 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, разработанной 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 РВВ 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 и 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-

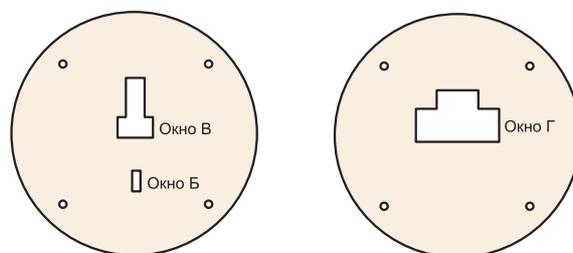


Рис. 1. Вид вкладышей с проходными окнами РУК

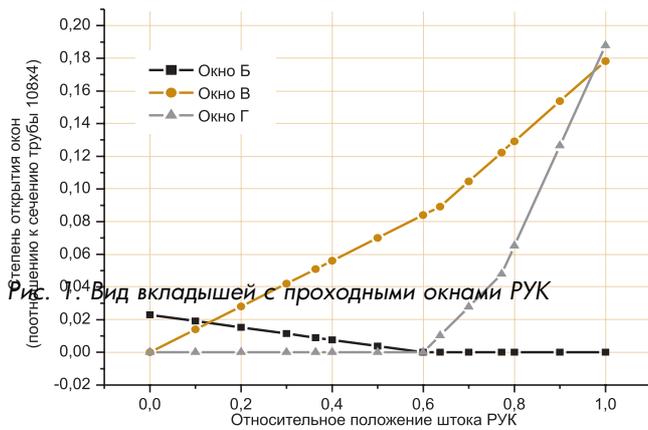


Рис. 2. Характеристики клапанов моделирующих отдельные проходные окна РУК

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: эмуляторы контроллера газовой турбины, 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 энергоблоков (генераторов, возбуждателей, трансформаторов, электродвигателей, оборудования систем собственных нужд);

4. Моделирующий комплекс Simit SCE (SIEMENS) при реализации моделирования: программного эмулятора контроллера, работающего с блочным проектом АСУТП; 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 второго контура 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 трехмоточные 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,

Свидерский Алексей Георгиевич – канд. техн. наук, директор по маркетингу ЗАО "Интеравтоматика".

Контактный телефон (495)275-61-90. [Http://www.ia.ru](http://www.ia.ru)

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

ДЛЯ ОБУЧАЮЩЕГО КОМПЛЕКСА ПО УПРАВЛЕНИЮ ТЕМПЕРАТУРНЫМ РЕЖИМОМ КОКСОВОЙ ПЕЧИ

Т.Б. Чистякова, О.Г. Бойкова, Е.В. Бабина (СПГУ)

Рассмотрен компьютерный обучающий комплекс, базирующийся на технологии имитационного моделирования, предназначенный для тренинга операторов потенциально опасного технологического объекта (коксовой печи), позволяющий исследовать объект изучения в различных режимах функционирования и отработать навыки по оптимальному, безопасному управлению.

Введение

В настоящее время наиболее рациональным методом повышения квалификации является подготовка и переподготовка оперативного персонала производств на программно-моделирующих технических комплексах и интеллектуальных системах обучения. Повышение уровня обучения производственного персонала приводит к более глубокому знанию причинно-следственных связей в объекте управления, за счет чего грамотнее решаются задачи компоновки оборудования, использования ресурсов управления, выполнения требований технологического регламента, появляются устойчивые навыки выбора управляющих воздействий.

Основной задачей тренажа для оператора потенциально-опасного химического производства является создание возможностей для изучения принципов протекания ТП во всех режимах эксплуатации, распознавания нештатных ситуаций (НС), нахождения причинно-следственных связей, принятия решений по управлению процессом [1]. Таким образом, являются актуальными вопросы разработки компьютерных обучающих комплексов, а имитационные модели как часть такого комплекса крайне важны при разработке алгоритмов обучения, так как многие задачи обучения сводятся к исследованию поведения изучаемого объекта во времени и выбору своевременных управляющих воздействий, переводящих объект в "безопасные" состояния.

Коксование угольной шихты – сложный, инерционный, пожароопасный процесс, характеризующийся большим числом контролируемых различными способами параметров, сложностью принятия решений при ликвидации НС, неоднозначностью диапазонов допустимых границ контролируемых параметров. Большое влияние на процесс и качество конечного продукта оказывает температурный режим, определяющий тепловые свойства кокса (теплоемкость, теплота сгорания, тепло- и температуропроводность и температура возгорания). Для их прогнозирования особое значение имеет правильное определение времени проведения процесса. В связи с этим необходимо предоставить возможность персоналу заранее отработать на-

выки управления в различных режимах функционирования коксовой печи и для различных вариантов аппаратно-технологического оформления процесса.

Задача обучения оператора потенциально опасного ТП с использованием компьютерного обучающего комплекса на основе системы имитационного моделирования сводится к пассивному изучению особенностей эксплуатации исследуемого объекта изучения, освоению навыков управления в регламентном режиме, изучению способов устранения НС, изучению динамики каналов управления, изучению влияния значений управляющих воздействий на протекающие процессы для получения оптимальных качественных показателей готового продукта, отработке навы-

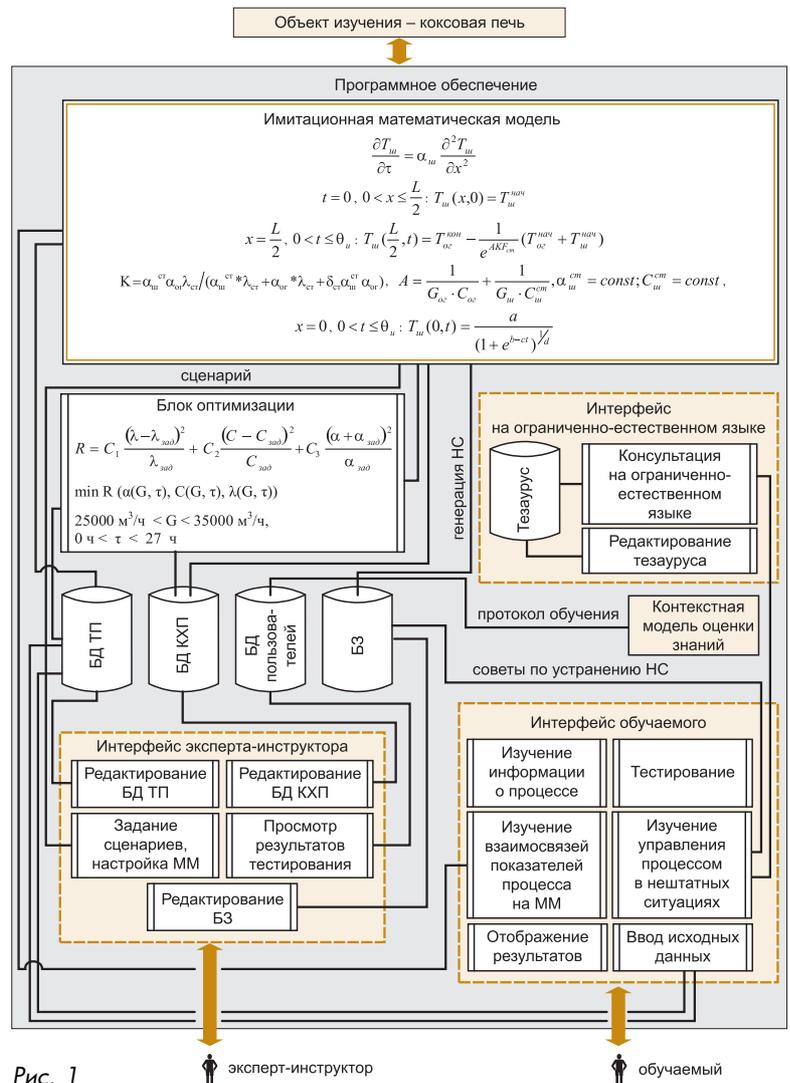


Рис. 1

ков устранения НС по заданным сценариям обучения, определению уровня полученных в ходе обучения знаний.

При разработке обучающего комплекса (рис. 1) решались следующие задачи: анализ процесса коксования как объекта управления и изучения; разработка структуры программного комплекса и алгоритма его функционирования; построение математической модели (ММ) для описания динамики протекающих процессов и выбор метода ее реализации; оценка адекватности полученной модели; тестирование работы программного комплекса для различных видов аппаратурно-технологического оформления коксовой печи и различных режимов функционирования (регламентного, нештатного).

Построение имитационной модели

Основой системы является имитационная модель, описывающая поведение объекта изучения в различных функциональных режимах. Анализ температурного режима коксовой печи как объекта управления позволил выделить основные переменные (входные, варьируемые, возмущающие и выходные) и формализовано описать ММ:

$$Y_M = f(X_M, U_M, A_M, t), \text{ где:}$$

1) $X_M = \{X_1, X_2\}$ – вектор входных параметров (X_1 и X_2); $X_1 = \{T_{ш}^{нач}, G_{ш}, C_{ш}^{cm}, \alpha_{ш}^{cm}, \delta_{куш}\}$, $X_2 = \{C_{оз}, \alpha_{оз}, T_{оз}^n, T_{оз}^k\}$, – характеристики шихты и отопительного газа соответственно ($T_{ш}^{нач}$ – начальная температура шихты; $G_{ш}$ – расход шихты; $C_{ш}^{cm}$ – теплоемкость шихты у стенки; $\alpha_{ш}^{cm}$ – коэффициент теплопроводности шихты у стенки; $\delta_{куш}$ – кажущийся удельный вес шихты);

2) $A_M = \{A_1, A_2\}$ – вектор параметров и коэффициентов модели, $A_1 = \{K, F_{cm}, L, \lambda_{cm}, \delta_{cm}\}$ и $A_2 = \{\alpha_{ш}\}$ – характеристики печи и шихты соответственно (K – коэффициент теплопередачи греющей стенки; F_{cm} – площадь греющей стенки; L – ширина камеры; λ_{cm} – теплопроводность стенки; δ_{cm} – толщина стенки);

3) $Y_M = \{\lambda, C_p, \alpha, \tau\}$ – вектор выходных параметров, λ – коэффициент теплопроводности готового кокса, C_p – удельная теплоемкость при постоянном давлении готового кокса, α – коэффициент теплопроводности готового кокса, τ – время проведения ТП;

4) $U_M = \{G_{оз}\}$ – вектор управляющего воздействия данной модели; $G_{оз}$ – расход отопительного газа.

Теплоемкость кокса зависит от содержания в нем углерода, летучих веществ и минеральных примесей.

Величина коэффициента теплопроводности является функцией теплопроводности самого органического вещества – кокса, примесей минеральных веществ, влажности и пористости. Увеличение коэффициента теплопроводности λ с температурой объясняется возрастанием лучистого теплообмена между стенками пор через разделяющие их поры, заполненные газом (воздухом).

Теплопроводность характеризует скорость изменения температуры в тепловых процессах, а ко-

эффициент теплопроводности α ($\text{м}^2/\text{ч}$) показывает, каким должно быть повышение температуры единицы объема тела при сообщении ему тепла, численно равного его теплопроводности:

$$\alpha_{ш} = \lambda_{ш}/C_{пу}\gamma_{куш}, \quad (1)$$

где $\lambda_{ш}$ – коэффициент теплопроводности шихты, $\text{ккал}/(\text{м}\cdot\text{ч}\cdot\text{град})$; $C_{пу}$ – удельная теплоемкость шихты при постоянном давлении, $\text{ккал}/\text{кг}\cdot\text{град}$; $\gamma_{куш}$ – кажущийся удельный вес шихты, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Рассмотрены зависимости коэффициентов тепло- и теплопроводности от температурного режима коксования [2]: $\lambda_{ш} = f(T)$, $C_{пу} = f(T)$.

Чтобы найти $\lambda_{ш}$, аппроксимировали кривую средней теплопроводности загрузки в зависимости от температуры в осевой плоскости средствами программы CurveExpert. В результате получено:

$$\lambda_{ш} \approx \frac{1}{a_0^1 + a_1^1 \cdot (T_{ш}^{он})^{a_2^1}}, \quad (2)$$

где $T_{ш}^{он}$ – температура шихты в осевой плоскости; a_0^1, a_1^1, a_2^1 – эмпирические коэффициенты, полученные аппроксимацией.

Аппроксимировав кривую зависимости средней удельной теплоемкости от температуры, получили

$$C_{пу} = a_0^2 + a_1^2 \cdot T_{ш}^{он} + a_2^2 \cdot T_{ш}^{он^2} + a_3^2 \cdot T_{ш}^{он^3}. \quad (3)$$

Поскольку k в рассматриваемой модели является входной контролируемой переменной, то из (2) и (3) получили зависимость:

$$\alpha_{ш} = \frac{(a_0^2 + a_1^2 \cdot T_{ш}^{он} + a_2^2 \cdot T_{ш}^{он^2} + a_3^2 \cdot T_{ш}^{он^3}) \cdot \gamma_{куш}}{a_0^1 + a_1^1 \cdot (T_{ш}^{он})^{a_2^1}} \quad (4)$$

Нагрев угольной загрузки в коксовых печах происходит в нестационарных условиях. Холодная шихта загружается в камеру, нагретую до высокой температуры. Температурное поле в коксующейся загрузке для любой точки по ширине камеры меняется во времени, также меняется и производная, характеризующая температурное поле. Передача тепла коксующейся шихте производится теплопередачей от греющей стенки отопительного канала. Передача тепла внутри загрузки коксующейся шихты осуществляется теплопроводностью.

При формулировке ММ температурного режима коксования использовались следующие допущения. Загрузка угольной шихты прогревается равномерно, за счет равномерности можно рассматривать только один поток, т.е. $1/2$ камеры, причем начало координат отсчитывается от середины камеры. Также принимаем, что потери тепла теплопередачей через греющую стенку и излучением с поверхности коксующейся шихты отсутствуют. ММ разрабатывается для одной камеры.

Нагрев угольной загрузки в узкой щелевидной камере подобен двустороннему нагреву плиты и описывается дифференциальным уравнением теплопроводности Фурье.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + q_V, \quad (5)$$

где q_V – внутренний источник тепла (в самом коксе, например, за счет трения частиц друг о друга при движении), т.к. его в данном процессе нет, то $q_V = 0$; $\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}$ – распределение тепла по высоте камеры; $\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}$ – распределение тепла по длине камеры, т.к. тепло передается только от стенок в x -плоскости, то исключаем из рассмотрения y и z составляющие; $\alpha(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2})$ – распределение тепла по ширине камеры.

Учитывая приведенные допущения, обобщенный вид ММ принимает вид:

$$\frac{\partial T_{ш}}{\partial t} = \alpha_{ш} \frac{\partial^2 T_{ш}}{\partial x^2}, \quad (6)$$

где $T_{ш}$ – температура в любой точке коксующейся шихты; $\alpha_{ш}$ – коэффициент температуропроводности:

$$\alpha_{ш} = \lambda_{ш} / C_{рш} \gamma_{кш}, \quad (7)$$

где $\lambda_{ш}$ – теплопроводность; $C_{рш}$ – удельная теплоемкость при постоянном давлении; $\gamma_{кш}$ – кажущийся удельный вес шихты.

Начальные и граничные условия протекания ТП:

1) если $t = 0, 0 < x \leq L/2$, тогда $T_{ш}(x, 0) = T_{ш}^{нач}$, (8)

где t – время коксования; x – расстояние точки от оси камеры; L – ширина камеры; $T_{ш}^{нач}$ – начальная температура шихты;

2) если $x = \frac{L}{2}, 0 < t \leq \theta_u$,

$$\text{тогда } T_{ш}\left(\frac{L}{2}, t\right) = T_{оз}^{кон} - \frac{1}{e^{AKF_{cm}}} (T_{оз}^{нач} + T_{ш}^{нач}) \quad (9)$$

где $T_{оз}^{кон}$ – конечная температура отопительного газа; K – коэффициент теплопередачи греющей стенки; F_{cm} – площадь греющей стенки; $T_{оз}^{нач}$ – начальная температура отопительного газа (ОГ).

$$K = \alpha_{ш}^{cm} \cdot \alpha_{оз} \cdot \lambda_{cm} / (\alpha_{ш}^{cm} \cdot \lambda_{cm} + \alpha_{оз} \cdot \lambda_{cm} + \delta \cdot \alpha_{ш}^{cm} \cdot \alpha_{оз}), \quad (10)$$

где $\alpha_{ш}^{cm}$ – коэффициент температуропроводности шихты у стенки; $\alpha_{оз}$ – коэффициент температуропроводности отопительного газа; λ_{cm} – теплопроводность стенки; δ_{cm} – толщина стенки.

$$A = \frac{1}{G_{оз} \cdot C_{оз}} + \frac{1}{G_{ш} \cdot C_{ш}^{cm}}, \quad (11)$$

где $G_{оз}$ – расход отопительного газа; $C_{оз}$ – теплоемкость ОГ; $G_{ш}$ – расход шихты; $C_{ш}^{cm}$ – теплоемкость шихты у стенки.

$$\alpha_{ш}^{cm} = const; C_{ш}^{cm} = const; \quad (12)$$

3) если $x = 0, 0 < t \leq \theta_u$, тогда $T_{ш}(0, t) = \frac{a}{(1 + e^{b-ct})^d}$, (13)

где a, b, c, d – эмпирические коэффициенты, полученные аппроксимацией.

Решение (6) при условиях (7-13) позволяет определить время проведения процесса при заданных рас-

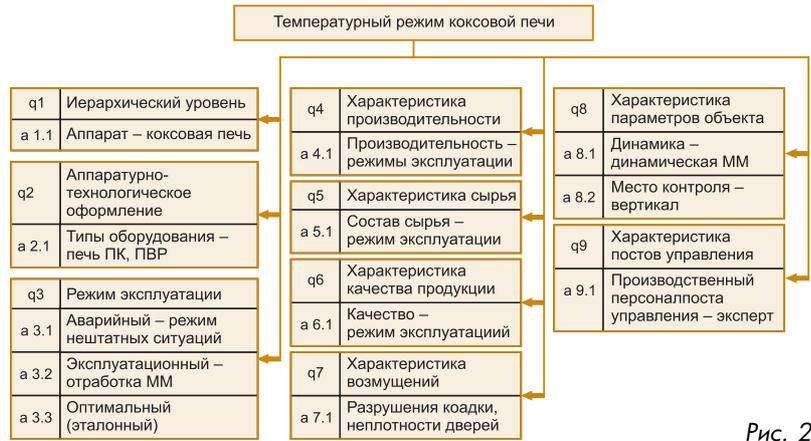


Рис. 2

ходах шихты, отопительного газа и конструктивных характеристиках печи (ширины камеры, толщины стенки, материала, из которого изготовлена стенка) и температуру кокса при окончании процесса коксования, а также получить оценки тепловых свойств кокса по зависимостям (2-4).

Для решения задачи теплопроводности с переменным коэффициентом α (6-13) был использован метод сеток, так как он экономичен при программной реализации и гарантирует устойчивость полученного решения при соответствующем соотношении шагов сетки.

Для применения разностной аппроксимации все параметры системы были приведены к безразмерному виду и введена сетка в области изменения аргументов (t – время процесса, x – расстояние от стенки греющей камеры до осевой плоскости). Для определения числа узлов сетки задается время протекания процесса t в диапазоне 13...27 ч, затем задаются шаги по времени τ и ширине камеры $x-h$, что позволяет определить соответственно число временных слоев n и слоев шихты k , для которых будет производиться расчет. После этого формируется система алгебраических уравнений для $n+1$ временного слоя, которая решается методом прогонки. На каждом последующем шаге происходит перерасчет коэффициента температуропроводности шихты α .

Анализ температурного режима коксовой печи как объекта изучения показывает, что его описание может быть представлено в словесной структурно-классификационной форме иерархических знаний. Структурно-лингвистическая модель представления знаний об объекте аналогична фрейму. Приведенный на рис. 2 фрейм-пример отображает знания о конкретных объектах изучения и тренажа (температурном режиме коксовой печи).

Выбранный метод построения ММ реализован в среде Borland C++ Builder.

Архитектура программного комплекса

Программная реализация обучающего комплекса включает блоки: имитационной ММ; поиска оптимальных значений управляющих воздействий; БД технологических параметров (ТПр) и конструктивных характеристик печей; модели представления зна-

ний о возможных типовых нарушениях функционирования объекта изучения; представления декларативных знаний для пассивного изучения процесса; контроля полученных знаний; активной отработки навыков управления процессом в различных режимах функционирования; контекстной модели оценки полученных знаний, а также средства задания сценариев обучения и необходимые интерфейсы.

Информационное обеспечение разработанной системы включает БД ТПр и конструктивных характеристик печей (БД КХП), базу знаний НС (БЗ НС). Информационное обеспечение реализовано с учетом требования адаптивности, предъявляемого к системе управления, что позволяет решать функциональные задачи управления. БД ТПр и БД КХП реализованы в среде Microsoft Office Access. БД ТПр содержит информацию о названии ТПр, его текущее значение и предельные значения. В БД КХП содержатся наименования печи, ширина печи, конструктивные особенности коксовых печей (тип кирпича использованного в кладке), теплопроводность огнеупорного материала (коэффициент теплопроводности кладки печи).

Данные в БД ТПр заносятся после запуска программы, при вводе исходных данных с клавиатуры или автоматического их ввода из программы. Обмен данными между модулями программы происходит через БД ТПр. В БД КХП в настоящее время содержится описание пяти типов различных печей, в дальнейшем планируется ее расширение. Средства задания сценариев используют информацию, хранящуюся в БД КХП, для настройки системы на конкретный тип печи.

Для моделирования НС было систематизировано описание типовых нарушений и причин, их вызывающих. НС подразделяются по типу нарушаемых пороговых ограничений параметров на: *эксплуатационные* (нарушения оптимальных, допустимых эксплуатационных норм) и *аварийные* (нарушения аварийных, предаварийных норм). К эксплуатационным НС могут быть отнесены ситуации, когда при заданных векторах X , A недостижима возможность получения кокса с заданными тепловыми свойствами Y_0 . К аварийным НС относятся нарушения, при которых может произойти разрушение кладки печи. На расход отопительного газа в процессе коксования накладываются ограничения, связанные с особенностями и сроком эксплуатации теплотехнических агрегатов. Поэтому к разряду НС в данной модели могут быть отнесены решения, оптимальные с точки зрения свойств кокса, но выходящие за рамки ограничений, накладываемых на G_{oe} .

Формализованное представление НС может быть представлено в виде вектора:

$$NS = \{Sit, Prich = \{(A_1 | A_2 | X_1 | X_2), t\}, Sov\},$$

где *Sit* – описание НС, *Prich* – причина ситуации, *Sov* – совет оператору с рекомендациями о действиях в НС.

База знаний НС содержит описание основных НС, возможных при управлении объектом, причины их возникновения и рекомендации по устранению.

Описание НС содержится в технологическом регламенте и относится к классу продукционных знаний. Интеллектуальная подсистема реализована с помощью логической модели представления знаний на основе исчисления предикатов I порядка в среде Visual Prolog. Система содержит модули, позволяющие оценивать произошедшие НС в режиме диалога, а также редактировать БЗ.

Редактор базы знаний и базы правил предоставляет возможности изменения и дополнения исходной информации при появлении новых сведений об изучаемом процессе. Наличие этого модуля в системе обеспечивает ее открытость и обучаемость.

Моделирование НС в разработанной системе достигается путем задания соответствующих значений входным переменным и настроечным коэффициентам ММ в заданный момент времени. С помощью средств задания сценариев обучения инструктор может ввести описание нескольких причин с заданием времени от момента начала расчета выходных значений по ММ. Например, к возникновению эксплуатационной НС "снижение коэффициента теплопроводности кокса" может привести несколько причин, в том числе "низкая теплоемкость шихты", "снижение коэффициента теплопроводности греющей стенки", "начальная температура шихты недостаточна для соблюдения режима коксования", которые могут быть заданы соответственно значениями $C_w^{cm}(X_1^3)$, $\lambda_{cm}(A_1^4)$, $T_w^{naq}(X_1^3)$. Кроме отработки навыков управления при возникновении НС по заданному сценарию, обучаемый может изучать причинно-следственные связи объекта изучения простым изменением исходных данных ММ. Если при расчете параметров их значения выйдут за критическую область, то система обнаружит НС, и в экспертной системе (ЭС) откроется окно консультации с описанием причин возникновения НС и рекомендаций по устранению.

Модуль оптимизации разработан для расчета оптимальных значений управляющих воздействий для получения кокса заданного качества. Рассчитываемый критерий эффективности показывает степень отклонения свойств полученного кокса от идеальных значений:

$$R = C_1 \frac{(\lambda - \lambda_{зад})^2}{\lambda_{зад}} + C_2 \frac{(C - C_{зад})^2}{C_{зад}} + C_3 \frac{(\alpha - \alpha_{зад})^2}{\alpha_{зад}},$$

где C_1, C_2, C_3 – весовые коэффициенты нормированных частных критериев.

Задача оптимизации температурного режима коксовой печи сформулирована в виде:

$$\min R(\alpha(G, \tau), C(G, \tau), \lambda(G, \tau)),$$

где $25000 \text{ м}^3/\text{ч} < G < 35000 \text{ м}^3/\text{ч}$, $0 \text{ ч} < \tau < 27 \text{ ч}$, R – целевая функция, G_{oe} и τ – управляющие воздействия.

Коэффициенты C_1, C_2, C_3 позволяют учитывать значимость частных критериев в составе аддитивного и задаются пользователем в зависимости от текущих потребностей исследования.

Зависимости (2), (4) для расчета тепловых характеристик кокса носят нелинейный характер, поэтому

задача оптимизации характеризуется как нелинейная с ограничениями типа неравенств. Для ее решения был выбран комплекс-метод Бокса.

Кроме оптимальных значений критерия и доставляющих его значений управляющих воздействий обучаемому выдается информация о достижимости поставленных значений качественных характеристик кокса и рекомендации по дальнейшему управлению. Таким образом, обучаемый получает возможность исследовать влияние каналов управления как на качество протекающих процессов в целом, так и по каждому из частных критериев.

Интерфейсы

В разработанной системе имитационного моделирования реализованы в зависимости от полномочий пользователя следующие интерфейсы:

- оператора, обеспечивающий обмен информацией между непрограммирующим пользователем и системой, то есть он должен предоставлять возможность внесения изменения в БД ТПр для моделирования НС и формирования запросов для поиска решения с измененными исходными значениями контролируемых параметров. На рис. 3. приведен пример графического интерфейса обучаемого с результатами расчета зависимости температуры в осевой плоскости коксового пирога и распределения температур по ширине камеры на момент окончания процесса;
- инструктора, который имеет доступ к созданию, заполнению и редактированию БЗ НС, механизму формирования сценария обучения и просмотру результатов оценки знаний;
- межпрограммный, реализованный с использованием технологии DDE, предназначен для интеграции данных ММ и ЭС, выполненных в различных программных средах. Главное его назначение — связь между аварийными значениями параметров в ММ и НС в ЭС;
- ограниченно-естественный, позволяющий вести диалог человек-машина на привычном языке запросов, близком по структуре к фразам на естественном языке. Для реализации интерфейса на ограниченно-естественном языке разработан язык тезаурус, включающий типовые запросы пользователя, и словарь. Все функции ПО естественно-языкового интерфейса реализованы в среде Visual Prolog.

Алгоритм изучения температурного режима коксовой печи

На основе анализа литературных источников, описывающих возможные варианты построения обучающих систем, предложен алгоритм изучения температурного режима коксовой печи (рис. 4).

Перед началом работы система запрашивает полномочия, которыми обладает пользователь. Она выделяет права эксперта-инструктора и обучаемого. Эксперт-инструктор настраивает систему на работу с обучаемым (задает настройки печи, вносит коррективы в БЗ НС, если необходимо, и задает сценарии).

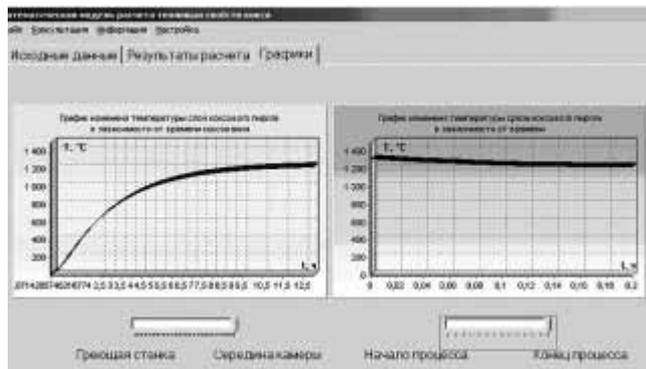


Рис. 3

парт-инструктор настраивает систему на работу с обучаемым (задает настройки печи, вносит коррективы в БЗ НС, если необходимо, и задает сценарии).

Обучаемый должен зарегистрироваться в системе. После подтверждения ввода в регистрационный журнал (БД пользователей) вносится запись с личными данными обучаемого, системной датой и временем обращения к системе. Далее обучаемый получает возможность доступа к системе в режиме обучения. Ему предоставляется возможность выбора направления работы:

- изучать декларативные знания о процессе коксования;
- изменять параметры процесса и изучать с их помощью режимы функционирования ММ;
- изучать НС (на естественном языке);
- отрабатывать навыки устранения НС на функционирующей ММ.

В конце осуществляется проверка знаний, полученных в ходе работы с системой.

В разрабатываемых интеллектуальных системах обучения применяются пять распространенных методов определения уровня подготовки обучаемого персонала: регистрация полученных знаний; оценка знаний по контекстной модели (уровень знаний обучаемого определяется на основании диалога с ним и ана-

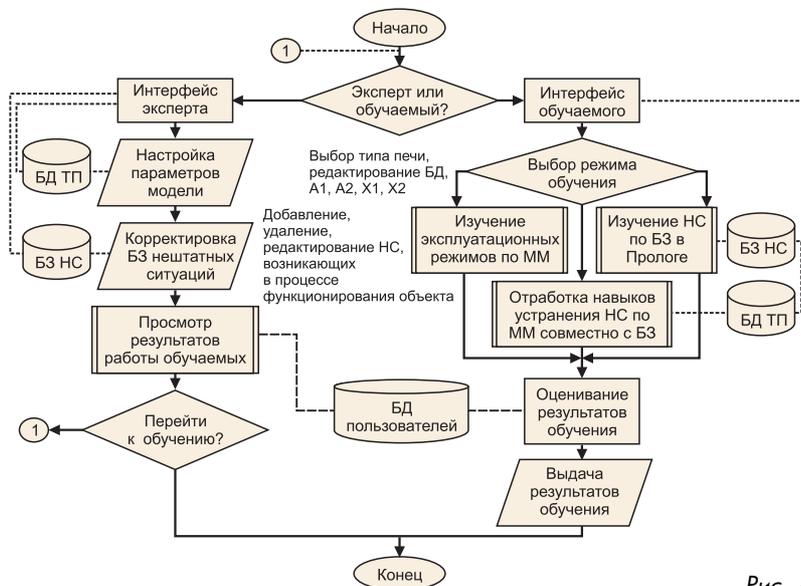


Рис. 4

лиза задаваемых вопросов); *анализ ошибок* (оценка по числу допущенных ошибок и характеру отличий знаний об объекте обучения по сравнению с уровнем знаний опытных специалистов); метод *наложения* (уровень знаний обучаемого рассматривается как некоторое подмножество знаний эксперта, при совпадении знания факторов и правил управления объектом со знаниями эксперта считается, что обучаемый знает эти способы управления, разделы знаний); *порождающее* моделирование (оценка знаний обучаемого через его намерения, используемые для управления; на основании намерений организуется автоматизированное обучение – план событий, имитационное моделирование, сценарий, проверяется глубина знаний и намерений после реализации плана и т.д.) [3].

Для разработанной системы был выбран метод оценки знаний по контекстной модели – компьютерное тестирование. При разработке тестового задания всем вопросам были назначены коэффициенты сложности, и при выставлении оценки учитывается время, затраченное, чтобы ответить на вопросы различной степени сложности. Информация об обучаемом вносится в БД пользователей, доступной для просмотра эксперту-инструктору.

Заключение

Рассмотренная имитационная модель позволяет исследовать температурный режим коксования с

точки зрения равномерности прогрева загрузки коксующейся шихты и прогнозирования тепловых свойств кокса. Разработанная система имитационного моделирования коксовой печи позволяет решать основные функциональные задачи управления температурным режимом коксования, исследовать температурный режим коксовой печи, моделировать НС, обучать операторов управлению объектом в различных режимах функционирования (эксплуатационном и нештатном).

Разработанный обучающий комплекс успешно применяется в учебном процессе кафедры "Системы автоматизированного проектирования и управления" СПбГТИ(ТУ) и рекомендован к внедрению на коксохимические производства для тренинга операторов печей.

Список литературы

1. Чистякова Т.Б., Бойкова О.Г., Блохина О.Ф. Принципы разработки интеллектуальных тренажерно-обучающих комплексов для операторов потенциально опасных химико-технологических процессов (на примере процесса коксования углей) // Автоматизация в промышленности. 2003. №4.
2. Справочник по химии и технологии горючих ископаемых / Под ред. А.Н. Чистякова. СПб.: "Синтез". 1996.
3. Чистякова Т.Б., Бойкова О.Г. Алгоритмическое обеспечение гибридной экспертной системы для управления процессами коксования // Приборы и системы управления. 1999. №11.

*Чистякова Тамара Балабековна – д-р техн. наук, проф., заведующая кафедрой,
Бойкова Оксана Геннадьевна – канд. техн. наук, старший преподаватель,*

*Бабина Елена Венадиевна – инженер кафедры систем автоматизированного проектирования и управления
Санкт-Петербургского государственного технологического института (технический университет).*

Контактный телефон (812)495-75-70. E-mail: sapr@ws01.sapr.pu.ru

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МОНИТОРИНГА ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

Г.В. Бушмелева (ГОУ ВПО "Ижевский государственный технический университет")

Представлена методика мониторинга промышленного предприятия, апробированная на данных статистики промышленных предприятий Удмуртской республики.

Мониторинг промышленного предприятия – это система поддержки принятия решений, направленная на информационное обеспечение и повышение эффективности этого процесса, а также качества принимаемых решений.

Экономико-математическое и инструментальное обеспечение мониторинга промышленного предприятия требует разработки и адаптации особого аппарата моделирования, отвечающего его задачам как обобщенного метода экономических и маркетинговых измерений, анализа и регулирования. Реализовать экономико-математическое обеспечение мониторинга можно в виде имитационной модели для различных уровней управления предприятия.

В связи с тем, что оценка состояния промышленного предприятия должна осуществляться в сжатые сроки и регулярно, основными требованиями к методике мониторинга являются комплексность, опера-

тивность, эффективность, не противоречивость. Требования учтены при разработке экономико-математической модели мониторинга в табличном процессоре Excel.

Практика показывает, что мониторинг промышленного предприятия следует проводить в несколько этапов. Рассмотрим этапы предложенной методики на примере одного из предприятий.

Этап 1. Определение факторов, оказывающих влияние на состояние промышленного предприятия; отбор существенных показатели, формирующих систему показателей.

Для выполнения этого этапа необходимо сформировать перечень показателей мониторинга, которые должны соответствовать целям промышленного предприятия. Целью предприятия может быть, например, получение прибыли за счет использования маркетинговых возможностей предприятия. Исходя