

# КОМПЬЮТЕРНЫЕ ТРЕНАЖЕРНЫЕ КОМПЛЕКСЫ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССАМИ ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА

О.В. Ершова

Рассмотрены вопросы разработки компьютерных тренажерных комплексов, предназначенных для обучения персонала и повышения эффективности управления электротермическим процессом на примере производства карбида кальция. Предложена структура комплексов, охарактеризованы функциональные компоненты, обеспечивающие приобретение навыков эффективного управления и контроль знаний.

**Ключевые слова:** компьютерный тренажерный комплекс, обучаемый инструктор, управление, электротермическое производство.

## ВВЕДЕНИЕ

Спад производства в различных отраслях отечественной промышленности, обусловленный сложной экономической ситуацией последних лет, усугубляется в условиях финансового кризиса. Износ оборудования, недостаточное финансирование мероприятий по модернизации производства путем автоматизации различных уровней управления и внедрения современных программно-аппаратных средств, а иногда, к сожалению, и закрытие крупных и мелких предприятий и заводов, делают задачу возрождения отечественной промышленности особенно актуальной.

Современные химические производства, в том числе электротермические, характеризуются совокупностью сложного аппаратного оформления технологических процессов (ТП) и систем управления. К тому же происходит ужесточение требований к повышению надежности, безопасности эксплуатации производств и к качеству продукции, что требует улучшения качества управления процессами. Эффективность функционирования производств во многом зависит от квалификации производственного персонала различных категорий, осуществляющего их эксплуатацию и принимающего решения по управлению. Подготовка и переподготовку квалифицированных кадров необходимо проводить с использованием достижений в области компьютерных технологий и средств обучения.

В настоящее время подготовка персонала во многих отраслях осуществляется с помощью компьютерных тренажеров (КТ) и автоматизированных систем обучения, что соответствует сложившейся общемировой практике образования, поскольку применение в учебном процессе реального оборудования требует больших затрат или невозможно.

Разработка и внедрение на предприятиях эффективных средств обучения для повышения уровня квалификации персонала, который складывается из объема знаний, навыков и умений, приобретается в процессе обучения, регламентируется федеральным законом № 116 «О промышленной безопасности производственных объектов» от 20 июня 1997 г.

Современные КТ должны обеспечивать углубленный тренинг операторов сложных ТП в управлении установками, давая практический опыт работы в разнообразных ситуациях: нормальные технологические условия при различных производительностях установок и свойствах сырья; нарушения технологических режимов и сбой в работе оборудования; плановые и аварийные остановы; переходы на новые технологические режимы. Компьютерные тренажеры незаменимы для вновь строящихся и кардинально реконструируемых установок, однако и в условиях уже функционирующего глубоко автоматизированного технологического объекта тренажеры необходимы, чтобы в отсутствие аварийных ситуаций не позволить операторам



утерять навыки управления. Важно также обеспечить на основе КТ возможность оценки навыков и профессиональных умений операторов для их последующей тарификации и сертификации [1].

Анализ состояния российской электротермической промышленности показал, что в этой отрасли КТ не нашли широкого применения по различным причинам. А учитывая сложность и потенциальную опасность этих производств, актуальность разработки соответствующих компьютерных тренажерных комплексов (КТК) для подготовки квалифицированного персонала очевидна.

Разработка КТК для подготовки оперативно-технического персонала электротермических производств осуществлялась в соответствии со следующими принципами [2]: описание ТП как системы обучения и тренажа; описание типовой структуры КТК, включающей в себя компоненты, решающие задачи обучения, тренажа и управления в зависимости от характеристик объекта; разработка моделей объекта, в том числе для представления неформализованных знаний, информационных и математических моделей, необходимых для изучения причинно-следственных связей в объекте изучения и управления, а также для овладения навыками безаварийного управления, прогнозирования и устранения нарушений; разработка алгоритмов управления, направленных на улучшение технологических и технико-экономических показателей производства; разработка интерфейса обучаемого, позволяющего приобретать навыки управления различным категориям персонала при различных режимах функционирования объекта; разработка интерфейса инструктора, включающего в себя сценарии обучения, модель контроля знаний, позволяющую инструктору иметь объективные количественные и качественные оценки знаний обучаемых, протокол обучения, алгоритмы настройки КТК в зависимости от знаний обучаемых и для различных режимов эксплуатации объекта управления.

Целесообразно интегрировать тренажерные комплексы в АСУТП, при этом заложенные в них алгоритмы управления будут пригодны для применения в процессе работы АСУТП.

### 1. ХАРАКТЕРИСТИКА ПРЕДМЕТНОЙ ОБЛАСТИ

Вопросы разработки КТК рассматриваются на примере электротермического производства карбида кальция [3]. Процесс реализуется в электродуговых печах и включает в себя стадии подготовки сырья и электродной массы, подготовку шихты (смеси сырьевых компонентов в определенной пропорции), производство целевого продукта в ванне печи под действием высокой температуры,

очистку от печных газов, выпуск побочного продукта — ферросплава.

При описании ТП как системы обучения и тренажа необходимо учитывать такие его признаки: особенности аппаратно-технологического оформления объекта; характеристики режимов эксплуатации объекта (аварийные, регламентные, оптимальные); характеристику режимов функционирования объекта в зависимости от состава сырья и требуемой производительности; характеристику возмущающих воздействий и др.

### 2. ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

Начальный этап разработки КТК состоит в структуризации информации в целях создания информационного обеспечения и разработки базы данных (БД), в которой параметры ТП классифицированы и хранятся в различных таблицах как входные, управляющие и выходные [4]. В БД содержится информация о характеристиках сырья, его расходах, геометрических размерах и мощности печи (входные параметры), о качестве и количестве целевого и побочных продуктов, производительности, электрических показателях (выходные параметры), пороговые ограничения для всех параметров.

Для описания экспертных знаний и данных эксплуатации объекта при изучении типовых нестандартных ситуаций (НС), необходима база знаний (БЗ), которая содержит перечень ситуаций, причины возникновения и рекомендации по их устранению. Классификация ситуаций в БЗ осуществляется сочетанием параметров БД, описывающих каждую ситуацию. По мере необходимости БД и БЗ могут обновляться и дополняться.

### 3. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

Параметры связаны математической моделью (ММ) процесса, включающей в себя уравнения, отражающие зависимость выходных параметров от входных, учитывающие химические реакции и их кинетические характеристики, распределение энергопотоков в подэлектродном пространстве ванны печи, взаимосвязь электрических параметров.

Задача синтеза ММ заключается в определении ее структуры, которой соответствуют рассчитанные по модели выходные параметры, описывающие объект изучения и управления с допустимой точностью в области адекватности, задаваемой настройками объекта, архитектурой и параметрами тренажера, обеспечивая интеграцию модели в структуру тренажерного комплекса.

Процесс получения карбида кальция следует охарактеризовать как массо-теплообменный про-

цесс, осложненный химической реакцией [3]. Трудность динамического моделирования процесса возникает из-за напряженности электрического поля, изменения размеров и агрегатного состояния слоев в зоне реакций, их перемешивания и взаимодействия. Учитывая, что на границах зон основные параметры меняются скачкообразно, а внутри зон эти параметры связаны, возможно позонное моделирование. Поэтому для разработки модели процесса, отражающей зависимость качества продукта от качества и количества сырья, необходим анализ механизма химического взаимодействия основных компонентов: кокса (С) и извести (СаО), а затем расчет многокомпонентного материально-энергетического баланса и учет кинетических характеристик процесса для определения времени образования целевого продукта.

В результате расчета материального баланса, учитывающего реакции взаимодействия основных компонентов, входящих в исходное сырье, и реакции восстановления примесей сырья, образования шлака и металла, определяются расходы кокса и извести для производства продукта требуемого качества.

Уравнения материального баланса имеют вид:

$$\sum_{pr=1}^z Y_{pr} C_j^{pr} = \sum_{s=1}^m X_s C_j^s,$$

где  $X_s$  — количество сырья, поступающего с шихтой (расход), т/ч;  $s = \overline{1, m}$ , где  $m$  — число входных потоков — компонентов шихты и вспомогательных материалов;  $C_j^s$  — концентрация  $j$ -го химического компонента в  $s$ -м входном потоке (химический состав сырья), %;  $j = \overline{1, n}$ , где  $n$  — число химических компонентов, участвующих в реакциях взаимодействия при производстве продукта;  $Y_{pr}$  — количество целевого и побочных продуктов реакции, т/ч;  $pr = \overline{1, z}$ , где  $z$  — число продуктов реакции;  $C_j^{pr}$  — концентрация  $j$ -го химического компонента в  $pr$ -м целевом и побочных продуктах реакции (качество продукта), %.

По энергетическому балансу учитывается расход электроэнергии, который зависит от мощности печи, качества карбида кальция и качества сырья. Энергетический баланс учитывает расход энергии на основные и побочные реакции, нагрев продуктов: карбида, металла, газа, пыли, плавление карбида и металла, сгорание углеродистого материала в печи, тепловые и электрические потери. Сумма всех расходов дает удельный расход электроэнергии на одну тонну карбида кальция заданного качества [3].

Кинетические закономерности гетерогенных процессов, протекающих при образовании карби-

да кальция, моделировались, исходя из следующих функциональных зависимостей:

- взаимодействие извести с расплавом  $dC/d\tau = -K_u S_u (C_p - C_T)$ , где  $dC/d\tau$  — скорость процесса растворения извести;  $K_u$  — константа скорости,  $\text{с}^{-1}\text{см}^{-2}$ ;  $S_u$  — поверхность контакта,  $\text{см}^2$ ;  $C_p$  — предельная концентрация карбида кальция (СаС<sub>2</sub>, %) в расплаве в момент опускания в него извести, определялась путем изменения концентрации карбида кальция в расплаве при заданной температуре;  $C_T$  — текущая концентрация карбида кальция (СаС<sub>2</sub>, %) в расплаве;
- взаимодействие углеродистого восстановителя с расплавом

$$dC/d\tau = K_y (C_p - C_T)^n,$$

где  $dC/d\tau$  — скорость процесса восстановления;  $n$  — кажущийся порядок процесса;  $K_y$  — константа скорости,  $\text{с}^{-1}\text{см}^{-2}$ ;  $C_p$  — предельная концентрация карбида кальция (СаС<sub>2</sub>, %) в расплаве в момент опускания в него кусков восстановителя при заданной температуре;  $C_T$  — текущая концентрация карбида кальция (СаС<sub>2</sub>, %) в расплаве.

Для решения дифференциальных уравнений был применен численный метод Рунге—Кутты, обеспечивающий устойчивое и точное решение.

В результате решения уравнений кинетики определяется время образования и, соответственно, время слива целевого продукта. В процессе управления карбидной печью при изменении типа сырья корректируется режим слива произведенного карбида кальция.

По алгоритмам управления определяются значения управляющих воздействий (расходы сырья и положение электрода), обеспечивающие оптимальный режим ТП. В качестве критериев оптимизации целесообразно принять производительность печной установки, качество целевого продукта или прибыль, значения которых необходимо максимизировать при соблюдении ограничений на изменения параметров.

Модель представления знаний представляет собой систематизированное словесное описание объекта обучения. Она описывает нештатные ситуации, позволяет выявлять причины их возникновения и предлагает рекомендации по их устранению для нормализации режима работы объекта. Данная модель разработана на основе анализа данных эксплуатации объекта, знаний экспертов, знаний и опыта высококвалифицированных химиков-технологов и операторов по поведению в нештатных ситуациях.

Таким образом, математическое описание процесса получения карбида кальция разработано на



основе анализа физико-химических свойств процесса, включает в себя уравнения материального и энергетического балансов процесса, реакции взаимодействия основных компонентов и примесей, формализацию экспертных знаний, описание кинетических зависимостей, алгоритмы решения математической модели.

Математическая модель позволяет определять параметры процесса, обеспечивающие регламентные (требуемые) режимные показатели, и обучать операторов управлению процессом в различных режимах, например, при различной производительности или при использовании различного сырья.

#### 4. ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

Для проектирования и эксплуатации АСУТП в настоящее время широко применяется SCADA-системы (системы диспетчерского управления и сбора данных), поэтому было решено, что целесообразно применить их и для разработки ТК, поскольку обучаемый (оператор) будет управлять процессом посредством автоматизированного рабочего места (АРМ) оператора, созданного средствами соответствующей SCADA-системы.

Программные продукты класса SCADA широко представлены на мировом рынке. Это десятки SCADA-систем, многие из которых нашли применение в России. Наиболее популярные из них InTouch («Wonderware», США); Citect («CI Technology», Австралия), iFIX («Intellution, США), Genesis («Iconics Co», США), RealFlex («BJ Software Systems», США), Sitex («Jade Software», Великобритания), Simplicity («GE Fanuc», США), TraceMode («AdAstrA», Россия) и др.

В качестве инструмента для создания программного обеспечения (ПО) тренажерного комплекса была выбрана SCADA-система InTouch фирмы «Wonderware» — одна из самых распространенных и имеющая большое число инсталляций в мире. Преимущество InTouch перед другими SCADA-системами заключается в следующем: простота освоения и эксплуатации, доступность; функциональность; открытость; наличие объектно-ориентированной графики, широкого спектра анимационных функций; возможность применения шаблонов при создании объектов приложения; наличие библиотеки мастер-объектов и др.

На основании опыта работ и анализа литературных источников определены последовательность разработки и функционально-информационная структура КТК, реализованная средствами SCADA-системы InTouch. Разработка КТК осуществлялась по следующим этапам. Вначале был изучен ТП и проведена классификация всех параметров процесса при рассмотрении его как объекта изучения и управления. На этом этапе опреде-

лялись диапазоны изменений значений технологических параметров (регламентные, аварийные) в аспекте возникновения возможных НС, поскольку важная задача обучения операторов заключается в приобретении навыков поведения в НС. В результате этого этапа разработана БД с соответствующими пороговыми ограничениями, выходы за которые имитируют возникновение НС. Отображение информации осуществлялось с помощью имеющихся в системе InTouch средств визуализации: анимации, временных графиков, динамических элементов отображения и управления и др.

Функционально-информационная структура программного обеспечения тренажерных комплексов представлена на рис. 1.

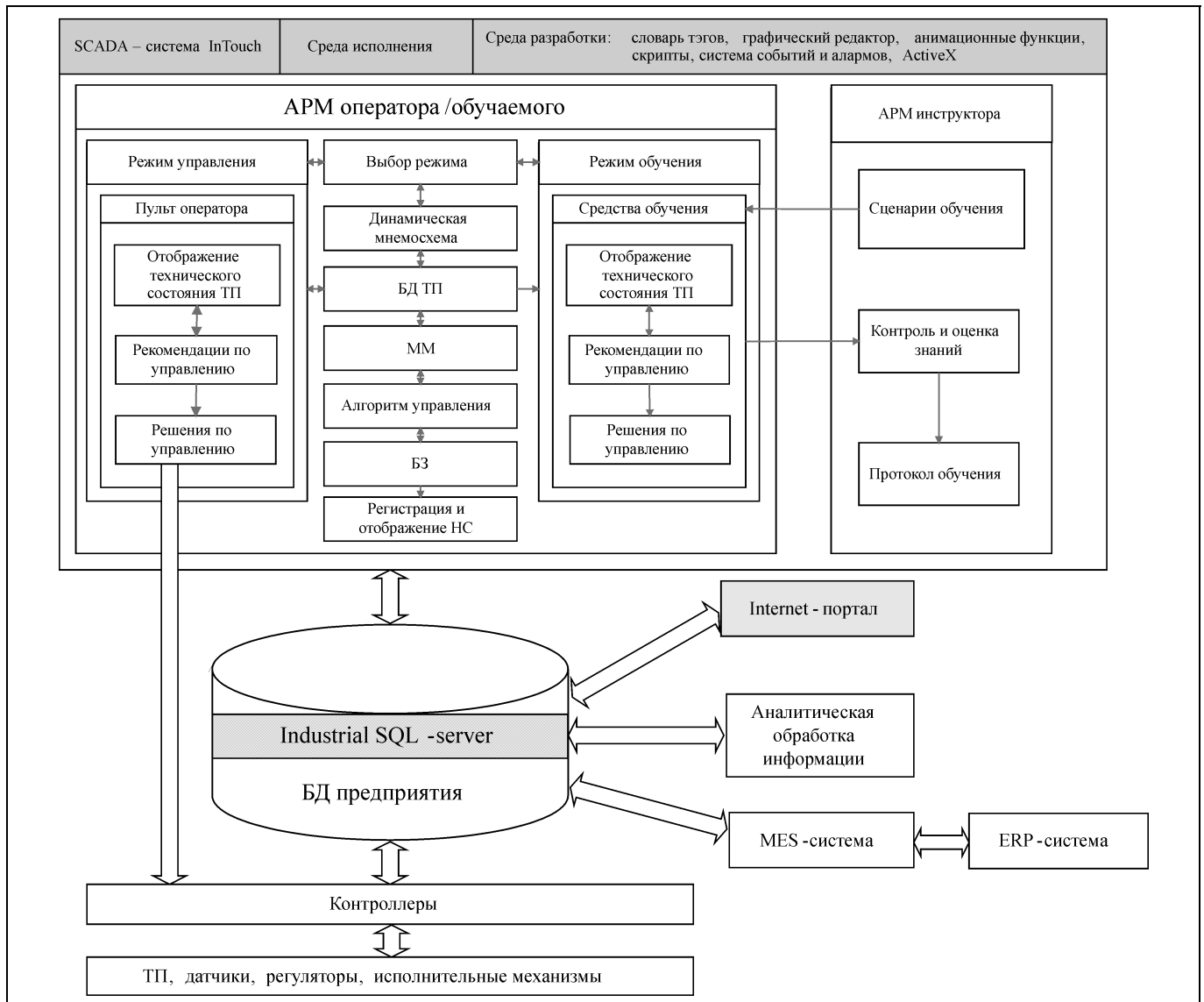
При реализации задач обучения объект управления представлен различными типами моделей. Для активного обучения управлению в регламентном режиме используется математическая модель (см п. математическое обеспечение), которая позволяет определять значения управляющих воздействий, обеспечивающих наилучшие значения технологических и технико-экономических показателей в соответствии с критериями эффективности функционирования ТП. Модель представления знаний используется для изучения типовых нештатных ситуаций, позволяет выявлять причины возникновения и предлагает рекомендации по их устранению для нормализации режима работы объекта.

Техническая структура распределенного КТК (рис. 2) включает в себя компоненты, разработанные в пакете Wonderware Development Studio: сервер Wonderware Historian («Industrial SQL Server»); Terminal Serves for InTouch, для организации работы обучаемых как «тонких клиентов»; АРМ обучаемых и инструктора, реализованные в InTouch.

Взаимодействие приложений инструктора и обучаемого осуществляется по сети Ethernet. Программный компонент Wonderware Historian («Industrial SQL Server») предназначен для хранения большого объема необходимых данных о текущих значениях параметров в компактном виде, их пороговых ограничениях, истории ТП и др.

Интерфейс (АРМ) обучаемого представлен набором динамических мнемосхем, таблицами значений исходных данных и результатов расчета, графиками реального времени, отображающими динамику изменения параметров. Интерфейс позволяет обучаемому наблюдать за процессом при изменении значений внешних воздействий, изучать их влияние на режимные параметры и качество целевого продукта, изменять значения управляющих воздействий при отклонении режима от регламентных показателей, т. е. выступать в роли оператора, управляющего реальной установкой.





**Рис. 1. Функционально-информационная структура программного обеспечения тренажерных комплексов в среде SCADA-системы InTouch:**  
 — инструментальные средства;  — элементы разработанного ПО

Для организации и контроля процесса обучения предназначено АРМ инструктора. При разработке интерфейса инструктора использовались средства сигнализации, графического отображения информации, а также встроенная система событий и алармов InTouch. В составе Интерфейса инструктора имеются модуль настройки (число обучаемых, имена компьютеров обучаемых, выбор и изменение последовательности возникновения ситуаций, времени обучения) и модуль контроля знаний (имя обучаемого, результаты обучения, оценка, протокол обучения — все действия обучаемого и время обучения, время устранения ситуации). Инструктор определяет динамику процесса в соответствии со сценариями обучения или внося в

него возмущающие воздействия, имитируя возникновение штатных и нештатных ситуаций по своему усмотрению. У инструктора есть возможность настройки сценариев обучения с учетом индивидуальных психофизиологических особенностей обучаемого, например, путем изменения времени обучения или повторения имитации ситуаций, с которыми обучаемый не «справился» ранее. Он может задавать значения переменных из таблиц исходных данных, посылать сообщения, содержащие советы и рекомендации, на компьютер обучаемого. При этом все значения параметров по «команде» инструктора передаются в приложение обучаемого. Действия обучаемого заносятся в протокол обучения.

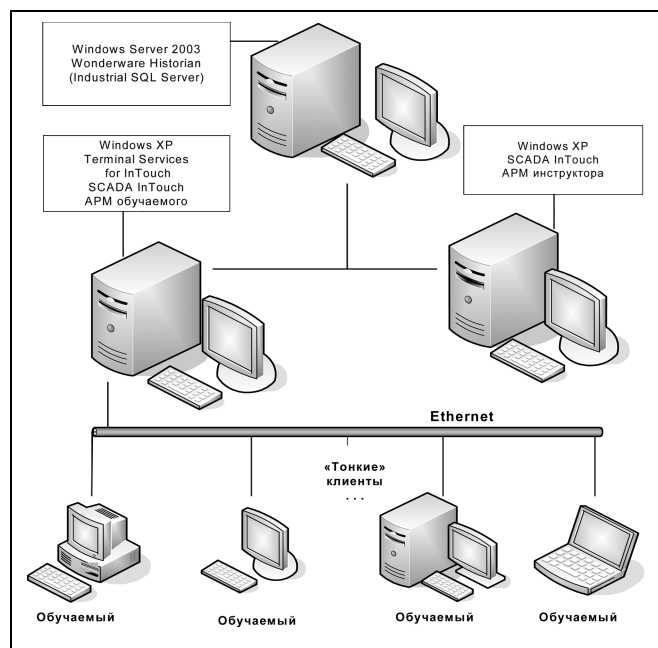


Рис. 2. Техническая структура распределенного КТК

В тренажерном комплексе предусмотрены различные варианты обучения:

- изучение теоретического материала с помощью информационно-справочной системы;
- изучение печной установки по ее трехмерной модели, разработанной в SolidWorks;
- тестирование знаний по теоретическому материалу и поведению персонала в аварийных ситуациях с помощью тестовой системы;
- изучение АРМ обучаемого, изучение ТП посредством мнемосхемы, ознакомление с вложенными окнами и динамическими элементами отображения и управления, возможность изменения значений управляющих воздействий в зависимости от значений выходных показателей и просмотра текущих значений параметров БД;
- настройка системы на конкретный печной агрегат (геометрия, мощность, производительность);
- настройка ограничений и регламентных значений технологических параметров БД;
- изучение причинно-следственных связей процесса (влияние входных параметров и управляющих воздействий на выходные) в штатных ситуациях, т. е. в режиме «свободного» обучения в целях изучения стандартных процедур управления и работы вблизи нормального технологического режима;
- приобретение навыков поведения в режиме нештатных ситуаций;
- работа по самостоятельно выбранному сценарию обучения, который моделирует возникновение НС, при этом обучаемому выдается окно, со-

держащее информацию о причинах ее возникновения, и предлагаются варианты по ее устранению;

- работа по заданному инструктором сценарию обучения.

Описанные функциональные компоненты КТК предназначены для организации процесса обучения с помощью существующих в настоящее время современных программно-аппаратных средств. При появлении новых версий среды разработки созданное ПО сохраняет свою работоспособность и, в случае необходимости, может быть модернизировано.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Реализация тренажерных комплексов в средах SCADA-систем обеспечивает повышение эффективности управления благодаря обучению персонала с помощью современных средств визуализации, различных методик обучения, приближения интерфейса обучаемого к промышленному интерфейсу оператора, который часто реализован в SCADA, приобретения и закрепления в процессе обучения навыков принятия верных решений по управлению при эксплуатации производства, ускорения реакции при возникновении нештатных ситуаций, снижения ошибок.

Тренажерные комплексы позволяют обучать операторов «с нуля», пополнять знания и приобретать необходимые навыки управления операторам, не имеющим большого опыта, а опытному персоналу повышать свою квалификацию.

Методика синтеза тренажерных комплексов протестирована на примере процессов производства карбида кальция и фосфора. Разработанные комплексы имеют свидетельства об официальной регистрации программных продуктов, прошли апробацию в учебном процессе и получили положительную экспертную оценку.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Дозорцев В.М. Компьютерные тренажеры для обучения операторов технологических процессов. — М.: СИНТЕГ, 2009. — 372 с.
2. Чистякова Т.Б. Интеллектуальные автоматизированные тренажерно-обучающие комплексы в системах управления потенциально-опасными химическими производствами: автореф. дис... д-ра техн. наук. — СПб.: СПбГТИ (ТУ), 1997.
3. Ершова О.В. Система управления процессом получения карбида кальция: автореф. дис... канд. техн. наук. СПб.: СПбГТИ (ТУ), 1996.
4. Ершова О.В., Лавров А.Б., Чистякова Т.Б. Технология разработки программного обеспечения тренажерных комплексов операторов электротермических производств // Автоматизация в промышленности. — 2005. — № 8. — С. 38.

Статья представлена к публикации членом редколлегии Э.Л. Ицковичем.

Ершова Ольга Владимировна — канд. техн. наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет), ☎ (812) 494-93-70, ✉ erol@rambler.ru.