

## ТИПОВОЙ КОМПЬЮТЕРНЫЙ ТРЕНАЖЕРНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ОБУЧЕНИЯ ОПЕРАТОРОВ ТП

В.М. Дозорцев, Д.В. Кнеллер  
(ИПУ РАН)

Показано, что компьютерные тренажеры – одно из наиболее эффективных средств обучения оперативного персонала методам безопасного и качественного ведения ТП. Рассмотрены назначение, функции и состав типового компьютерного тренажерного комплекса. Представлена тренажерная платформа КТК-М, реализующая указанные функции.

### Введение

Возрастающий интерес промышленности к современным средствам подготовки оперативного персонала объясняется увеличивающейся сложностью ТП и систем управления (СУ) и, как следствие, нарастающей опасностью производства, связанной с так называемым "человеческим фактором". Анализ промышленной аварийности [1] в нефтепереработке и нефтехимии свидетельствует о чрезвычайно высокой доле ошибок персонала в общем числе аварий и аварийных инцидентов (25...55% в зависимости от типа производства и стоимости аварии), что в абсолютных единицах составляет более 1 млн. долл. США в год в расчете на средний по производительности нефтеперерабатывающий завод [2].

Последнее десятилетие отмечено широким распространением систем компьютерного тренинга операторов ТП, ставшим возможным благодаря качественно новым информационным технологиям. Это касается всех традиционно выделяемых компонент тренажерных систем – имитационных моделей ТП, информационных моделей (операторских интерфейсов) и моделей обучения, реализуемых с помощью современных компьютерных средств автоматизированного инструктирования. В то же время, огромное разнообразие и сложность ТП делают такие продукты, возможно, самыми дорогими средствами обучения и технологического инжиниринга. Самый свежий пример – компьютерный тренажерный комплекс ценой почти в 2 млн. долл. США, заказанный глиноземным комбинатом CAR (Австралия) одному из главных мировых производителей тренажерных систем – фирме Honeywell [3].

В этих условиях, несмотря на высокую потенциальную эффективность, само существование компьютерного тренинга как направления научно-технических разработок возможно лишь при построении *типового* компьютерного тренажера, в котором достигалась бы максимальная алгоритмизация (и отчасти – автоматизация) создания отдельных технических компонентов [4]. Собственно по такому пути и идет мировое тренажеростроение для ТП: наряду с уникальными комплексами разрабатываются относительно недорогие тренажерные платформы. Особенно это актуально для современных российских условий.

В работах [2, 5] показана техническая возможность и экономическая целесообразность построения типового тренажера. Цель настоящей статьи – вооружить потенциальных пользователей тренажерных систем четким пониманием их назначения, информационной и технической структуры, принципов и опыта их практического применения.

### Структура типового тренажерного комплекса

При разработке типового тренажера принципиальными представляются следующие положения:

- навыки приобретаются обучаемыми в процессе специфической деятельности, состав которой моделирует практическую работу по управлению динамически развивающимся технологическим объектом;

- функционально-информационная структура тренажера должна соответствовать содержанию задачи формирования указанных навыков;

- тренажер должен быть снабжен исчерпывающим набором тренировочных и аварийных упражнений на ведение ТП в нормальных, предаварийных

и аварийных ситуациях, а также при типовых отказах и нарушениях в работе оборудования и СУ, гарантирующим полноту приобретаемых обучаемым навыков;

- тренинг должен предусматривать режим самостоятельной работы обучаемого, а также обучение с активным участием инструктора.

Функционально-информационная схема типового тренажера представлена на рис. 1. Она содержит пользовательские интерфейсы обучаемого и инструктора и модель технической системы, которая, в свою очередь, состоит из модели СУ и модели управляемого технологического объекта. В последней выделяются модели: исполнительных механизмов, ТП и системы измерения и преобразования информации.

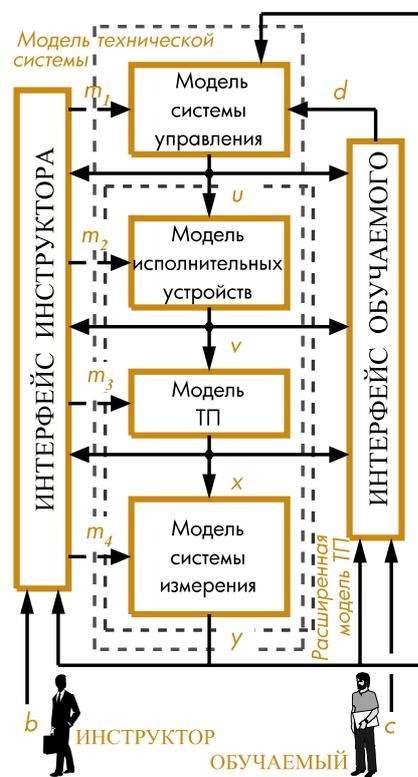


Рис. 1. Функционально-информационная схема типового тренажерного комплекса

Интерфейсы в тренажере строятся с учетом специфики функций пользователя с выделением уровней Представления информации и Диалога, отвечающего за взаимодействие пользователя со всеми связанными элементами тренажерной человеко-машинной системы [6]. В интерфейсе обучаемого вмешательства оператора в работу технической системы  $c$  перерабатываются в выходные переменные интерфейса обучаемого  $d$  и передаются в моделируемую СУ. В свою очередь в интерфейс обучаемого возвращаются управляющие сигналы  $u$  и смоделированные показания измерительных приборов  $y$ .

Структура технической системы позволяет стандартизовать многие этапы построения тренажера за счет выделения типовых элементов, подлежащих конфигурированию в конкретных тренажерных системах, и уникальных компонентов, прежде всего — математических моделей разнообразных ТП. Модель СУ перерабатывает команды обучаемого  $d$  и сигналы наблюдений  $y$  в управляющие сигналы  $u$  с учетом возможных вмешательств инструктора в работу системы управления  $m_1$ . Далее модель исполнительных механизмов с учетом возможных инструкторских вмешательств  $m_2$  вырабатывает фактические положения непрерывных и дискретных исполнительных механизмов  $v$ , необходимые моделям процесса и системы измерения. В свою очередь эти сигналы в модели ТП преобразуются в значения физических потоков (расходов) и выходных физических переменных технологического объекта  $x$  (температур, уровней, давлений, составов и пр.). При этом учитываются возможные вмешательства инструктора  $m_3$ , имитирующие нарушения работы оборудования, изменения характеристик сырья, внешних условий и т.д. Наконец, в модели измерительной системы сигналы  $u$  и  $x$  преобразуются в сигналы наблюдений  $y$  с учетом вмешательств инструктора  $m_4$ , имитирующих разнообразные отказы контрольно-измерительной аппаратуры.

Инструкторский интерфейс типового тренажера обеспечивает осуществление необходимых в тренинге задач автоматизированного инструктирования — контроля работы ТП и системы управления, отслеживания действий оператора, вмешательства в работу технической системы, ведения, просмотра и анализа протоколов тренинга, смены начальных условий, записи и активизации текущих состояний технической системы, анализа результатов тренинга и квалификации обучаемых [6]. В инструкторском интерфейсе также выделяются уровни Представления информации и Диалога, причем вектор инструкторских воздействий  $b$  трансформируется в доступные соответствующим элементам технической системы вмешательства  $M = \{m_1, m_2, m_3, m_4\}$ . В свою очередь, инструктор через свой интерфейс имеет доступ ко всем сигналам, вырабатываемым технической системой, и к управляющим воздействиям обучаемого  $d$ .

#### КТК-М — тренажерный комплекс для обучения оперативного персонала

Ниже описывается современная тренажерная платформа, сертифицированная под названием КТК-М — многофункциональный компьютерный тренажерный комплекс и реализованная на базе локальной сети ПК (рис. 2).

Платформа предусматривает как возможность связи с операторскими интерфейсами микропроцессорных систем управления и промышленной автоматизации (PCU, ПЛК, SCADA-системы), так и эмулирование компьютерных операторских интерфейсов. Возможно объединение в сеть

станции инструктора и нескольких станций оператора, работающих одновременно с разными тренажерными моделями. ПО КТК-М выполнено на языке C++. Платформа обладает существенными вычислительными возможностями для моделирования. Так, модель, содержащая порядка 2...3 тысяч дифференциальных и несколько тысяч алгебраических уравнений, разрешается с быстродействием до 100 раз в секунду. Это позволяет моделировать крупные технологические объекты, например, установки первичной переработки нефти или установки каталитического риформинга с предварительной гидроочисткой сырья и стабилизацией конечного продукта [7].

#### Рабочая станция обучаемого

Использование в тренажерах реальных операторских интерфейсов получает все большее распространение и, несомненно, станет основной формой реализации рабочей станции обучаемого (PCO) по мере углубления стандартизации самих микропроцессорных СУ. Но сегодня такое решение всякий раз сопряжено с трудоемкой разработкой протокола обмена данными между собственно тренажером и системами визуализации, используемыми в реальных СУ. В этих условиях с позиций построения типового тренажера практический интерес представляет реализация операторской станции путем эмуляции операторского интерфейса.

Точность эмуляции операторского интерфейса в КТК-М создает достаточную для целей обучения степень подобия реальной управляющей среде. Комплекс снабжен конфигуратором эму-

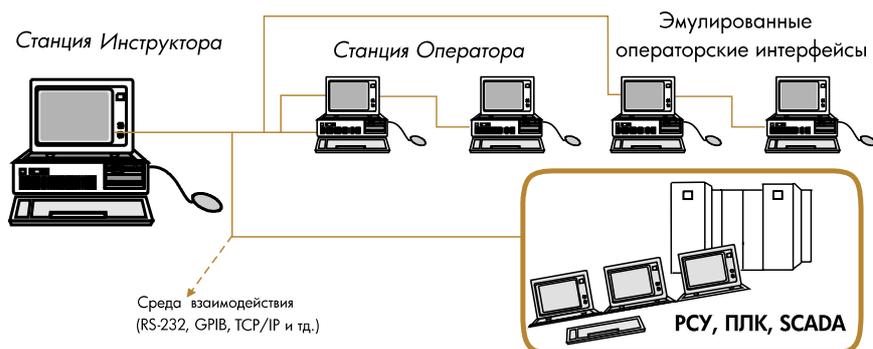


Рис. 2. Структура тренажерного комплекса КТК-М

лируемых интерфейсов, обеспечивающим следующие основные свойства операторских интерфейсов РСУ:

- удобное, соответствующее принятым стандартам отображение информации о моделируемом ТП и управление им;

- иерархию экранных форм, позволяющую быстро найти информацию нужного уровня и типа;

- использование цвета, звука и пульсации изображения для выделения информации об отклонениях текущих значений переменных от нормальных;

- настройку системы базового регулирования и усовершенствованного управления в рамках, принятых в реальной СУ;

- представление информации о ТП в виде значений его параметров (в цифровой и графической форме) и графиков изменения этих значений во времени (исторических трендов);

- ведение журнала сообщений обо всех нарушениях нормального технологического режима.

Конфигуратор позволяет разработчику создавать версии операторского интерфейса, отвечающие особенностям конкретным технологическим объектам и СУ. Кроме того, *КТК-М* снабжен *типовым операторским интерфейсом*, содержащим все необходимые элементы информации о ТП и средства управления им. В типовом интерфейсе оператор получает информацию о ТП на четырех уровнях: в обзорах, зонах, группах и деталях. *Обзоры* позволяют оператору легко выбрать и одним действием перейти в любую другую экранную форму, представленную в данном обзоре, или в другой обзор, а также одним взглядом оценить наличие в каждом из экранов, составляющих данный обзор, отклонений переменных от их нормальных значений. *Зоны* представляют относительно крупные участки ТП (такие, как, например, вакуумный блок установки первичной переработки нефти или коксовые камеры установки замедленного коксования). Обычно они отображают не-

сколько десятков взаимосвязанных технологических аппаратов и дают оператору возможность оценить состояние такого участка в целом. *Группы* представляют состояние менее крупных, чем зоны, участков ТП. Группа насчитывает обычно незначительное число технологических аппаратов (иногда даже один, например, печь), но при этом дает оператору более подробную информацию о ТП. Наконец, *детали* позволяют оператору отслеживать и изменять в рамках своей компетенции все конфигурируемые параметры для отдельного датчика или регулятора.

В свою очередь два средних уровня информации – зоны и группы – представлены в типовом интерфейсе четырьмя *типами* кадров: схемами, статусами, трендами и перечнями сигнализаций. *Схемы* – графическое представление отдельных участков ТП с изображениями основных потоков и аппаратов и отображением текущих значений измеряемых переменных и состояний дискретных органов управления. Представление информации здесь – цифровое (показания приборов) и графическое (уровни в емкостях, состояние насосов, положение клапанов и т. п.). *Статусы* в типовом интерфейсе являются аналогом приборного щита, привычного операторам с опытом щитового управления процессами. Кадры *трендов* содержат графическое отражение изменений параметров во времени и снабжают оператора информацией для анализа динамики ТП. Наконец, перечни *сигнализаций* содержат сообщения обо всех отклонениях хода ТП от нормального режима вплоть до текущего момента. Примеры информационных кадров типового интерфейса приведены на рис. 3.

#### Рабочая станция инструктора

Рабочая станция инструктора (РСИ) в *КТК-М* обладает как традиционными, так и специализированными функциями автоматизированного инструктирования. РСИ позволяет инструктору запускать в работу различные модели, менять условия их функционирования (на-

чальные состояния), имитировать отказы технологического оборудования и систем управления, просматривать тренды параметров, запоминать различные состояния моделируемого процесса, составлять и реализовывать упорядоченные во времени сценарии вмешательств в ход ТП, а также выполнять другие действия в процессе обучения.

При наличии в тренажерном комплексе нескольких РСО инструктор может одновременно контролировать их все, размещая поступающую от них информацию в различных окнах своего экрана. Примеры информационных кадров инструктора представлены на рис. 4.

Помимо перечисленных РСИ реализует следующие функции:

- запуск и остановка моделирования;

- просмотр переменных ТП;
- просмотр регулирующих позиций ТП;

- создание, выбор и активизация "моментальных снимков" состояния ТП;

- изменение скорости моделирования;

- активизация функций удаленного управления;

- создание, редактирование и отработка сценариев обучения;

- составление и хранение протокола сеанса обучения.

Благодаря возможности оперативно запоминать и активизировать любые динамические состояния моделируемого ТП, а также создавать, запоминать и запускать сложные последовательности вмешательств в его ход ("сценарии") инструктор имеет в своем распоряжении мощное средство аккумуляции опыта обучения и развития его методической базы. *КТК-М* является, таким образом, открытой системой, расширяемой и совершенствуемой пользователем по мере накопления опыта обучения и появления изменений в самом ТП и системе управления или новых методов эффективной и безопасной работы.

#### Тренажерная модель

Библиотека тренажерных моделей *КТК-М* создана на базе объектно-ориентированного подхода.

Модели технологических аппаратов и их элементов, измерительных приборов, регуляторов и т.п. реализованы в виде библиотеки классов языка C++. Использование свойств инкапсуляции и полиморфизма, которыми обладает этот язык, открывает удобные возможности модификации библиотеки и приспособления уже созданных классов к новым требованиям. Большинство разработанных классов можно условно отнести к следующим трем группам:

- "Вещества" – начиная с базового класса "абстрактного вещества", осуществляется переход ко все более конкретизированным классам, с учетом необходимых специфических свойств и физических законов;

- "Потоки" используют "Вещества" и также имеют различный уровень абстракции – от потока с единственной характеристикой расхода до многокомпонентного двух- или трехфазного потока (с автоматическим пересчетом соотношения фаз и энтальпии в зависимости от давления, температуры, состава и т. д.);

- "Аппараты" описывают технологические аппараты, куда входят и откуда выходят потоки и в которых происходят изменения свойств веществ (температуры, состава), а также изменения масс и химические реакции между веществами. К аппаратам относятся емкости, теплообменники, колонны, экстракторы, печи и т.д. При моделировании аппаратов также используются иерархии классов. Так, например, класс "многопроходная печь-нагреватель" может быть реализована в виде цепочки "тепловой элемент – однопроходная печь – многопроходная печь".

В качестве примера, рассмотрим элементы библиотеки классов, используемые при моделировании типовой установки каталитического риформинга бензинов. Такая установка обычно включает в себя 4...5 реакторов, 2...4 печи, 10...15 теплообменников, примерно столько же воздушных и водяных холодильников, 2...4 дистилляционных колонны, а также многочисленные

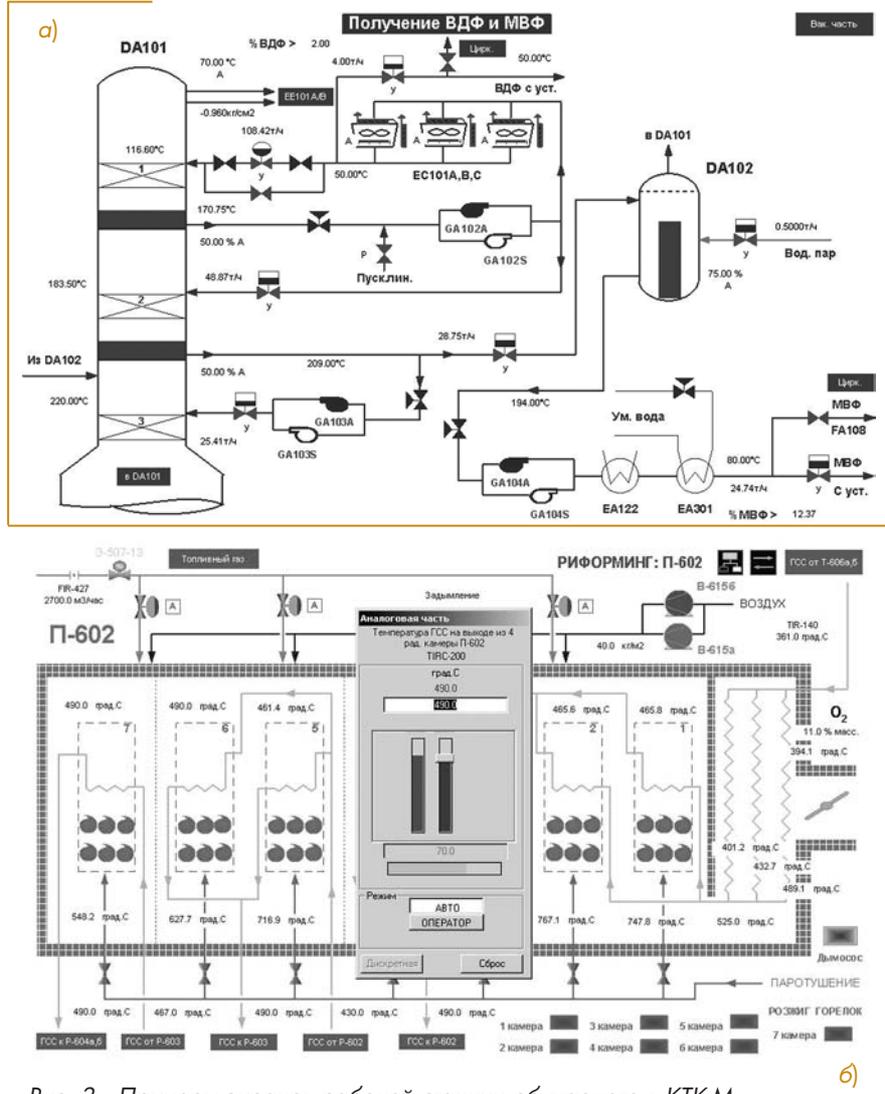


Рис. 3. Примеры экранов рабочей станции обучаемого в КТК-М

сепараторы, емкости, ротационное оборудование (компрессоры, насосы) и т. п. Весь ТП характеризуется сотнями динамических переменных (расходов, температур, давлений, уровней, составов) и параметров (геометрических, механических и термодинамических). Динамические свойства каждого аппарата и установки в целом описываются системой уравнений гидравлики, химической кинетики, материального и энергетического балансов. В целом, описание установки включает несколько сот нелинейных дифференциальных и алгебраических уравнений. Модель реализует 30...60 позиций непрерывного управления (ПИД-регуляторы в локальном и дистанционном режимах), 50...100 дискретных управлений (двух-

и многопозиционные переключатели), а также до 250 измеряемых сигналов и имитируемых результатов лабораторных анализов. Применение объектно-ориентированного подхода позволяет "собрать" модель в виде набора экземпляров нескольких производных классов (построенных, в свою очередь, на основе более простых): "реактор гидроочистки", "реактор риформинга", "теплообменник", "холодильник", "печь", "тарелка дистилляционной колонны", "сепаратор", "гидравлическая сеть" и др. При конфигурировании модели создается столько экземпляров, например, класса "холодильник", сколько имеется холодильников на реальной установке, а заданием соответствующих параметров можно, превратить "абстрактный холо-

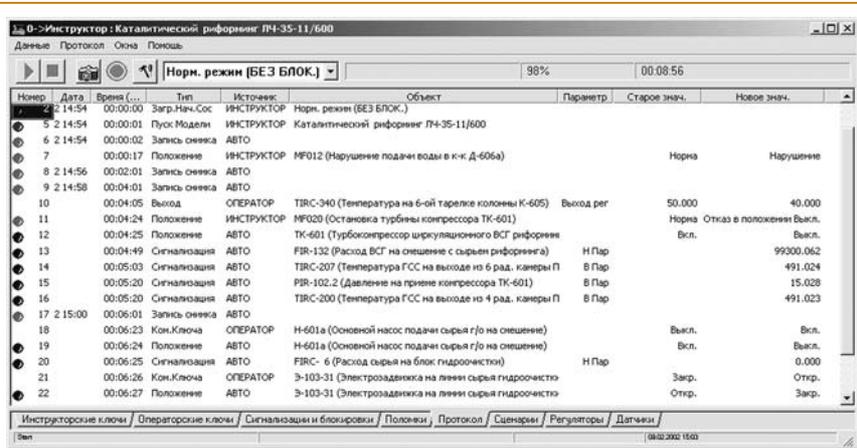
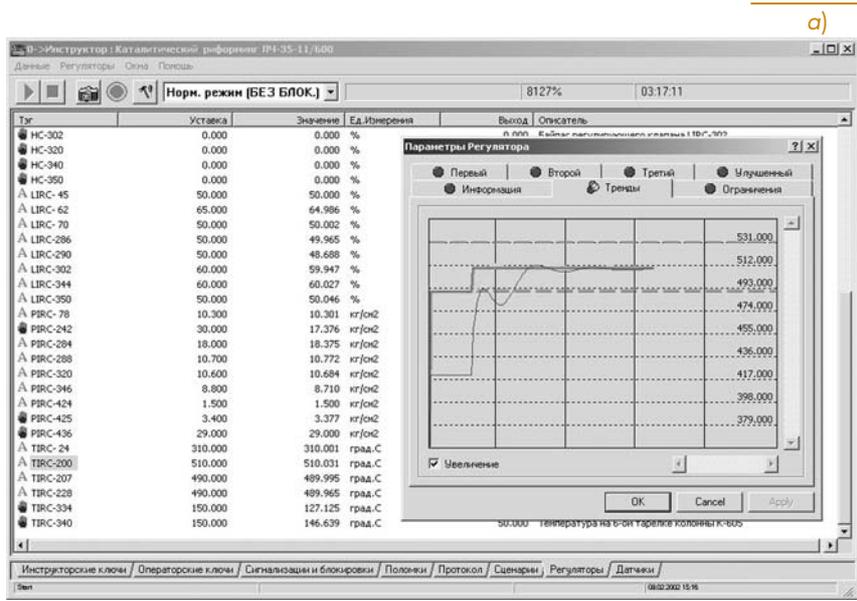


Рис. 4. Примеры экранов рабочей станции инструктора в КТК-М

дильник” в воздушный или водяной и задать его тепловые характеристики (как статические, так и динамические). К указанным классам добавляются также стандартные классы из библиотек средств измерения и управления, используемых во всех моделях КТК-М. Таким образом, основные усилия разработчика переносятся на настройку глобальных динамических свойств тренажерной модели ТП, собранной из заранее созданных (и, при необходимости, модифицированных для нужд конкретного проекта) элементов.

**Методика обучения**

Методическая база компьютерного тренинга на КТК-М опирается на механизмы формирования и переноса операторских навыков, обоснованные в работе [8]. Основные

черты такого подхода сводятся к следующему:

- комплексное умение безопасного и эффективного управления ТП складывается и, следовательно, должно формироваться путем интегрирования нескольких базовых навыков, разнородных по содержанию ведущих когнитивных процессов и механизму переработки информации;
- каждый из базовых навыков реализуется в практической деятельности и приобретается в процессе обучения в форме системы с обратной связью, содержащей различные элементы моделируемой технической системы и мысленные концепты оператора;
- компьютерный тренинг должен охватывать тренировку по отдельным базовым навыкам и по комплексному умению,

а также учитывать необходимость повышения внутренней мотивации обучаемого;

- основной прием тренинга навыков обнаружения отклонений и диагностирования их причин состоит в предъявлении обучаемому симптомов тех или иных нарушений. При этом существующие у оператора эталоны нормального состояния процесса позволяют ему сначала детектировать отклонения от нормы, а затем, используя процедуру генерации и проверки гипотез, установить их причины;

- основополагающий механизм диагностики нарушений базируется на двух навыках: прогнозировании последствий вмешательства в ход процесса, известных обучаемому, и поиске причин, вызвавших наблюдаемые симптомы. Каждый из этих навыков формируется сначала отдельно, с помощью специальных упражнений, в которых оператору предлагается заранее зафиксировать прогноз, а затем проверить его, проигрывая ситуацию на тренажере.

Описанный подход реализован в автоматизированных системах обучения АФОН (Автоматизированное Формирование базовых Навыков) и ДИАГНОСТ, являющихся составной частью тренажерной платформы КТК-М. Обе системы используют базу знаний, формируемую путем обобщения известных типовых нарушений хода ТП, анализа таких нарушений на реальных технологических установках, моделирования этих ситуаций на компьютерном тренажере и привлечения экспертных оценок специалистов. База знаний представляет собой легко пополняемый список причин нарушений хода ТП с порождаемыми ими симптомами.

Развитием и расширением системы АФОН является система ПЛАС+, обеспечивающая автоматизированное формирование навыка безопасного управления ТП по планам локализации аварийных ситуаций [9].

Наличие в составе тренажерной платформы вышеописанных систем превращает КТК-М в перспективное типовое средство автоматизированного обучения оперативного персонала потенциально опасных ТП.

*Беспокойство – это неудовлетворенность, а неудовлетворенность –  
первейшее условие прогресса.* Т. Эдисон

#### Заключение

В течение 1996-2002 гг. на базе КТК-М осуществлено несколько крупных проектов на российских предприятиях нефтяного комплекса: тренажер для операторов трех технологических установок производства ароматических углеводородов Омского НПЗ; тренажер операторов установки синтеза полиэтилена высокого давления (ПЭВД) Ангарской НХК, тренажеры для операторов четырех установок Волгоградского и шести установок Пермского НПЗ; тренажеры для операторов технологических установок Саратовского, Хабаровского и Комсомольского-на-Амуре НПЗ и др. Руководители предприятий отмечают существенное повышение уровня подготовки персонала, качества и эффективности ведения ТП, снижение аварийности производства и, как следствие, подтверждают серьезный экономический эффект от использования компьютерного тренинга.

Интерес отечественной промышленности к тренажерным системам для обучения операторов

очевиден. Технические, методические и организационные (в том числе, законодательные) предпосылки для широко оснащения производства тренажерами – на-

лицо; проблема состоит в обеспечении достаточного качественного уровня систем за приемлемую цену. Представляется, что выход состоит в использовании типовых тренажерных решений, одно из которых было представлено выше.

#### Список литературы

1. *Largest Losses: A Thirty-Year Review of Property Damage Losses in the Hydrocarbon – Chemical Industries* // MM Protection Consultants, 9-15 Ed., Chicago, 1986/93.
2. *Дозорцев В.М., Шестаков Н.В.* Компьютерные тренажеры для производств химико-технологического типа: эффективность, окупаемость // Проблемы безопасности при чрезвычайных ситуациях. 1997. № 7.
3. *Comalco Orders Shadow Plant Simulator* // Honeywell Industry Solutions Journal, October 2002, Issue 9.
4. *Malik T.I.* Process Training Simulators (PTS) – A Comparison of Different Types // Measurement & Control. Vol. 28. Dec/Jan 1995/96.
5. *Дозорцев В.М.* Специфика компьютерных тренажеров для обучения операторов технологических процессов (Сравнение с развитыми направлениями компьютерного тренинга) // Тр. ИПУ РАН, т.8. 2000.
6. *Дозорцев В.М.* Структура человеко-машинного взаимодействия в компьютерных тренажерах операторов технологических процессов // Приборы и системы управления. 1998. № 5.
7. *Кнеллер Д.В.* Компьютерный тренажер для обучения операторов установок каталитического риформинга бензинов // Матер. VIII Межд. конф. "Проблемы управления безопасностью сложных систем", Москва, 2000.
8. *Дозорцев В.М.* Обучение операторов технологических процессов на базе компьютерных тренажеров // Приборы и системы управления. 1999. №8.
9. *Дозорцев В.М.* Особенности компьютерного тренинга операторов потенциально-опасных технологических объектов действиями в предаварийных и аварийных ситуациях // Матер. VII Межд. конф. "Проблемы управления безопасностью сложных систем". Москва. 1999.

*Дозорцев Виктор Михайлович – д-р техн. наук, зав. сектором,*

*Кнеллер Дмитрий Владимирович – канд. техн. наук, ст. научный сотрудник*

*Института проблем управления РАН. E-mail: victor@petrocom-jv.ru, dvk@petrocom-jv.ru*

## ПОСТРОЕНИЕ ЭФФЕКТИВНЫХ ПРОМЫШЛЕННЫХ АСУТП ПО ПРИНЦИПУ ДЕТСКОГО КОНСТРУКТОРА

**Д.П. Станковский (Промышленная группа "Метран")**

*Рассматривается полномасштабная АСУТП DeltaV, реализующая архитектуру PlantWeb™ и использующая преимущества интеллектуального оборудования и передовых программных продуктов. Показано, что DeltaV обеспечивает революционно новый уровень информационной интеграции на уровне интеллектуальных полевых устройств и на предприятии в целом. Подчеркивается простота эксплуатации системы.*

Сегодняшние предприятия представляют собой сложнейшие технические структуры с тысячами, десятками тысяч точек измерения. Вовремя отследить, обработать, проанализировать всю информацию без современных передовых технологий измерения практически невозможно. Управление процессом должно быть надежным и предсказуемым, с минимальными эксплуатационными затратами при максимальном использовании имеющихся ресурсов.

Оптимальная производительность и эффективность производственного комплекса определяется проектом и выбором оборудования. Тем не менее, во многих случаях в производственном процессе не удается реализовать все мощности, изначально за-

ложенные по проекту. Причина низкой производительности обусловлена возможностями традиционных АСУ и состоянием полевых приборов, не способных работать в расчетном режиме. Часто возникают ситуации, когда временных и людских ресурсов оказывается едва достаточно для устранения серьезных неполадок, обнаруженных в течение суток, что ухудшает качество продукции и ограничивает производственную мощность комплекса.

Для решения подобных вопросов используются современные концепции автоматизации, базирующиеся на интеллектуальных приборах и коммуникационных протоколах. Применение современных элементов автоматизации позволяет использовать