

О ПРОБЛЕМЕ ЭМУЛЯЦИИ СРЕДЫ УПРАВЛЕНИЯ В КОМПЬЮТЕРНЫХ ТРЕНАЖЕРНЫХ КОМПЛЕКСАХ ДЛЯ ОБУЧЕНИЯ ОПЕРАТОРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ**В.П. Погорелов (ООО «Центр цифровых технологий»), А.И. Фролов (АО «Хоневелл»),
Е.С. Баулин (ООО «Центр цифровых технологий»),
А.В. Локшин, А.Ю. Новичков (АО «Хоневелл»)**

Приведено описание структуры человеко-машинного интерфейса (ЧМИ) с точки зрения функций оператора в современных распределенных системах управления. Проанализированы особенности компьютерного тренинга, определяющие специфику операторских ЧМИ в компьютерных тренажерах. Приводится классификация функций ЧМИ по степени их необходимости и точности воспроизведения в тренажерах. Описаны инструменты конфигурирования имитируемых ЧМИ. Анализируется проблема рациональной эмуляции интерфейсов с позиции трудозатрат и точности воспроизведения.

Ключевые слова: эмуляция, человеко-машинный интерфейс, распределенные системы управления, компьютерные тренажеры, обучение оперативного персонала.

Введение

Одной из важнейших задач на любом предприятии топливно-энергетического комплекса является подготовка квалифицированных кадров, в том числе операторов, управляющих работой технологических процессов. Имеющаяся статистика показывает, что из-за ошибок операторов, в частности в нефтеперерабатывающей и нефтехимической отраслях промышленности, происходят крупные аварии, часто сопровождающиеся потерями жизни и ущербом здоровья людей, а также снижается эффективность работы предприятия в целом [1–3].

Для обучения операторов ТП широко используются компьютерные тренажерные комплексы (КТК). Наряду с тренажерной математической моделью ТП [4] и средствами автоматизированного инструктирования [2] неотъемлемым компонентом любого КТК является операторский человеко-машинный интерфейс (ЧМИ), с помощью которого оператор управляет ТП. ЧМИ в тренажере соответствует ЧМИ распределенной системы управления (PCY), используемой на реальном объекте. Принципиальным вопросом является реалистичность отображения рабочего интерфейса PCY, так как проводить обучение операторов вне правильно воспроизведенной рабочей среды нельзя, такое обучение может сформировать у оператора «ложный навык» и в дальнейшем привести к неблагоприятным последствиям в его реальной работе. На практике при реализации ЧМИ в КТК применяются два стандартных подхода или их комбинация при необходимости:

- использование программных компонентов PCY реальной технологической установки. Это возможно при наличии у заказчика КТК дополнительных лицензий на необходимые компоненты ПО PCY;

- эмуляция¹ PCY, то есть создание для обучаемого оператора ТП рабочей среды, которая бы визуаль-но и функционально воспроизводила систему управления оператора на реальной установке, не используя при этом оригинальные компоненты PCY.

Отметим, что использование дополнительных лицензий на ПО порождает ряд проблем: возникают дополнительные существенные затраты при том, что в полном объеме функциональность указанного ПО в обучении не нужна. Кроме того, при создании КТК силами разработчика, не являющегося поставщиком PCY, наверняка возникнут технические проблемы интеграции программных компонентов PCY с тренажерной платформой. К тому же необходимо учитывать, что ПО производителя PCY не может покрыть всю пользовательскую рабочую среду в КТК, поскольку дополнительно требуется разработка ЧМИ полевого оператора и инструктора компьютерного тренинга — этих двух интерфейсов нет в реальной PCY. Таким образом, эмуляционный подход достаточно широко распространен в тренажеростроении, хотя практически не исследован в технической литературе.

Настоящая статья представляет собой попытку преодолеть указанный пробел. Сначала кратко описывается структура ЧМИ в современных PCY, анализируются особенности компьютерного тренинга, определяющие специфику операторских ЧМИ в тренажерах. Затем приводится классификация функций ЧМИ по степени их необходимости и точности воспроизведения в тренажерах. Описываются инструменты конфигурирования имитируемых ЧМИ, обсуждается проблема рациональной эмуляции PCY и направления будущих исследований.

¹ Эмуляция (от англ. *emulation*) — комплекс программных, аппаратных средств или их сочетание, предназначенное для копирования (или эмулирования) функций одной вычислительной системы на другой.

Функциональная структура ЧМИ оператора и особенности его реализации в КТК

По сравнению с современными версиями ЧМИ оператора в ранних РСУ был достаточно простыми и, по сути, переносил интерфейс щитовых систем управления в электронную форму. Структура таких ЧМИ копировала устройства технологического объекта. По мере расширения возможностей компьютерных интерфейсов устройство ЧМИ стало все больше исходить из задач, решаемых оператором при управлении ТП.

Для систем «гомеостатического» типа, где необходимо поддерживать нормальный режим работы при наличии постоянно возникающих внешних возмущений, ЧМИ в РСУ и в тренажере должен обеспечить оператора эффективными инструментами решения следующих задач [5]:

- обнаружение отклонений от нормального режима работы установки. В ЧМИ должны быть заложены функции, помогающие детектировать отклонения и поддерживать работу процесса в соответствии с установленной текущей нормой;

- диагностировать причину отклонений. Для этого необходимо иметь возможность запрашивать и оперативно получать с помощью ЧМИ дополнительные данные о процессе, подтверждающие или опровергающие операторские гипотезы о причине отклонения (в литературе это направление называют «экологическим интерфейсом» [6]). Известно, что операторы используют два способа распознавания отклонений: структурный (на основе устройства объекта и общих принципов его функционирования) и симптоматический (на основе анализа наблюдаемых симптомов ненормального поведения объекта) [2]. Люди-операторы склонны начинать с симптоматического анализа, и если он не дает нужного результата, переходят к использованию структурных методов. В силу этого ЧМИ должен быть настроен на оба подхода и позволять удобно переключаться с одного подхода на другой;

- планировать устранение и компенсировать негативные последствия обнаруженных отклонений, для чего также необходимы соответствующие инструменты в ЧМИ.

В целом новые поколения ЧМИ операторов в РСУ сконструированы более гибко и позволяют решать указанные задачи. При этом в силу того, что ЧМИ различных разработчиков развивались своими путями, они, оставаясь схожими в общих принципах, обладают существенными индивидуальными особенностями. Обобщая, можно утверждать, что во всех РСУ выделяют уровень представления и уровень управления (рис. 1). В работе [2] последний уровень обозначается как уровень диалога, подчеркивается его роль в организации взаимодействия между всеми элементами РСУ и внешней средой: операторами (в том числе и с полевыми операторами), ТП, инструктором (при обучении на тренажерном комплексе), сетью Internet, хранилищами данных и пр. Благодаря этому такие изменения в ТП, как состав измерений, новые элементы оборудования и прочие серьезные обновления не затрагивают уровня представления и могут быть отработаны на уровне диалога. Уровень представления у всех производителей реализуется по-разному; например, отличия касаются иерархической структуры объекта, типов представленной информации, примитивов отображения информации, средств мониторинга ТП и исполнения заданий и пр.

В случае ЧМИ в КТК возникают существенные дополнения к РСУ, например, следующие:

- на реальном объекте существуют задачи оператора, которые, исходя из целей обучения, не отрабатываются в процессе тренинга; поэтому для КТК требуется не весь объем информации о ТП, и не все возможные действия оператора требуется воспроизводить в интерфейсе КТК;

- дополнительно к ЧМИ консольного оператора в КТК появляется рабочее место полевого оператора,

чья деятельность на реальном объекте пока не оцифрована (во всяком случае — через РСУ). При этом интерфейс полевого оператора обладает существенной спецификой, требующей специального отражения;

- принципиально, что в КТК присутствует рабочее место инструктора компьютерного тренинга, который формирует задания для обучаемого и оценивает его прогресс. Это также существенно расширяет диалоговый компонент создаваемого ЧМИ.

Таким образом, ЧМИ в тренажере существенно отличается от имеющегося в РСУ. При этом полностью копировать ЧМИ РСУ невозможно технически (особенно для РСУ других производителей), не имеет тренировочного смысла (а иногда и вредит обучению, отни-

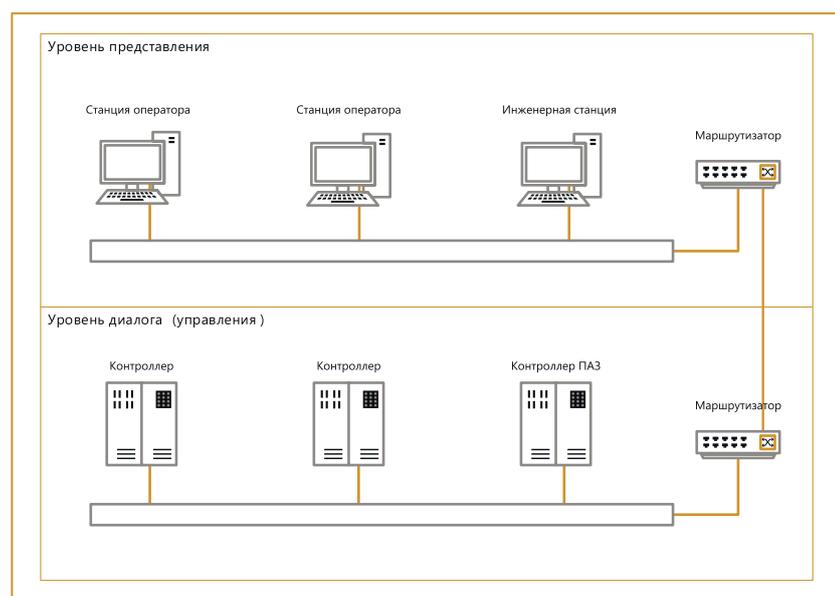


Рис. 1. Два уровня РСУ (представление и диалог)

мая внимание и время обучаемого) и чересчур дорого. Как следствие, эмуляция ЧМИ всегда в том или ином объеме присутствует в КТК. Очевидно при этом, что точность такой эмуляции должна быть достаточно высокой, чтобы не нарушить принцип психологического подобия работы оператора на установке и в тренажере [2]. Это означает, что в процессе принятия операторских решений на основе восприятия и обработки информации ЧМИ должен быть воссоздан в тренажере с большой детальностью и точностью.

Какие же компоненты и функции ЧМИ и с какой точностью должны быть сохранены в тренажерном интерфейсе? Зависит ли это от особенностей решения разных производителей? Какой уровень автоматизации возможен при адаптации ЧМИ разных производителей? Далее авторы попытаются ответить на эти вопросы на базе своего многолетнего опыта создания тренажеров и, следовательно, эмуляторов различных РСУ.

Состав эмулируемых ЧМИ в тренажерных комплексах

Если отвлечься от инженерных функций РСУ, используемых не операторами, а в основном специалистами АСУТП, то уровень визуализации ЧМИ включает пять основных компонентов:

- технологические мнемосхемы и всплывающие панели (фейсплейты);
- панели инструментов, с помощью которых, например, реализуются навигация и квитирование сигнализаций. На них также обычно отображается краткая информация о состоянии системы управления и несколько сигнализаций с высшим приоритетом;
- подсистема отображения и работы со списком сигнализаций;
- подсистема отображения трендов;
- подсистема отображения сообщений системы управления и ответа на них оператора.

При эмуляции операторской среды модель ТП и уровень диалога создаются с помощью специальной программы (дизайнер модели) и, как правило, при их реализации предполагается ряд упрощений. Функции уровня представления также имеют разные приоритеты по важности для процесса обучения (функции исключительно для специалистов АСУТП не рассматриваются), среди которых можно выделить три:

- критически важные для обучения функции;
- желательные, но не строго обязательные;
- не имеющие смысла в обучении (например, отображение долгосрочных трендов параметров за пределами нескольких часов, отводящихся на сессию обучения на тренажере).

В тренажерных комплексах обязательно реализуются критические функции (первый приоритет), а также часть или порой даже все желательные (второй приоритет) и дополнительно некоторые важные для процесса обучения инженерные функции (ввод настроек регулятора, управление ключами деблокировок и пр.). Реализация перечисленных инженерных

функций в КТК необходима, во-первых, чтобы операторы могли улучшить свое понимание ТП в процессе обучения, а, во-вторых, при необходимости могли выполнить в тренажере некоторые действия, которые обычно выполняют специалисты АСУТП при управлении моделируемым процессом.

Дополнительно к интерфейсу консольного оператора КТК присутствуют:

- эмуляция местного управления (интерфейс полевого оператора). Эмуляция в таком случае может быть реализована разными способами: традиционный 2D интерфейс, виртуальная модель с помощью 3D-анимации [7], 3D интерфейс на основе фотопанорамы [8];

- инструкторский интерфейс, с помощью которого происходит управление обучением. В рабочей среде инструктора должна быть обеспечена возможность реализовывать основные функции инструктора в процессе обучения:

- выбор начального состояния модели;
- пуск, останов, ускорение, замедления модельного времени;
- сохранение состояний модели в процессе или по окончании работы с КТК;
- внесение возмущений в моделируемый процесс, например, активация поломок оборудования;
- выполнение некоторых функций, которые на реальной установке обычно выполняют специалисты АСУТП. Это необходимо, например, когда с обычного операторского интерфейса в тренажере нельзя управлять вводом настроек регуляторов;
- запуск воспроизведения сценариев (записанная последовательность событий в модели);
- запуск системы автоматической оценки обучаемого (может комбинироваться с предыдущим пунктом);
- сохранение протоколов обучения;
- эмуляция специализированных клавиатур оператора, если требуется. Вообще говоря, эта задача может быть важна не только для тренажера, но для самой РСУ, если физическую клавиатуру требуется заменить эмулированной.

На основе опыта авторов можно выделить функции РСУ, которые обычно не требуется эмулировать при создании КТК:

- сигналы с технологического оборудования, которые не входят в объем моделирования и не критичны для процесса обучения (например, температуры подшипников насосов и пр.). Такие сигналы на практике заменяются на константы или вовсе не отображаются в ЧМИ;
- список системных сигнализаций и отображение состояния вспомогательного оборудования (сигнализации и сообщения о состоянии контроллеров, источников бесперебойного питания, освещения и др.);
- уровни доступа пользователя (например, инженерный доступ, стандартный оператор, оператор с ограниченным доступом, только просмотр);
- подсистема отображения долгосрочных трендов;
- в некоторых случаях в ЧМИ не требуется мониторинг прохождения сигналов, корректности работы

алгоритмов управления в контроллерах. К этим случаям не относятся важные сигналы, получаемые операторами со специально разработанных мнемосхем для проверки работы ТП.

Принципы и программные средства эмуляции ЧМИ в КТК

Накопленный авторами опыт выполнения проектов по эмуляции ЧМИ РСУ разных производителей позволяет отнести к критически важным для обучения следующие компоненты интерфейса для КТК на основе отмеченных в предыдущем разделе видов деятельности операторов:

- иерархия представления информации для оператора — представляет собой структуру объекта, с которым работает оператор. Существуют два типа иерархии: вертикальная иерархия (от обзора всего ТП до отдельной позиции КИП, включая технологические зоны и группы) и горизонтальная (экраны технологического оборудования, тренды, списки сигнализаций и пр.);

... когда человек оказывается на своем месте, он — весь, целиком — внезапно обретает смысл.

Макс Фрай

- средства навигации по технологическому объекту. Навигация может быть реализована двумя подходами: топографическим и симптоматическим. В топографическом подходе навигация осуществляется по нисходящему принципу (от обзора всего технологического объекта к зоне, группе и отдельной позиции) или по восходящему принципу (в обратном направлении в соответствии с заданной иерархией). При симптоматическом подходе навигация реализуется по специальным кнопкам перехода. Последняя возможность важна при поиске причин отклонений ТП от нормы, когда оператор запрашивает информацию, которая может подтвердить или опровергнуть проверяемую гипотезу и которая разбросана по интерфейсу вне всякой связи с его иерархической структурой;

- визуальный образ отклонения от нормы при отображении состояния оборудования. Подобие этого компонента ЧМИ важно на стадии обнаружения отклонений от нормы. Визуальный образ отклонения, прежде всего, должен быть достаточно точен, чтобы приобретенный в тренинге навык обнаружения отклонений мог быть надежно перенесен в практику реального управления;

- логика системы управления чрезвычайными событиями. Списки всех чрезвычайных событий и их организация — важный инструмент как на стадии обнаружения отклонений, так и на стадии поиска причин неисправностей;

- структура и отображение трендов. К историческим трендам параметров операторы также обращаются на обеих вышеотмеченных стадиях (обнаружение и диагностика). Организация и внешний вид трендов также должны помогать переносу приобретенных в тренинге навыков на реальное управление ТП.

Для эмуляции ЧМИ в тренажере было разработано специализированное средство Field View Designer. Оно достаточно гибко для того, чтобы воссоздать визуализацию и функциональность практически любых мнемосхем и всплывающих панелей (фейсплейтов) РСУ известных производителей, а также для точной эмуляции конкретных РСУ реализована возможность создания специальных расширений (плагинов), в которые выносятся функции и отображения, специфичные для конкретной РСУ.

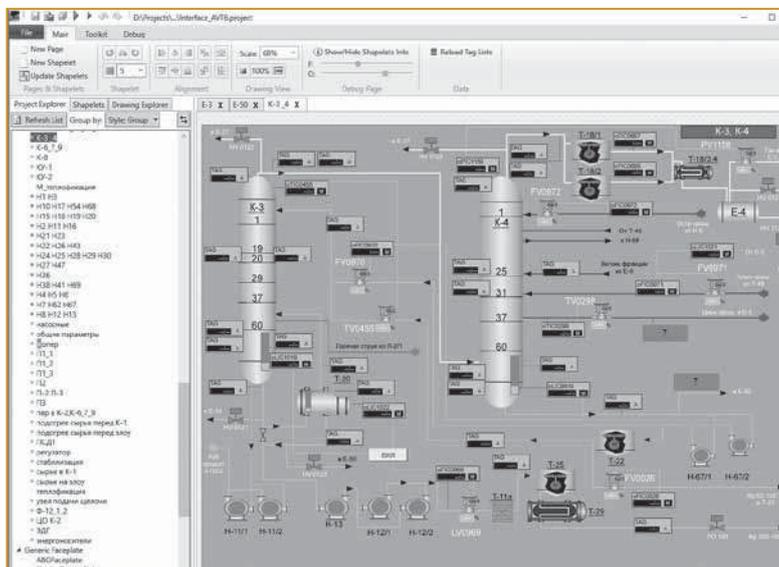


Рис. 2. Field View Designer с открытым визуальным редактором мнемосхем

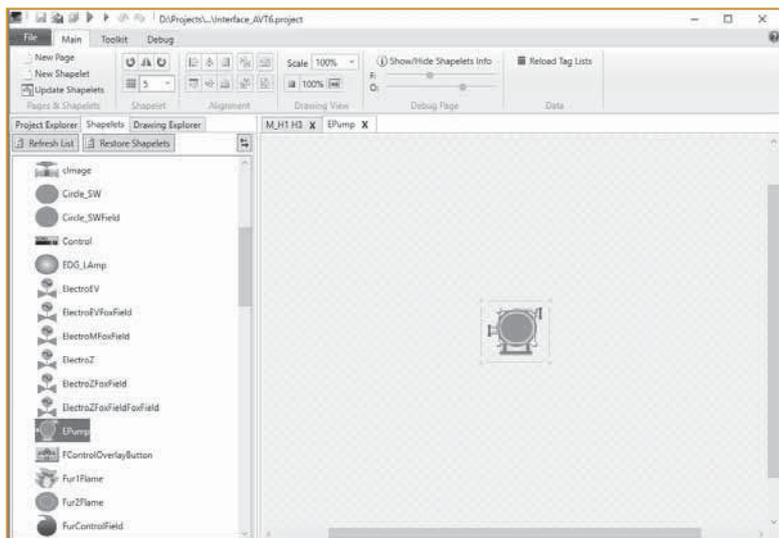


Рис. 3. Редактирование шаблона динамического элемента

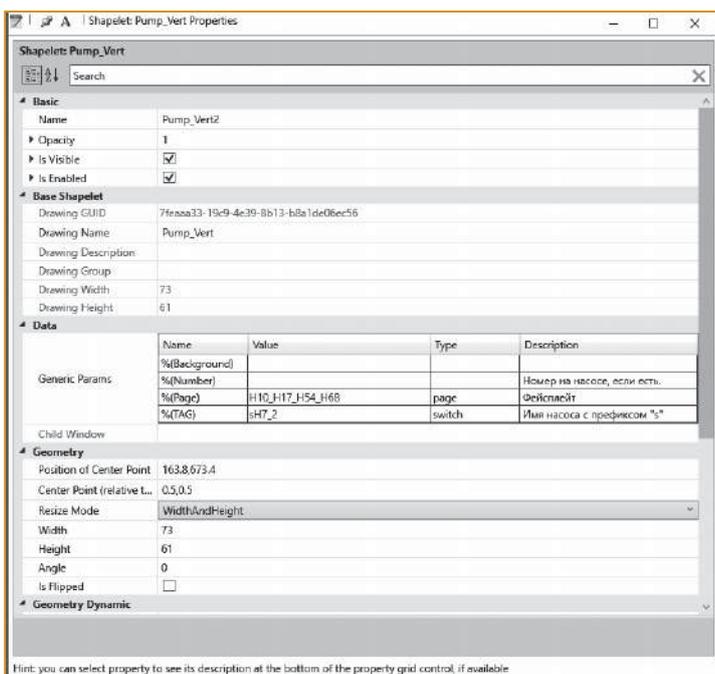


Рис. 4. Окно свойств экземпляра элемента

Эмуляция ЧМИ в конструкторе Field View Designer начинается с воссоздания мнемосхем оператора. Графическое и функциональное содержание мнемосхем частично или полностью может быть перенесено из РСУ автоматизировано с помощью специального инструментария. Автоматизация возможна, если соответствующая РСУ поддерживает экспорт мнемосхем в открытый формат. Если перенос какой-то части мнемосхем из реальной РСУ автоматизировать не удастся, то эту часть модифицируют или создают полностью в визуальном редакторе. На рис. 2 показано окно Field View Designer с открытой для редактирования мнемосхемой.

Для уменьшения трудоемкости создания и редактирования мнемосхем в визуальном редакторе ис-

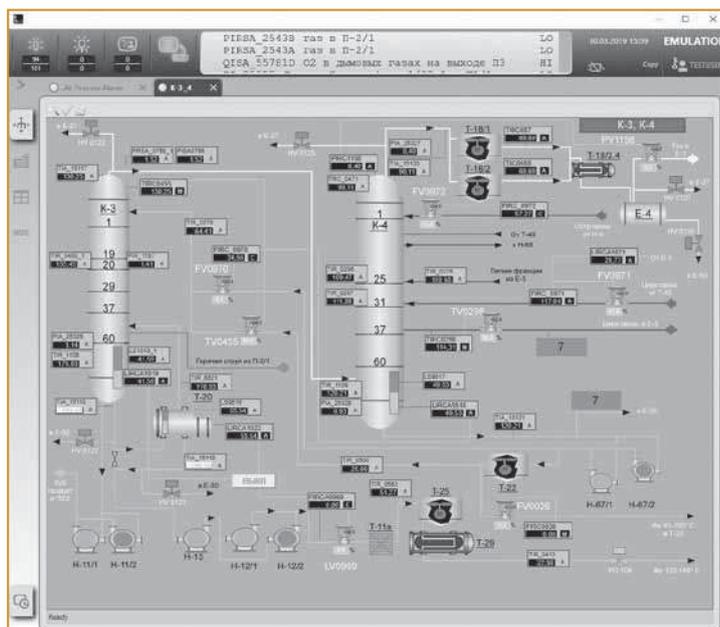


Рис. 5. Мнемосхема после применения стиля из плагина

пользуется следующий принцип. Мнемосхема разделяется на статическую «подложку» и динамические элементы (в терминах ПО Field View Designer — «шейплеты»). В «подложку» входят статические изображения: аппараты, линии трубопроводов и т.д. Динамические элементы — это обычно повторяющиеся элементы, имеющие свой алгоритм отображения и взаимодействия с пользователем. Сначала создаются типовые элементы (шаблоны, базовые шейплеты) из графических примитивов (например, типовой элемент датчика, регулятора, насоса из примитивов «геометрия», «текстовый блок» и пр.), затем на «подложку» добавляются экземпляры элементов, созданные на основе шаблона. Каждый экземпляр «помнит» шаблон, на основе которого был создан. При изменении шаблона в дальнейшем существует возможность автоматического обновления экземпляров на всех или выбранных мнемосхемах в соответствии с новым шаблоном. Это существенно ускоряет внесение изменений, например, при устранении ошибки в поведении или отображении. На рис. 3 показано окно с открытым для редактирования динамическим элементом.

Каждый шаблон элемента может определить настроечные параметры (рис. 4). Например, для экземпляра элемента на мнемосхеме может задаваться тэг (имя технологической позиции), имя всплывающей панели и т.д. При автоматическом обновлении экземпляров элементов на мнемосхемах при изменении шаблона все значения настроечных параметров каждого экземпляра сохраняются.

Но эмулированный интерфейс — это не только мнемосхемы управления. Очень важны другие элементы ЧМИ РСУ, такие как навигационные панели, тренды, списки сигнализаций, логика переключения между элементами интерфейса и виртуальные клавиатуры. В случае использования Field View Designer разработчик может выбрать один из имеющихся стилей, соответствующих имеющимся на рынке ЧМИ РСУ различных поставщиков. Стиль определяет внешний вид и функциональность окружения для мнемосхем в соответствии с эмулируемой РСУ, специфичный вид окон трендов и сигнализаций. Изменением стиля меняется весь внешний облик ЧМИ КТК.

Если имеющиеся стили не удовлетворяют требованиям разрабатываемого ЧМИ КТК, можно создать новый под конкретные требования. Делается это с помощью механизма плагинов. Такой подход имеет следующие преимущества:

- плагины можно создавать, используя любой язык программирования из семейства Microsoft.NET и любую интегрированную среду разработки;
- заказчику поставляется программный код, содержащий только эмуляцию его РСУ;

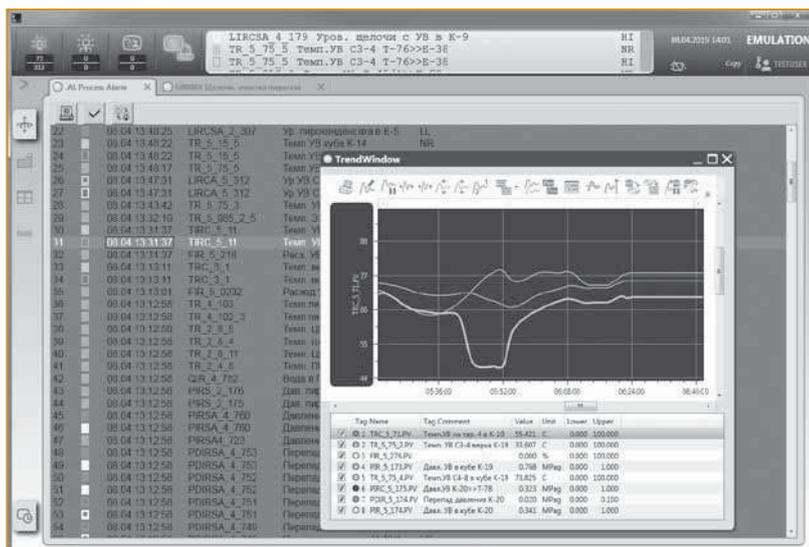


Рис. 6. Тренды и список сигнализаций, специализированные с помощью плагина

• для разработки плагинов можно привлекать разработчиков, у которых нет доступа к исходным кодам Field View Designer и имеется только API (программные интерфейсы) плагинов. Это позволяет разработчикам эмуляций не вникать в устройство Field View Designer и сосредоточиться исключительно на воспроизведении функциональности, специфичной эмулируемой PCY. При этом есть возможность использовать функциональность общую для всех PCY, которая реализована в «ядре» Field View.

Для эмуляции новой PCY плагин определяет новый стиль для отображения мнемосхем. После подключения плагина этот стиль можно назначить соответствующим мнемосхемам. На рис. 5 изображена мнемосхема после применения стиля.

Пример специализированных под PCY с помощью плагина окон трендов и сигнализаций на рис. 6.

Заключение

Качественная эмуляция компонентов PCY в тренажерных комплексах очень важна по ряду причин. Во-первых, тренажерный бизнес растет по всему миру: ежегодный объем в сегменте непрерывных ТП составляет примерно 700 млн. долл. США с ростом в 10...12% [9]. От того, насколько конкретные решения производителей в части эмуляции ЧМИ будут привлекательными по визуализации и функциональности, зависит их конкурентоспособность на этом рынке. Во-вторых, большая доля всех компьютерных тренажерных комплексов для операторов ТП разрабатывается с использованием эмуляции компонентов ЧМИ. При этом для разработ-

чиков при эмуляции компонентов ЧМИ нужно найти необходимый баланс точности воспроизведения (безусловно важной для процесса обучения) и экономности по затратам времени и ресурсов.

В статье затронуты редко рассматриваемые в литературе вопросы, связанные с эмуляцией ЧМИ, — особенности функциональной структуры операторских интерфейсов в связи с их реализацией в КТК, принципы и программные средства эмуляции ЧМИ в КТК. Авторы изложили свое видение принципа рациональной эмуляции, который заключается в реализации необходимых компонентов интерфейса с определенным набором функций, позволяющих обеспечить выполнение предъявляемых к процессу обучения требований с учетом характера работы операторов ТП.

Список литературы

1. The 100 Largest Losses 1978-2017 Large Property Damage Losses in the Hydrocarbon Industry 25th edition. — Marsh Report, 2018. URL: <https://www.marsh.com/qa/en/insights/research-briefings/100-largest-losses-in-the-hydrocarbon-industry.html>
2. Дозорцев В.М. Компьютерные тренажеры для обучения операторов технологических процессов. М. Синтез. 2009. 372 с.
3. Koteswara Reddy G., Kiran Yarrakula. Analysis of Accidents in Chemical Processes Industries in the period 1998-2015 // Intern. Journal of ChemTech Research. 2016. Vol. 9. No. 4. Pp. 177-191.
4. Дозорцев В.М., Крейдлин Е.Ю. Современные автоматизированные системы моделирования ТП // Автоматизация в промышленности. 2009. № 6. С. 11-16.
5. Дозорцев В.М. Обучение операторов технологических процессов на базе компьютерных тренажеров // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 1999. № 8. С. 31-38.
6. Vicente, K.J. Ecological Interface Design: Progress and Challenges // Human Factors. 2002. Vol. 44. Pp. 62-78.
7. Colombo S., Golzio, L. The Plant Simulator as viable means to prevent and manage risk through competencies management: Experiment results // Safety Science. 2016. No. 84. Pp. 46-56.
8. Новичков А.Ю., Фролов А.И., Погорелов В.П., Дозорцев В.М. Интерфейс полевого оператора в компьютерном тренажере: 3D погружение или 2D панорама? // Вторая международная научно-практическая конференция «Человеческий фактор в сложных технических системах и средах» (Эрго-2016), Санкт-Петербург. 2016. С. 268-276.
9. Дозорцев В.М. Мировой рынок компьютерных тренажеров для обучения операторов: тенденции, вызовы, прогнозы // Автоматизация в промышленности. 2016. № 2. С. 47-50.

Погорелов Валерий Петрович — ведущий инженер по разработке компьютерных тренажерных комплексов,

Баулин Евгений Сергеевич — канд. техн. наук, генеральный директор ООО «Центр цифровых технологий»,

Фролов Алексей Иванович — технический руководитель проектов,

Локшин Александр Вячеславович — старший инженер,

Новичков Алексей Юрьевич — консультант АО «Хоневелл».

Контактный телефон +79265320398.

E-mail: Baulin.es@mipt.ru