

# Архитектура системы для подготовки и аттестации персонала, участвующего в разработке и эксплуатации АСУ ТП

С. Е. Базаева<sup>1</sup>

<sup>1</sup> НИЦ «Курчатовский институт» — НИИСИ, Москва, Российская Федерация, bazaeva@niisi.msk.ru

**Аннотация.** Рассматриваются принципы построения и архитектура системы для обучения / аттестации персонала, обслуживающего АСУ ТП. Предложена архитектура тренажера на основе полунатурного стенда для подготовки и аттестации операторов и инженеров-технологов, участвующих в эксплуатации АСУ ТП.

**Ключевые слова:** критическая инфраструктура, АСУ ТП, полунатурный стенд, тренажер, инженерная психология

## 1. Введение

В данной работе рассматриваются принципы построения и архитектура системы для подготовки и аттестации персонала, чья деятельность связана с разработкой и эксплуатацией автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП).

Процесс создания и эксплуатации АСУ ТП широко освещен в различных публикациях [1-5]. Участниками этого процесса являются коллективы сотрудников различной численности, имеющих различное образование и квалификацию, однако все они включают инженеров-технологов, операторов и программистов.

Инженеры-технологи отвечают за разработку и модификацию (по необходимости) прикладных программ, исполняемых на программируемых логических контроллерах (ПЛК). Эти прикладные программы взаимодействуют с физическим оборудованием объекта управления и реализуют таким образом технологические процессы. Инженеры-технологи не обязаны владеть навыками программирования на высокоуровневых языках и применять эти языки в своей работе. Для программирования на ПЛК имеются специальные среды разработки и языки, в том числе, позволяющие использовать графические элементы, обозначающие различные элементы алгоритмов [6, 7].

Операторы контролируют функционирование АСУ ТП: вводят значения параметров, запускают систему, следят за диагностическими сообщениями и индикаторами, в случае нештатных ситуаций выполняют предписанные действия.

Программисты отвечают за разработку и

сопровождение программ, поддерживающих передачу информации между ПЛК и ЭВМ более высоких уровней, а также за программное обеспечение (ПО), исполняемое на ЭВМ более высокого уровня (различные протоколы передачи данных, базы данных, программы накопления и обработки статистики, средства контроля несанкционированного доступа и пр.).

Следует отметить, что АСУ ТП для каждого масштабного проекта потенциально может обладать своими особенностями, даже если объекты управления являются однотипными (например, тепловые электростанции, гидроэлектростанции, шахты и т.п.). И если можно себе представить единую инструкцию по наладке и эксплуатации АСУ «умного» дома для всех домов одной определенной серии, то составить единую инструкцию для АСУ атомных электростанций (даже в случае использования однотипных реакторов) очевидно невозможно.

Поэтому традиционно для подготовки и аттестации персонала, обслуживающего АСУ масштабных проектов, одновременно с созданием АСУ ТП разрабатывается учебно-аттестационная система-тренажер.

Необходимость создания таких систем обусловлена следующими причинами:

- автоматизированные системы используются для управления технологическими процессами на объектах критической инфраструктуры, где необходимо обеспечить высокий уровень кибербезопасности [1], а персонал по сути является одним из компонентов АСУ;
- персонал должен обладать достаточной квалификацией для выполнения своих обязанностей как при штатном функционировании объекта управления, так и в случае аварийных ситуаций различного

вида (выход из строя оборудования, несанкционированное вмешательство, неумышленная ошибка персонала и т.д.);

– обучение и аттестация персонала должны осуществляться в условиях, максимально приближенных к реальной производственной обстановке с учетом особенностей конкретного объекта управления.

Система подготовки/аттестации персонала для реального действующего современного объекта управления предполагает наличие у работников среднего профессионального или высшего образования.

Однако параллельно в профильных образовательных учреждениях существуют системы подготовки и аттестации, предназначенные для студентов, направление обучения которых так или иначе связано с темой АСУ ТП. Принципы разработки обучающих систем для образовательных учреждений имеют свои особенности по сравнению реальными проектами и в данной работе не рассматриваются.

Производственная система подготовки / аттестации персонала в первую очередь предназначена для инженеров-технологов и операторов АСУ ТП, поскольку обучение и аттестация программистов происходит в системе высшего и среднего профессионального образования. Полученные программистами навыки разработки и интеграции информационных систем являются в определенном смысле универсальными. Например, на крупном промышленном предприятии придется следить за взаимодействием технологических процессов с системой контроля складских запасов, системой управления логистикой, бухгалтерией и т.д. При этом предполагается, что качество ПО АСУ должным образом контролировалось в процессе разработки, отладки и тестирования [8, 9].

В отличие от программиста, инженер-технолог, обученный в системе образования программированию на ПЛК и даже имеющий опыт работы, может столкнуться с трудностями при освоении ПО новой АСУ ТП. В частности, необходимо будет освоить систему разработки и отладки, с помощью которой создаются прикладные программы для ПЛК на конкретном объекте.

Наиболее важна система подготовки / аттестации персонала для обучения операторов АСУ ТП, поскольку, как было указано ранее, каждая АСУ для более-менее сложного объекта управления обладает своими особенностями и получить навык работы с ней можно только с помощью специально

разработанной учебной системы.

Таким образом, при выборе архитектуры для системы подготовки/аттестации персонала АСУ ТП будем опираться на следующие принципы:

- система обеспечивает обучение и аттестацию операторов и инженеров-технологов для эксплуатируемой АСУ ТП;
- в состав системы включен штатный пульт управления для оператора;
- в состав системы включена штатная программно-аппаратная среда для разработки, загрузки и модификации инженером-технологом встраиваемого прикладного ПО;
- в состав системы включено рабочее место инструктора для загрузки задач и контроля действий обучаемого / аттестуемого персонала;
- система функционирует в реальном масштабе времени, соответствующем реальным условиям работы АСУ ТП;
- общие принципы разработки аппаратно-программных систем (модульность, возможность настройки, использование стандартов разработки и т.п.).

Далее предлагается рассмотреть реализацию архитектуры системы подготовки/аттестации персонала в виде тренажера на основе полунатурного стенда, имитирующего работу реального объекта под управлением АСУ. Данный подход отвечает перечисленным принципам, поскольку концепция тренажера подразумевает многократное повторение действий под контролем инструктора с использованием специально разработанной методики, а полунатурный стенд позволяет воспроизвести для персонала условия работы, близкие к реальным.

## 2. Архитектура тренажера на основе полунатурного стенда для имитации работы АСУ ТП

Тренажеры для обучения, тренировки и аттестации инженеров-технологов и операторов технологических процессов, функционирующих под управлением АСУ, широко применяются в различных отраслях промышленного производства, в авиации и космонавтике, в судовождении, в энергетике, в нефтегазовой отрасли и т.д. [10, 11]. Рассмотрим возможности и характеристики тренажеров на основе полунатурных стендов, моделирующих функционирование АСУ ТП, отличающие их от других средств обучения и аттестации операторов АСУ ТП.

## 2.1. Ключевые характеристики технологических тренажеров

Понятие «тренажер для обучения персонала» нередко трактуют чрезмерно широко, называя так любой источник полезных сведений об управлении технологическим процессом, который не является обычным бумажным учебником или инструкцией, тем более, если этот источник доступен на компьютере.

«Настоящие» же тренажеры предназначены для передачи знаний об организации практической деятельности в отличие от декларативных знаний о технологическом процессе, содержащихся в учебниках, опросниках, системах тестирования, учебных фильмах и пр. Результатом занятий обучаемого персонала на тренажерах является формирование, закрепление и совершенствование навыков управления объектом.

Перечислим принципиальные отличия технологических тренажеров от других средств обучения и обязательные составные части тренажеров, обусловленные этими отличиями [11]:

- тренажер содержит модель объекта, замещающую реальный объект, который невозможно, опасно или дорого использовать для обучения (модель объекта реализована в виде полунатурного стенда);
- на тренажере взаимодействие обучаемого с моделью объекта осуществляется посредством специальной среды, называемой информационной моделью (или интерфейсом обучаемого). С помощью данного интерфейса обучаемый воздействует на модель объекта и получает информацию о ее состоянии;
- на тренажере модель объекта, снабженная интерфейсом обучаемого, представляет собой лишь имитатор реального объекта с возможностью манипулирования им. Имитатор становится тренажером при наличии модели обучения, включающей правила, методы работы, тренировочные упражнения и прочие методические атрибуты.

Разработка каждого компонента тренажера, безусловно, должна быть выполнена качественно, то есть, на очень высоком уровне. Для модели объекта, например, критерием качества может служить степень ее подобия реальному технологическому процессу. Однако критерий качества тренажера в целом не сводится к качеству отдельных компонентов.

Тренажер призван обеспечить перенос навыков тренинга в реальную деятельность,

следовательно, качество тренажера определяется уровнем соответствия деятельности обучаемого в тренинге и на практике.

## 2.2 Этапы развития технологии компьютерного тренинга

Разработка первых тренажеров в 60е и 70е г.г. двадцатого века выполнялась на аналоговой технике и цифровых ЭВМ с архитектурой IBM-360, 370, 390, для размещения которых требовались большие площади и мощная система охлаждения. Возможности графических интерфейсов тренажеров были более чем скромными, а производительности используемых ЭВМ было недостаточно для разработки качественных моделей.

С появлением персональных компьютеров, недорогих и более производительных, в учебных центрах предприятий и организаций появились тренажерные системы с массовым доступом. Однако для включения в их состав высокоточных моделей вычислительной мощности одного-двух ПК по-прежнему было недостаточно, поэтому предпринимались попытки создания распределенных систем. В частности, так называемые «фермы» (системы, включающие десятки ПК) применялись для разработки цифровых реалистичных изображений и анимации.

Персональные компьютеры также начали проникать на пульта управления электростанций и других производственных объектов, заменяя традиционные щиты (см. рис. 1 и 2).



Рис. 1. Щит управления на ТЭЦ-27, 90-е годы 20-го века, г. Москва [12]

Ранее создание тренажеров, включающих щит управления в качестве натурального элемента, сопровождалось проблемами из-за необходимости разработки линий связи и протоколов передачи данных между аппаратурой ввода-вывода данных щита

и цифровыми ЭВМ нового поколения.



Рис. 2. Щит управления на ТЭЦ-27, 2012 год, г. Москва [13]

К концу двадцатого века появились мощные персональные компьютеры, сети, качественная компьютерная графика. Одновременно происходило развитие систем управления техническими комплексами, возникли SCADA-системы. Стандартизация аппаратуры и программного обеспечения облегчала тиражирование разработок.

Дальнейшее развитие информационных технологий на основе роста вычислительных мощностей ЭВМ и расширения функциональных возможностей медиатехнологий оказало революционное воздействие как на системы управления технологическими процессами, так и на тренажеры, используемые для обучения персонала новым методам работы (см. рис. 2). Современный «настоящий» щит управления ТЭЦ-27 легко может быть встроен в архитектуру тренажера в полном объеме.

Параллельно с созданием тренажеров, внешне похожих на своих предшественников, развиваются новые направления – тренажеры с трехмерным изображением объекта управления и VR-тренажеры [14].

Тренинг с использованием трехмерной картинки напоминает компьютерную игру – на экране перемещается персонаж, выполняющий учебное задание под управлением обучаемого лица. Реалистичность изображения зависит от вычислительной мощности используемых ЭВМ и поставленной задачи.

VR-тренажеры демонстрируют обучаемому реалистичную качественную картинку, но пока испытывают проблемы при имитации тактильных ощущений [15, 16], особенно в случае моделирования мелкой моторики, поскольку качественное имитационное оборудование имеет слишком высокую цену.

### 2.3. Архитектура типового тренажера для персонала технического комплекса

Рассмотрим технический комплекс, конфигурация которого изображена на рис. 3.

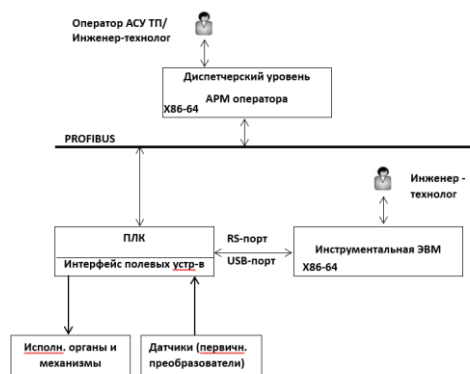


Рис. 3. Конфигурация технического комплекса

Аппаратная часть технического комплекса включает:

- ПЛК;
- ЭВМ в составе АРМ оператора. Данное рабочее место используют оператор АСУ ТП и инженер-технолог;
- инструментальную ЭВМ (ИЭВМ), используемую инженером-технологом для разработки и поддержки прикладного ПО ПЛК.

В качестве ЭВМ могут быть использованы компьютеры с архитектурой x86-64 (как указано на рис. 3) или MIPS.

АРМ оператора и ПЛК соединены сетью PROFIBUS. ПЛК располагает аппаратными интерфейсами для получения сигналов от «полевых» датчиков, передачи данных исполнительным устройствам и связи с прочими смежными внешними системами через промышленные сети.

ПЛК является базовым аппаратным элементом любой системы автоматизированного управления технологическим процессом. Логика функционирования АСУ ТП, независимо от области применения, состоит в том, чтобы с помощью «полевых» датчиков, подключенных к производственному оборудованию и/или анализирующих состояние окружающей среды, передавать на более высокие уровни системы информацию о технологическом процессе и в случае необходимости оказывать управляющее воздействие на оборудование с помощью исполнительных механизмов.

Поступающие с «полевого» уровня данные обрабатываются на ПЛК прикладными программами в соответствии с задачами, поставленными перед АСУ ТП, а затем

передаются на диспетчерский уровень.

Данные, выводимые на исполнительные механизмы, формируются прикладными программами, исполняемыми на ПЛК, на основе информации, полученной от «полевых» датчиков и, возможно, от внешних систем и программ диспетчерского уровня.

Таким образом, комбинацию ПЛК + интерфейсы подключенных полевых устройств и исполнительных механизмов, показанную на рис. 3, можно считать типовой структурной единицей АСУ ТП.

В состав аппаратуры тренажера включим следующие натурные элементы объекта-оригинала:

- ЭВМ, входящую в состав АРМ оператора АСУ (архитектура x86-64);
- ПЛК (интерфейсы для полевых устройств не используются, поскольку устройства заменены моделями) и сетевой интерфейс для взаимодействия с АРМ оператора АСУ и моделями полевых устройств, исполняемыми на моделирующей ЭВМ.

Опираясь на описание типового компьютерного тренажерного комплекса для обучения операторов и инженеров технологических процессов [17, 18], построим свою конфигурацию тренажера (рис. 4).

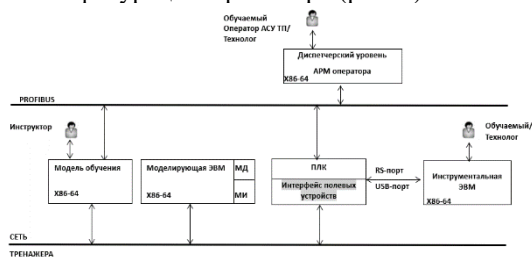


Рис. 4. Конфигурация аппаратуры тренажерного комплекса

Предлагаемая конфигурация тренажерного программно-аппаратного комплекса соответствует определению полунатурного стенда, поскольку включает натурные компоненты объекта-оригинала и модели, заменяющие отсутствующие компоненты.

ПЛК в составе конфигурации выступает в качестве натурального компонента системы управления объекта-оригинала.

На стенде (рис. 4) входные данные для алгоритмов управления выдает и выходные данные от алгоритмов управления принимает модель объекта-оригинала, исполняемая на моделирующей ЭВМ. Штатная схема подключения полевых устройств к ПЛК и алгоритмы нижнего уровня, осуществляющие прием и передачу данных в реальных условиях, здесь не используются (отмечены на рис. 4

серым цветом).

Данные от ПЛК на интерфейс обучаемого или экзаменуемого (АРМ оператора) в рассматриваемой конфигурации поступают обычным порядком, таким образом, при обеспечении функционирования программ тренажерного комплекса в реальном масштабе времени и наличии качественной модели объекта-оригинала оператор не должен чувствовать разницы между работой на стенде и в условиях реальной эксплуатации технической системы.

Модель объекта-оригинала в сочетании с алгоритмами системы управления, исполняемыми на ПЛК, составляют модель технической системы. Иногда алгоритмы системы управления переносят на моделирующую ЭВМ и создают таким образом единую модель технической системы.

При проектировании тренажера необходимо решить, какие штатные компоненты объекта-оригинала и системы управления требуется включить в состав стенда для получения желаемых результатов по завершении обучения персонала.

Например, на пилотажных стендах в точности воспроизводится лишь внутренний антураж кабины (кресла пилотов, приборная доска, панели индикаторов, тумблеры, педали, ручка управления или штурвал и пр.) и задействуется аппаратура, непосредственно обеспечивающая функционирование приборов, органов управления и прочих элементов интерьера. Макет кабины монтируется на неподвижную платформу или подвижную платформу с шестью степенями свободы, перемещение которой в пространстве обеспечивают с помощью гидроцилиндров.

Как показывает практика, установка дополнительного натурального оборудования не повышает качество модели и продуктивность тренировок. Напротив, на пилотажном стенде большое внимание уделяется программно-аппаратной имитации реалистичной закабинной обстановки с помощью средств визуализации и ощущений, испытываемых вестибулярным аппаратом пилота, в результате перемещения подвижной платформы с установленным макетом кабины. Технические средства, используемые для этих целей, не входят в состав реального летательного аппарата.

Тренажерный комплекс функционирует следующим образом. Инструктор выполняет подготовительные действия: загрузку программного обеспечения, настройку на программном и аппаратном уровне, готовит задания для обучаемого. Затем обучаемый запускает тренажер.

Модель объекта-оригинала передает в систему управления значения датчиков, вычисленные на основании начальных условий. Далее работают управляющие алгоритмы, а затем сформированные ими значения передаются на вход моделям исполнительных механизмов. Параллельно осуществляется вывод параметров, отображаемых в интерфейсе обучаемого, на АРМ оператора. Перечисленные действия выполняются циклически.

Инструктор в рамках модели обучения имеет возможность вносить возмущения в работу комплекса, имитируя сбои, отказы, аварии с помощью доступного ему интерфейса. Также инструктор может наблюдать за действиями обучаемого – для этого используется нештатное подключение к АРМ оператора по сети объекта-оригинала.

Разумеется, все наблюдаемые параметры сохраняются в базе данных по ходу эксперимента и затем анализируются. На основании этой информации делаются выводы об успешности процесса обучения.

### **3. Проблемы, возникающие при создании компьютерных тренажеров**

Несмотря на кажущуюся простоту идеи компьютерного тренажера, следует тщательно планировать его состав и архитектуру, чтобы найти оптимальное соотношение между степенью детализации модели технической системы, задачей, которую решает тренажер, и качеством обучения.

Проблемы, возникающие при создании тренажеров, следует разделить на две группы:

- сложности построения «каркаса» той среды, в которой функционируют модель технической системы и модель обучения (интерфейс инструктора), то есть, вопросы подключения аппаратуры, разработка протоколов передачи данных между компонентами тренажера, обеспечение совместимости и взаимодействия ПО, разработанного с помощью различных систем, и т.п.;
- разработка качественной модели технической системы и методических материалов в составе модели обучения, включая автоматизированный оперативный анализ результатов в процессе обучения и при аттестации обученного персонала.

При решении проблем первого типа, очевидно, помогут лучшие практики разработки сложных программно-аппаратных систем, начиная с этапа тщательного планирования архитектуры тренажера.

Проблемы второго типа гораздо сложнее, особенно в случае моделирования масштабных производств критической инфраструктуры (нефтеперерабатывающие предприятия, газо- и нефтедобывающие комплексы, атомные электростанции), поскольку в настоящее время обычным требованием стало моделирование не только хорошо известных режимов работы, но и таких режимов и событий, которые еще не случались – например, действия персонала в условиях тяжелой аварии с плавлением активной зоны реактора [19].

С другой стороны, включение в модель всей без исключения технологической цепочки не увеличит ценность модели при использовании в составе тренажера. Производственные линии, не функционирующие в нормальном режиме, а также при пуске и останове, можно не моделировать. Вспомогательные системы, резервные схемы и параллельно работающее оборудование допустимо моделировать упрощенно [21]. Однако в модели должны быть представлены все технологические нарушения в работе оборудования и в системе управления, а также система противоаварийной защиты.

Разработка модели обучения может стать «гибридной» проблемой, например, если необходимо научить оператора правильно действовать в непривычных условиях при дефиците времени на реакцию. В этом случае для разработки модели обучения потребуются участие профессионального психолога. Затруднения вызывает также процесс составления упражнений и алгоритмов оценки качества их выполнения.

### **4. Тенденции развития технологии создания и применения компьютерных тренажеров**

Технологии создания и применения компьютерных тренажеров для технических систем развиваются в трех направлениях [18, 22].

Во-первых, в настоящее время при конструировании тренажеров наблюдается стремление интегрировать наиболее удачные разработки разных производителей ПО, а не начинать каждый проект «с нуля».

Данному подходу способствует продолжающаяся общая тенденция к унификации интерфейсов и повышению совместимости разработок, как на аппаратном, так и на программном уровне. Таким образом, общие черты приобретают не только моделирующие комплексы, но

и разрабатываемые системы управления, что облегчает создание тренажеров из готовых компонентов.

Примером является семейство тренажеров «ТРОПА» [20, 23] компании НПФ «Круг» для персонала, обслуживающего систему управления технологическим оборудованием. Заказчик получает набор компонентов, из которых собирает собственный тренажер для обучения и аттестации работников различных отраслей промышленности, включая теплоэнергетику, нефтяную, газовую, нефтехимическую и пр. (перечень отраслей ограничен). Объектами управления могут быть котлы, паровые и газовые турбины, нефтеперерабатывающие установки, нефте- и газохранилища и т.д.

Заказчик имеет возможность изменять прикладное программное обеспечение тренажера (алгоритмы математических моделей агрегатов, алгоритмы системы управления, базу данных системы, графический интерфейс). Все изменения осуществляются в среде разработки компьютерного тренажерного комплекса «ТРОПА» с помощью визуального интерфейса, не требующего квалификации программиста.

Во-вторых, тренажерные модели смещаются в сторону «полных» имитационных моделей. Происходит переход к инжиниринговым моделям, то есть, высокоточным моделям, используемым для технологического инжиниринга процесса производства. И если технологические вопросы, касающиеся непосредственно процесса производства, формально не требуют использования тренажеров, то отработать и оптимизировать эргономику операторского интерфейса, методику обучения и аттестации персонала удобно именно с помощью тренажера.

Термин «инжиниринг» (engineering) здесь означает инженерно-консультационную деятельность, содержанием которой является решение инженерных задач, связанных с созданием или совершенствованием продукции, систем и/или процессов [24].

В настоящее время применение сложных высокоточных моделей ограничено как недостатком вычислительных ресурсов, так и уровнем самих моделей, которые могут не обладать в полной степени адекватностью для некоторых технологических областей.

Однако по мере увеличения мощности вычислительных ресурсов и появления теоретических достижений в области динамического моделирования можно будет освободиться от упрощенных тренажерных моделей.

В-третьих, происходят изменения в модели

обучения. Успехи инженерной психологии в области создания эффективных схем тренинга персонала обещают новые возможности на уровне АРМ инструктора в части автоматизированных обучающих систем и систем тестирования для персонала. Уже сейчас доступны тренажеры с использованием 3D-изображений и VR-технологий, которые коренным образом меняют подход к тренингу по сравнению с эпохой использования подлинных щитов управления на электростанциях в составе тренажеров. Более того, на уровне организации ПАО «Россети» разработан корпоративный стандарт «Тренажерные комплексы на основе технологий виртуальной и дополненной реальности (VR/AR)» [25].

Рост вычислительных мощностей уже сейчас позволяет приступить к синхронизации тренажера и технологического процесса, позволяющей тренировать операторов в реальных режимах работы, а также воспроизводить при тренинге реально произошедшие нарушения в работе оборудования и отрабатывать действия по устранению нежелательных последствий.

Дальнейший прогресс в области стандартизации и расширения совместимости оборудования разных производителей, используемого в качестве компонентов АСУ ТП, позволит в будущем снизить многообразие моделируемых компонентов объекта-оригинала и сделать тренажеры более масштабными, не увеличивая радикально уровень затрат. Возможно, современные тренажеры со временем трансформируются в виртуальные аналоги целых предприятий.

## 5. Заключение

Система обучения/аттестации персонала является обязательным компонентом проектов автоматизации масштабных производственных комплексов.

Предложенный в данной работе подход к построению архитектуры рассматриваемой системы на основе полунатурного стенда позволяет создавать технологические тренажеры, предназначенные для передачи и/или проверки знаний об организации практической деятельности, а также для формирования, закрепления и совершенствования навыков управления реальным объектом.

Объектом дальнейших исследований должны быть архитектуры систем обучения и аттестации, предназначенных для использования в составе образовательных программ, связанных с тематикой АСУ ТП,

в учреждениях профессионального среднего и высшего образования.

Публикация выполнена в рамках государственного задания по проведению фундаментальных исследований по теме «Вопросы разработки и применения

инструментальной платформы для создания автоматизированных систем управления на отечественных программно-аппаратных средствах».

## Architecture of the system for training and certification of personnel involved in the development and operation of automated process control systems

S. E. Bazaeva

**Abstract.** The principles of design and architecture of a system for training and certification of personnel servicing automated process control systems (APCS) are discussed. A simulator architecture based on HIL simulation is proposed for training and certification of operators and process engineers involved in the operation of APCS.

**Keywords:** critical infrastructure, automated process control systems, HIL simulation stand, simulator, engineering psychology

### Литература

1. А.И. Грюнталь, С.Е. Базаева. Вопросы обеспечения кибербезопасности при разработке и использовании АСУ ТП. // Труды научно-исследовательского института системных исследований Российской академии наук, Т. 11, № 4. С. 56-67, Москва, 2021 г.
2. ГОСТ Р 71531-2024 Системы киберфизические. Термины и определения. М.: Российский институт стандартизации, 2024. 8 с.
3. М.С. Аристов, А.И. Грюнталь, Я.А. Зотов, Я.А. Шаповалов, Д.В. Яриков. Архитектура типовой системы автоматизации технологических процессов на базе отечественных СВТ и ПО. // Труды научно-исследовательского института системных исследований Российской академии наук, Т. 13, № 4. С. 64-67, Москва, 2023 г.
4. В.В. Девятков. Методология и технология имитационных исследований сложных систем: современное состояние и перспективы развития: монография. М.: Вузский учебник: ИНФРА-М, 2013 г. 448 с.
5. Программно-аппаратный (программно-технический) комплекс КРУГ-2000. Источник: <https://www.krug2000.ru/products/ptk.html> (Дата обращения: 11.10.2025).
6. Документация по среде разработки «Beremiz». Источник: <https://beremiz-gu.readthedocs.io/ru/master/> (Дата обращения: 11.10.2025).
7. ГОСТ Р МЭК 61131-3-2016 «Контроллеры программируемые. Часть 3: Языки программирования». Источник: <https://docs.cntd.ru/document/1200135008> (Дата обращения: 11.10.2025).
8. Я.А. Зотов. Вопросы разработки системы автоматизированного тестирования программного обеспечения технических комплексов АСУ ТП // Программная инженерия. 2025. Том 16, № 3, С. 122-133.
9. Я.А. Зотов. Разработка инструментальной платформы для создания стендов полунатурного моделирования. // Распределенные компьютерные и телекоммуникационные сети: управление, вычисление, связь: материалы XXVIII Междунар. научн. конфер, 22–26 сент. 2025 г., Москва / под общ. ред. В.М. Вишневого, К.Е. Самуйлова; Ин-т проблем упр. им. В.А. Трапезникова. С. 63-68.
10. Применение компьютерных тренажеров в процессе комплексного обучения персонала буровых установок в соответствии с требованиями IWCF и IADC // Бурение и нефть. 2023. № 7-8. С. 38-43.
11. В.М. Дозорцев, Д.В. Кнеллер. Технологические компьютерные тренажеры: все, что вы всегда

хотели знать // Промышленные АСУ и контроллеры. 2004. № 12. С. 1-13.

12. Музей истории Мосэнерго. Северная ТЭЦ (ТЭЦ-27). Источник: [https://www.mosenergo-museum.ru/History\\_of\\_Mosenergo/Historical\\_Review/21985/](https://www.mosenergo-museum.ru/History_of_Mosenergo/Historical_Review/21985/) (Дата обращения: 11.05.2025).

13. Т.И. Башкаев. Единый центральный щит управления ТЭЦ 27 в Москве. // АрхРевю, 12.05.2012. Источник: <https://www.archrevue.ru/profilearchitectblogmessage/9158.html> (Дата обращения: 11.05.2025)

14. VR + точная тактильная отдача. Имитационный тренажер буровой установки ZBO S15. Источник: <https://habr.com/ru/articles/663664/> (Дата обращения: 11.05.2025).

15. VR-тренажеры и иммерсивное обучение. Источник: <https://habr.com/ru/articles/769160/> (Дата обращения: 11.05.2025).

16. В.П. Овчинников, М.Д. Гаммер, А.В. Елихин, Ю.А. Гильманов. Тренажер-симулятор процесса бурения нового поколения. // Бурение и нефть. 2025. № 3. С. 42-48.

17. В.М. Дозорцев, Д.В. Кнеллер. Типовой компьютерный тренажерный комплекс для обучения операторов ТП // Автоматизация в промышленности. 2003. № 2. С. 9-14.

18. В.М. Дозорцев. Компьютерный тренинг операторов технологических процессов нефтяного комплекса: состояние и тенденции развития. Источник: [https://www.researchgate.net/publication/283343494\\_komputernyj\\_trening\\_operatorov\\_tehnologiceskih\\_processov\\_neftanogo\\_kompleksa\\_sostojanie\\_i\\_tendencii\\_razvitiya](https://www.researchgate.net/publication/283343494_komputernyj_trening_operatorov_tehnologiceskih_processov_neftanogo_kompleksa_sostojanie_i_tendencii_razvitiya) (Дата обращения: 11.05.2025).

19. Как создают и совершенствуют тренажеры для оперативного персонала АЭС. Интервью зам. директора ВНИИАЭС НТП В. Чернакова. Источник: <https://strana-gosatom.ru/2023/07/20/kak-sozdajut-i-sovshenstvujut-trenazh/> (Дата обращения: 11.05.2025).

20. Тренажер для персонала, обслуживающего АСУ ТП технологических установок. Источник: <https://www.krug2000.ru/decisions/trenajery-podgotovki-operatorov-technologov/1786.html> (Дата обращения: 11.05.2025).

21. В.М. Дозорцев. Имитационные модели технологических процессов в компьютерных тренажерах для обучения операторов // Имитационное моделирование. Теория и практика: Сборник докладов третьей всероссийской научно-практической конференции ИММОД-2007. Том 2. СПб.: ФГУП ЦНИИТС. 2007. – с. 58-61.

22. В.М. Дозорцев. Компьютерные тренажеры для обучения операторов технологических процессов: история, состояние, перспективы // В кн. Труды Института проблем управления РАН, Т.1. – М., 1998. – 95 с.

23. Программно-аппаратный (программно-технический) комплекс КРУГ-2000. Источник: <https://www.krug2000.ru/products/ptk.html> (Дата обращения: 11.05.2025).

24. ГОСТ Р 57306-2016 Инжиниринг. Терминология и основные понятия в области инжиниринга. Стандартинформ (2018 г.) 15 с.

25. СТО 34.01-22-001-2022 Тренажерные комплексы на основе технологий виртуальной и дополненной реальности (VR/AR). Типовые технические требования. ПАО «Россети» (2022г.) 62 с. Источник: <https://www.rosseti.ru/upload/iblock/94f/cdfarq7dyfbwvar82ougf9rk41n10266.pdf> (Дата обращения: 11.05.2025).