

УДК 51-73

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИМИТАЦИОННОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ОТЛАДКИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ПЕРЕРАБОТКИ НАТРИЯ

П.Ю. Кривцов, В.М. Павлов\*

Национальный ядерный центр Республики Казахстан, г. Курчатов

\*Томский политехнический университет

E-mail: Krivtsov@nnc.kz

*Показана возможность использования методов полунатурного имитационного моделирования для отладки системы управления пожаро- и взрывоопасным технологическим процессом переработки натриевого теплоносителя. Дана структура имитационного комплекса, математической модели технологического процесса, программного тренажера, определены функциональные характеристики системы управления, подлежащие проверке на имитационном комплексе. Представлены результаты испытаний системы управления.*

### **Ключевые слова:**

*Натриевый теплоноситель, установка по переработке натрия, имитационный комплекс, модельные исследования, система управления.*

### **Key words:**

*Sodium coolant, sodium process facility, simulation complex, modeling researches, control system.*

### **Введение**

Развитие ядерной энергетики связано с решением комплекса задач, направленных на повышение эффективности и безопасности энергетических объектов, методов утилизации, переработки и захоронения ядерных отходов. Начатая в Республике Казахстан программа по выводу реактора БН-350 из эксплуатации затрагивает широкий комплекс проблем, одной из которых является переработка и захоронение натрия, который использовался в качестве теплоносителя [1, 2].

Важным этапом работ по утилизации теплоносителя является изучение технологии переработки, которая включает в себя решение задач, связанных с синтезом оптимальных алгоритмов управления технологическим процессом, проектированием информационного обеспечения, анализом аварийных ситуаций и обучением оперативного персонала методам безаварийного управления установкой. Решение поставленного комплекса задач на реальной установке не представляется возможным ввиду того, что процесс переработки относится к взрыво- и пожароопасной категории работ. Одним из современных методов изучения и исследования поведения динамических систем или физических процессов является имитационное (компьютерное) моделирование, основу которого составляет математическое описание моделируемого объекта или динамической системы.

Важным направлением в области имитационного моделирования является полунатурное моделирование (Hardware In the Loop Simulation /HILS/). Суть метода заключается в том, что часть агрегатов или устройств реального объекта включается в состав имитационного комплекса, а моделируется только технологическая составляющая, отражающая физические особенности работы моделируемой системы [3, 4]. Так, представленный в работе полунатурный имитационный комплекс

установки по переработке натрия (УПН) содержит контроллерное оборудование автоматизированной системы управления технологическим процессом (АСУ ТП) и рабочие станции операторов установки. Математическая модель позволяет имитировать показания средств измерения технологических параметров и индикаторов состояния исполнительных элементов установки.

### **Структура имитационного комплекса**

Имитационный комплекс, рис. 1, кроме оборудования системы управления включает в себя модельный комплекс, состоящий из станции моделирования и контроллера имитации сигналов нижнего уровня.

Программно-технический комплекс АСУ ТП содержит контроллер сбора данных и управления, выполненный на платформе ControlLogix фирмы Allen Bradley, а также рабочие станции управления технологическим процессом, которые предоставляют информацию о технологическом процессе при помощи графического интерфейса, выполненного в SCADA системе RSView32.

Модельный комплекс представляет собой набор программно-технических средств фирмы National Instruments. Аппаратная часть построена на архитектуре PXI и включает в свой состав шасси, контроллер реального времени и набор плат аналогового и дискретного ввода-вывода. Программная часть разработана с использованием пакета LabVIEW, позволяющего создавать распределенные системы моделирования, работающие на ядре реального времени, либо под управлением ОС Windows. Для разработки программного обеспечения моделирования, а также для настройки и конфигурации модельного комплекса, используется станция моделирования. Подключение станции моделирования к контроллеру имитации осуществляется посредством сети Ethernet.

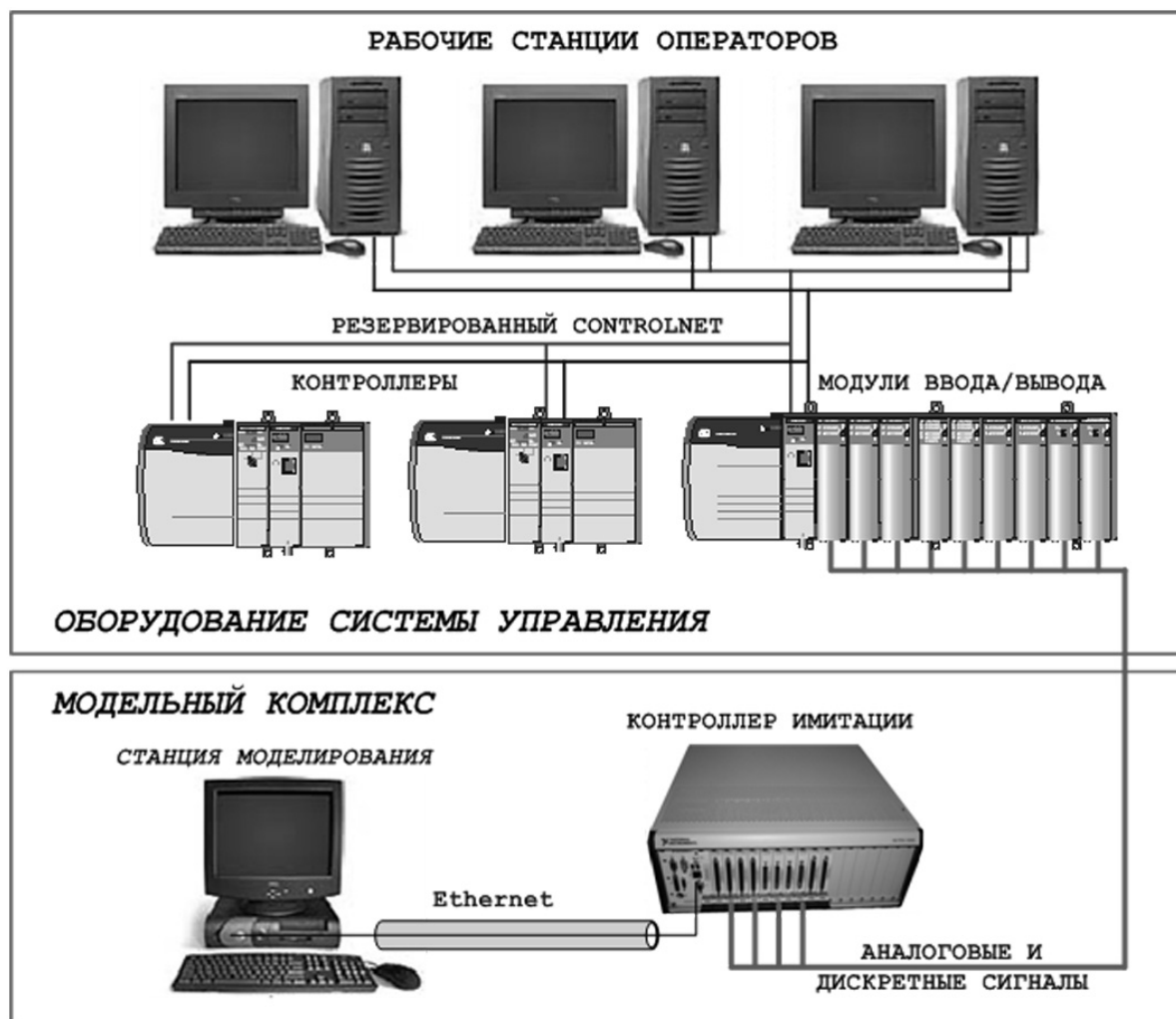


Рис. 1. Структурная схема имитационного комплекса

Модельный комплекс обеспечивает имитацию показаний 200 датчиков и обработку 90 сигналов управления.

#### Реализация математической модели процесса

Основное назначение модельного комплекса – имитация изменения технологических параметров основных систем УПН при формировании управляющих воздействий со стороны системы управления.

Для удобства разработки, тестирования и отладки, программное обеспечение, реализующее модель технологического процесса, иерархически структурировано. Все структурные элементы программы реализуют либо модели технологического оборудования УПН, либо – физического процесса. Структура программы приведена на рис. 2.

Подсистема имитации строится на основе математического описания, отражающего основные характеристики объекта и процесса. Для УПН моделируются:

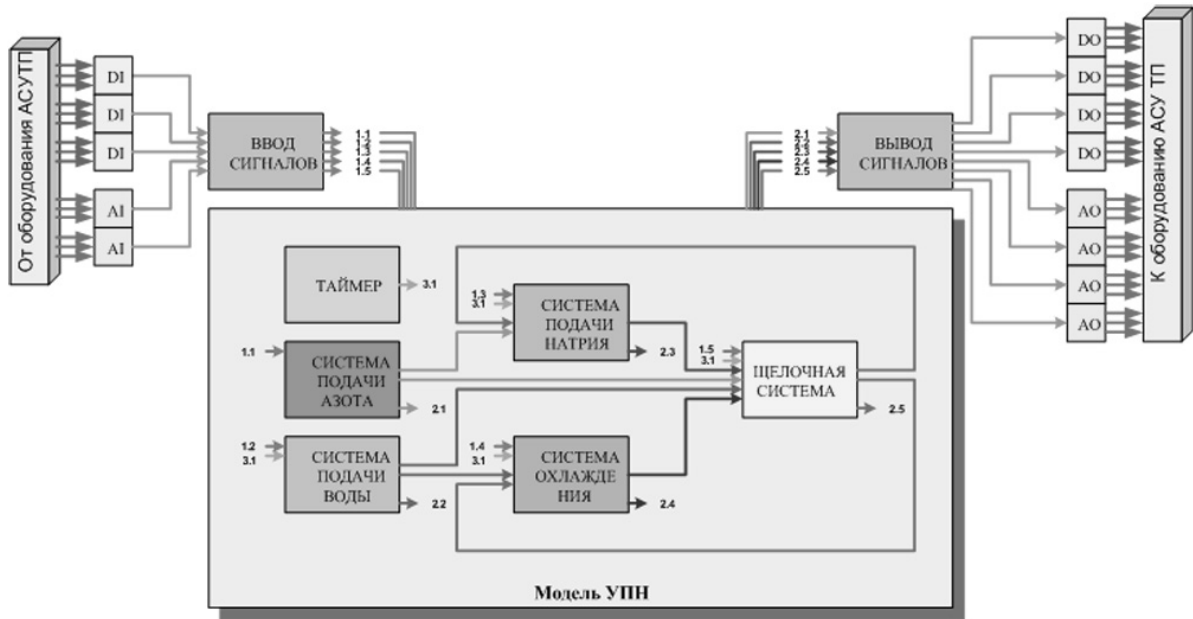
- химическая реакция натрия с водой в растворе гидроксида в химическом реакторе;

- гидродинамические процессы течения жидкостей, изменение уровня в емкостях;
- термодинамические процессы нагрева оборудования и рабочих сред (жидких и газовых);
- термодинамические процессы в теплообменниках;
- изменение объема газов и жидкостей при изменении температуры и плотности;
- потоки газов с учетом конфигурации оборудования и физических параметров.

При реализации математического описания УПН учитывалась конфигурация и состав оборудования, свойства материалов и рабочих сред, природа протекающих процессов и их взаимосвязь. Математическое описание процессов взаимодействия натрия с водой в химическом реакторе установки представлены в работе [5]. Рассмотрим основные уравнения, выражающие характер изменения технологических параметров во времени.

В случае, когда необходимо моделировать изменение уровня жидкости в емкости, используется выражение:

$$A_i \frac{dL_i(t)}{dt} = \sum_{i=1} F_{Vin\_i}(t) - \sum_{i=1} F_{Vout\_i}(t),$$



**Рис. 2.** Структурная схема программного обеспечения модели УПН: 1.1–1.5 сигналы управления; 2.1–2.5 моделируемые сигналы; 3.1 – время таймера; DI – модули дискретного ввода; DO – модули дискретного вывода; AI – модули аналогового ввода; AO – модули аналогового вывода

где  $A_i$  – площадь дна моделируемой емкости,  $m^2$ ;  $L_i(t)$  – уровень жидкости (натрий, вода или гидроксид натрия),  $m/c$ ;  $F_{vin_i}(t)$ ,  $F_{vout_i}(t)$  – объемный входной/выходной расход жидкости в емкость,  $m^3/c$ .

Выходной расход жидкости моделируется при помощи следующего выражения:

$$F_{vout_i}(t) = a_p \sqrt{2gL_i(t) + \frac{2P_i(t)}{\rho_i}},$$

где  $a_p$  – площадь поперечного сечения трубы,  $m^2$ ;  $g$  – ускорение свободного падения,  $m/c^2$ ;  $\rho_i$  – плотность жидкости,  $kg/m^3$ ;  $P_i(t)$  – перепад давления на линии подачи жидкости,  $Pa/c$ ;  $t$  – время,  $c$ .

При моделировании выхода газа из емкости используется выражение

$$F_{gm}(t) = \sqrt{\frac{P_{gm}^2(t) - P_{gm\_out}^2(t)}{kR_{gm}T_{gm}(t)}},$$

где  $F_{gm}(t)$  – выходной расход газовой смеси,  $kg/c$ ;  $P_{gm}(t)$  – давление газовой смеси в моделируемой емкости,  $Pa/c$ ;  $P_{gm\_out}(t)$  – давление на последующем элементе,  $Pa/c$ ;  $k$  – общий коэффициент гидравлического сопротивления,  $1/m^4$ ;  $R_{gm}$  – газовая постоянная смеси,  $Dж/(кг \cdot K)$ ;  $T_{gm}(t)$  – температура газовой смеси,  $K/c$ .

Уравнения материального баланса газовой смеси представляет собой выражение

$$\frac{dP_{gm}(t)}{dt} = \frac{R_{gm}T_{gm}(t)}{V_{gm}} \left( \sum_{i=1} F_{gin_i} - F_{gm}(t) \right) + \frac{R_{gm}M_{gm}(t)}{V_{gm}(t)} \frac{dT_{gm}(t)}{dt} - R_{gm}T_{gm}(t)M_{gm}(t) \frac{dV_{gm}(t)}{dt},$$

где  $V_{gm}(t)$  – объем газовой смеси,  $m^3/c$ ;  $F_{gin_i}(t)$  – массовый входной расход газа (водород, азот или водя-

ной пар),  $kg/c$ ;  $M_{gm}(t)$  – масса газовой смеси в моделируемой емкости,  $kg$ .

Тепловой баланс газовой смеси описывается как

$$C_{gm}M_{gm}(t) \frac{dT_{gm}(t)}{dt} = Q_{gm\_in}(t) + V_{gm} \frac{dP_{gm}(t)}{dt},$$

где  $C_{gm}$  – теплоемкость газовой смеси,  $Dж/(кг \cdot K)$ ;  $Q_{gm\_in}(t)$  – количество энергии, вносимой газами в моделируемую емкость,  $Dж/c$ .

Для всех подсистем УПН моделируется состояние запорной и регулирующей арматуры, а также показания датчиков температуры, давления, расхода. Модели исполнительных элементов представляют собой нормировочные логические выражения, которые в зависимости от сигнала управления возвращают текущее состояние устройства. Так для модели запорного клапана используется выражение

$$DV_i = \begin{cases} U_{\max} & \rightarrow 1 \\ U_{\min} & \rightarrow 0 \end{cases},$$

где  $U_{\min}$  и  $U_{\max}$  – минимальное и максимальное напряжения на клапане;  $DV_i$  – коэффициент, характеризующий состояния запорного клапана.

Состояние регулирующего клапана определяется как:

$$CV_i = \lim \{ I_{\min}; I_{\max} \} (I_c - I_{\min}) / (I_{\max} - I_{\min}),$$

где  $I_{\min}$  и  $I_{\max}$  – минимальный и максимальный токовые сигналы;  $CV_i$  – коэффициент, характеризующий состояния регулируемого клапана;  $I_c$  – ток-овый управляющий сигнал.

Датчики температуры, давления и расходомеры описываются с помощью выражения вида:

$$I_i = \lim \{ h_{\min}; h_{\max} \} \frac{x}{h_{\max}} (I_{\max} - I_{\min}) + I_{\min},$$

где  $h_{\min}$  и  $h_{\max}$  – нижний/верхний пределы измерения;  $x$  – измеряемый параметр;  $I_i$  – выходной токовый сигнал.

В модельном комплексе нет жесткой привязки к временной оси, что позволяет проводить испытания системы управления в ускоренном масштабе времени. При этом секунда модельного времени соответствует минуте реального, что позволяет значительно быстрее привести виртуальную установку в состояние готовности. На реальном оборудовании процесс разогрева элементов конструкции УПН и заполнение основных емкостей натрием, щелочью и водой продолжается порядка 12 ч.

### Испытания системы управления

Целью проведения исследований является проверка соответствия характеристик разработанной конфигурации программно – технических средств системы управления как функциональным и техническим требованиям, так и требованиям эргономики и технической эстетики. Помимо представленных выше требований выполняется проверка исправности технических средств и правильность подключения каналов аналогового и дискретного ввода/вывода. Исследования программно – технических средств АСУ ТП на полунатурном имитационном комплексе позволили оценить качество

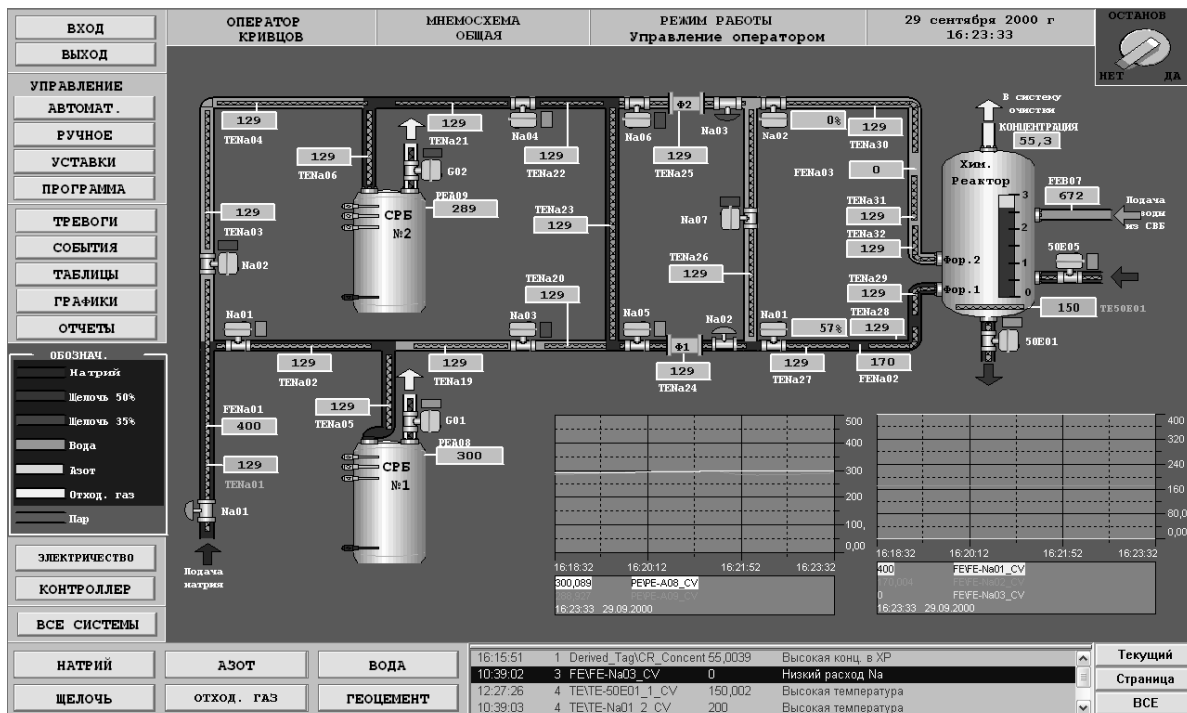


Рис. 3. Процесс переработки натрия на имитационном комплексе

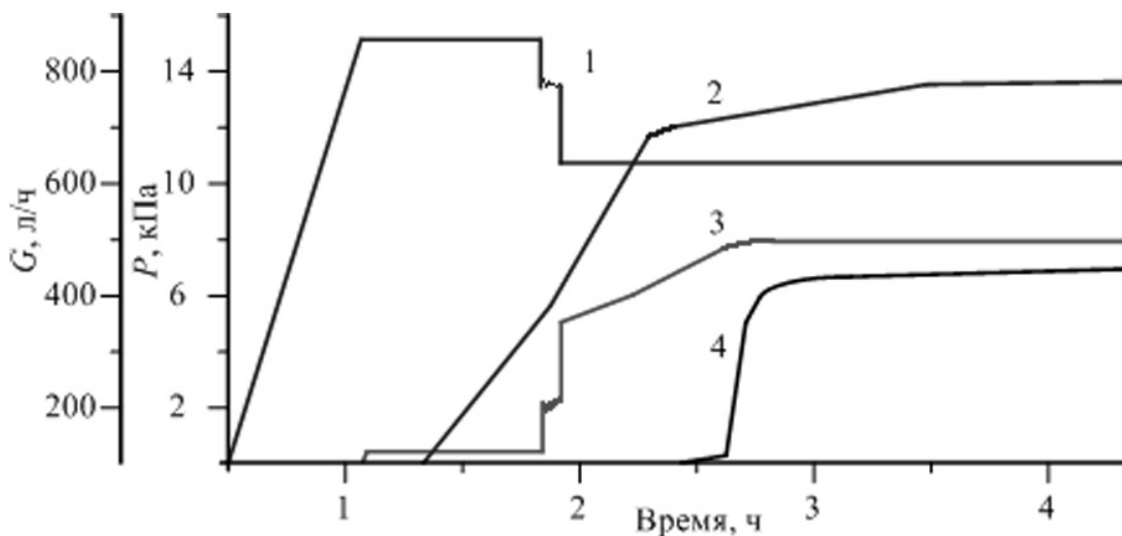


Рис. 4. Контур управления уровнем в химическом реакторе 1) давление в нижней части реактора; 2) расход воды; 3) давление в верхней части реактора; 4) расход щелочи

управления технологическим процессом и определить степень законченности проекта в целом.

В ходе проведения исследований системы управления, оценке подлежат следующие качественные (функциональные) характеристики системы:

- измерение, регистрация и отображение измеряемых технологических параметров, таких как температура, давление, расход, уровень, концентрация;
- оперативный контроль, обеспечение цветовой индикации и звуковой сигнализации отклонений технологических параметров относительно заданных значений (уставок);
- контроль положения и состояния запорной арматуры, мощности выделяемой на электрических нагревателях;
- управление исполнительными устройствами (задвижка, клапан, насос, регулятор мощности нагревателя) в соответствии с заданным алгоритмом управления;

За время существования полунатурного имитационного комплекса была проведена серия исследований, в результате которых был переработан объем «виртуального» натрия, в 2 раза превышающий его реальные запасы на БН-350, рис. 3. Прове-

дена оценка функциональных характеристик системы управления, которая полностью подтвердила правильность технических решений принятых на этапах проектирования и разработки АСУ ТП. На рис. 4 показаны результаты работы контура управления уровнем в химическом реакторе.

#### Программный тренажер

Имитационные комплексы, которые в максимально возможной степени приближены к реальным установкам, играют большую роль в подготовке операторов сложных систем и позволяют тренирующимся приобрести правильные и устойчивые навыки управления процессом [6].

После проведения комплексных испытаний, оборудование АСУ ТП было передано в монтаж на УПН, а полунатурный имитационный комплекс был преобразован в программный тренажер, который используется для обучения операторов установки, рис 5.

Программное обеспечение системы управления исключает вмешательство оператора в технологический процесс в режиме прямого ручного управления исполнительными механизмами, но управление процессом не обходится без участия чело-

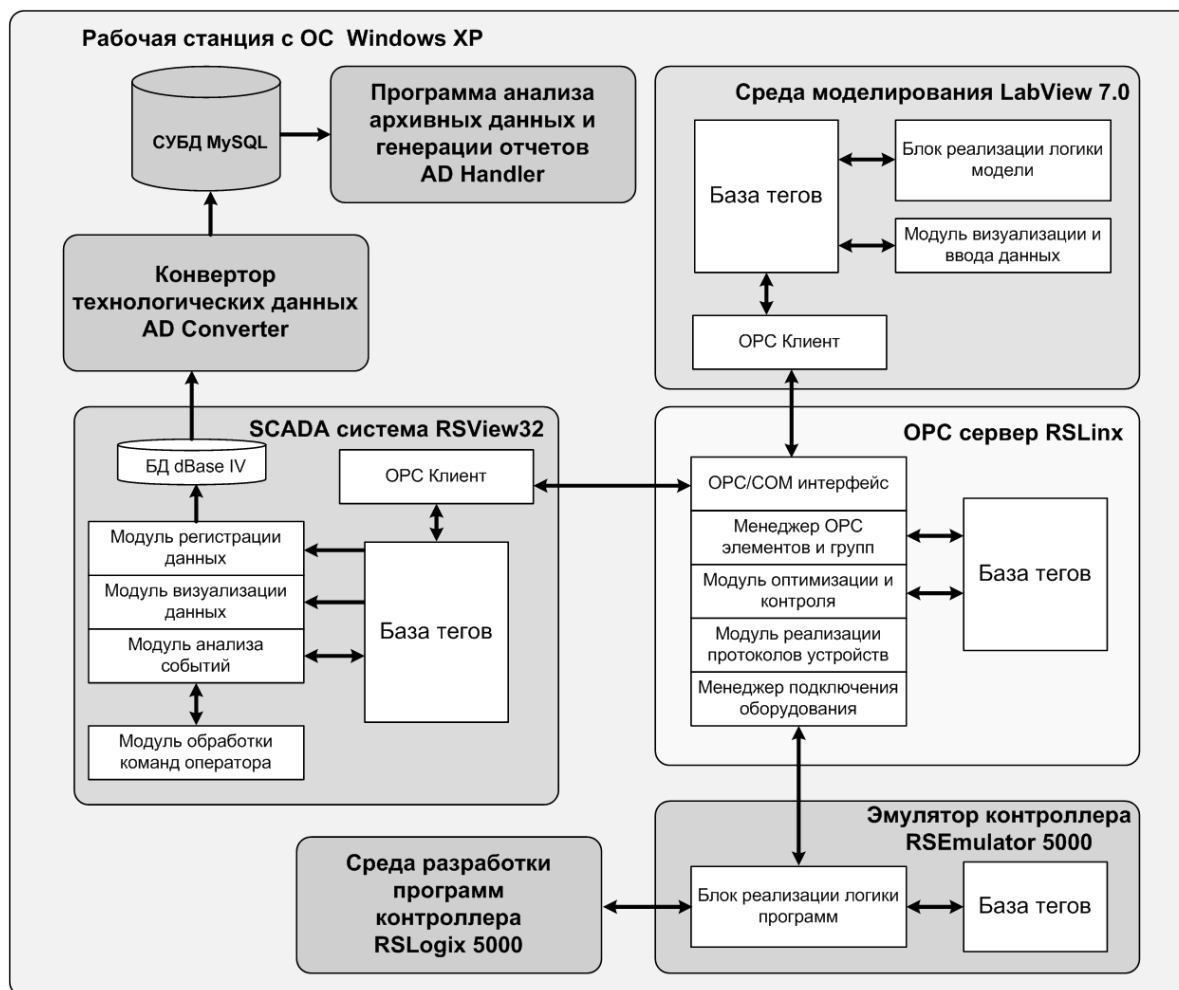


Рис. 5. Структура программного тренажера

века. Операторы установки участвуют в настройке технологического процесса и управляют им в тех ситуациях, когда требуется разрешение нештатных и неплановых ситуаций, в том числе запроектных аварий. Программный тренажер обеспечивает:

- выработку навыков безопасного и эффективно-го управления в пусковых, переходных и стационарных режимах;
- обучение операторов своевременному обнаружению и устранению отклонений в ходе технологического процесса;
- проведение компьютерных экспериментов для исследования различных условий работы оборудования, в том числе критических режимов и аварийных ситуаций;
- ведение архива действий операторов;
- объективный контроль уровня знаний операторов.

#### **Заключение**

Применение современных методов проектирования систем управления технологическими про-

цессами, связанных с использованием компьютерного имитационного моделирования, позволило обеспечить оптимальное решение задач отработки, отладки технологии переработки, разработкой алгоритмов управления, сбора, обработки и представления технологической информации, отладки и апробации операционных схем функционирования технологического процесса. Математическое описание процессов, происходящих на установке по переработке натрия, дало возможность провести изучение поведения элементов системы в различных режимах работы установки и выполнить анализ реакции объекта управления на управляющие воздействия. Экономический эффект комплексного подхода к созданию системы проявляется в виде решения поставленных задач без натуральных испытаний и исследований, имеющих высокую стоимость и опасных в реализации. Разработанная система управления прошла комплексные испытания в г. Актау, Казахстан; во время проведения пусконаладочных работ потребовалась лишь «тонкая» настройка отдельных контуров управления.

#### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Tazhibayeva I., Herrick A. Sodium Coolant Handling Project of BN-350 Fast Breeder Reactor. – Almaty: Glory Ltd., 2010. – 304 p.
2. Garcia H.E. Modeling and Control of a Sodium Conversion Process Applied to Nuclear Decommissioning Activities // Nuclear Technology. – 1998. – V. 123. – № 8. – P. 54–60.
3. Максимей И.В. Имитационное моделирование на ЭВМ. – М.: Радио и связь, 1988. – 232 с.
4. Дорф Р. Современные системы управления. – М.: Лаборатория базовых знаний, 2002. – 832 с.
5. Кривцов П.Ю., Павлов В.М. Разработка модели химического реактора установки по переработки натриевого теплоносителя // Известия Томского политехнического университета. – 2011. – Т. 318. – № 3. – С. 41–46.
6. Мамросенко К.А. Имитационно-тренажерные и обучающие распределенные системы // Программные продукты и системы. – 2008. – № 3. – С. 35–40.

*Поступила 20.01.2012 г.*