

**Доклад на конференции по разработке и применению
различных типов тренажеров для обучения персонала АЭС и
инженерных целей.**

**Опыт разработки и использования тренажеров для ПНР,
обучения персонала и поддержки эксплуатации на примере
3-го блока Калининской АЭС.**

Аркадов Г.В., Тимохин Е.С.(ВНИИАЭС), Выговский С.Б.,
Королев С.А., Краюшкин Ю.В., Чернаков В.А.(МИФИ)

Содержание

1	Введение	3
2	Характеристика АСУ ТП блока №3 Калининской АЭС.....	3
2.1	Новизна проекта АСУ ТП для российских АЭС и преемственность для последующих проектов.....	5
3	Фазы жизненного цикла (ЖЦ) АСУ ТП АЭС	5
4	Концепция создания инженерных средств поддержки ЖЦ АСУ ТП АЭС	6
5	Состав комплекса средств инженерной поддержки (СИП) АСУ ТП.....	7
6	Платформа реализации тренажеров и средств инженерной поддержки АСУ ТП... 7	
6.1	Создание моделей алгоритмов АСУ ТП и физических процессов в оборудовании	8
6.2	Работа с графическими изображениями	8
6.3	Отладка моделей на уровне исходной формы представления.....	9
6.4	Интеграция моделей в тренажер.....	9
6.5	Поддержка обучения на тренажере и управление тренажером.....	10
6.6	Сравнение версий графических изображений.....	10
7	Средства инженерной поддержки (СИП) АСУ ТП.....	10
7.1	САПР моделей систем управления	10
7.2	Модель АСУ ТП нижнего уровня (на основе ТПТС) и программа SIMUS для ее генерации	11
7.3	Средства визуализации и сравнения версий GET-проектов	12
7.4	Модель АСУ ТП верхнего уровня (СВБУ) и средства ее генерации.	14
7.5	Подсистема связи модели ТПТС с реальной СВБУ.....	15
7.6	Модель физических процессов в оборудовании АЭС.....	17
7.7	Многофункциональный анализатор АСУ ТП (МФА АСУ ТП).....	17
7.8	Программный комплекс рабочего места персонала цеха ТАИ (ПК РМ ЦТАИ) 17	
8	Средства инженерной поддержки эксплуатации реакторной установки на базе программной платформы «ЭНИКАД».....	18
8.1	Общая характеристика задач инженерной поддержки эксплуатации РУ	18
8.2	Концепция использования полномасштабных моделирующих комплексов в системе инженерной поддержки эксплуатации РУ (СИП РУ).....	19
8.3	Многофункциональный анализатор реакторной установки (МФА-РУ) (перевод: multifunctional analytical simulator of reactor and primary system MFA-RPS) АЭС с ВВЭР-1000 в СИП эксплуатации РУ на Калининской и Волгодонской АЭС20	
8.3.1	МФА-РУ АЭС с ВВЭР-1000 и его отличительные особенности	20
8.3.2	Объем моделируемых технологических систем и режимов	21
8.3.3	Состав МФА-РУ и перечень моделируемых явлений, характерных для реакторов ВВЭР-1000.....	22
8.3.4	Примеры использования МФА-РУ на АЭС с ВВЭР-1000	22
9	Учебные тренажеры для подготовки персонала блока №3 Калининской АЭС.....	24
9.1	Состав комплекта учебных тренажеров и анализаторов режимов АЭС	24
9.2	Комплексный компьютерный тренажер (ККТ) оперативного персонала БПУ 25	
9.3	Полномасштабный комплексный тренажер	25
9.4	Использование компьютерных анализаторов режимов в системе подготовки персонала Калининской АЭС на примере МФА-РУ	33
10	Заключение	34

1 Введение.

В докладе представлена информация о разработке и использовании средств инженерной поддержки эксплуатации АСУ ТП и реакторной установки АЭС, а также средств подготовки персонала для блока №3 Калининской АЭС.

Характерной особенностью этих средств является использование моделирующих комплексов и тренажеров, обеспечивающих моделирование как компонентов АСУ ТП, так и физических процессов в оборудовании блока.

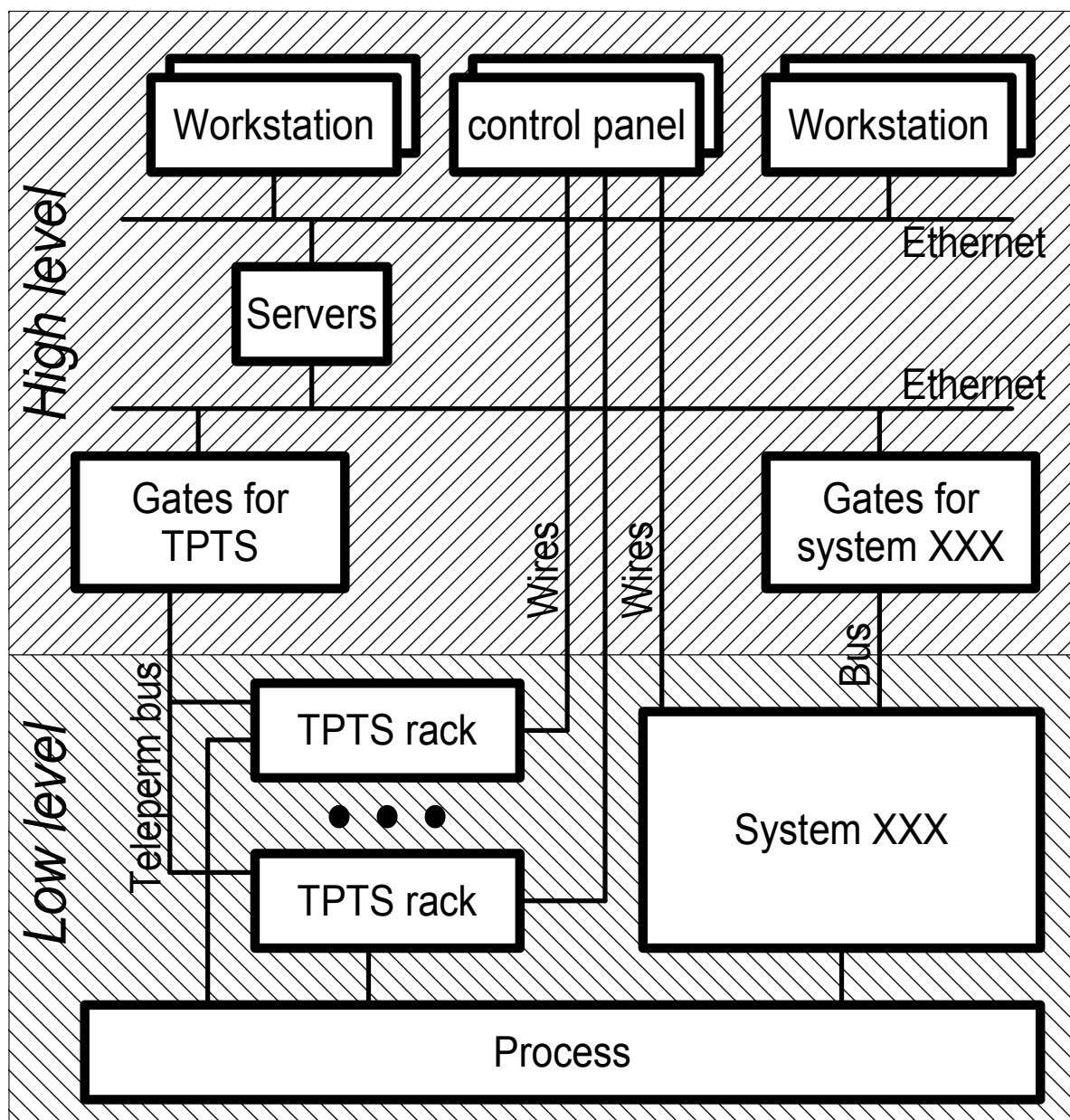
Блок №3 (ВВЭР-1000) Калининской АЭС пущен в эксплуатацию в 2005 году. Это первый в России блок АЭС, на котором внедрена комплексная компьютерная АСУ ТП. Генеральным конструктором – системным интегратором АСУ ТП для Калининской АЭС и для всех других блоков, вводимых по программе развития атомной энергетики России, является фирма «ВНИИАЭС».

Представленные в докладе средства инженерной поддержки, моделирующие системы и тренажеры разработаны МИФИ под руководством и в тесной кооперации с ВНИИАЭС.

Все эти системы реализованы на единой программной платформе ЭНИКАД, разработанной в МИФИ, что обеспечило возможность создания единой технологии реализации задач инженерной поддержки эксплуатации и тренажерной подготовки персонала АЭС.

2 Характеристика АСУ ТП блока №3 Калининской АЭС.

Структура АСУ ТП третьего энергоблока Калининской АЭС в упрощённом виде представлена на слайде.



Большая по объему часть нижнего уровня АСУ ТП третьего энергоблока реализована на программно-технических средствах ТПТС-51.

ТПТС-51 является подмножеством системы Teleperm XP-R фирмы Siemens, производимым по лицензии в России. ТПТС-51 представляет собой набор программируемых функциональных модулей и инфраструктуру для объединения их в систему управления. Для программирования модулей при проектировании АСУ ТП АЭС используется САПР GET-TM фирмы Сименс. GET-TM работает с графическим представлением алгоритмов. Лист схемы алгоритма, сделанный в GET-TM, называется GET-план. Объем одной из версий проекта АСУ ТП Калининской АЭС составил 49621 лист схем.

Верхний уровень АСУ ТП состоит из двух основных частей – компьютеризированной и некомпьютеризированной. Некомпьютеризированная часть – это обычные пульта и панели управления. Компьютеризированная часть достаточно велика, и носит собственное имя - СВБУ.

СВБУ выполнена на основе программного пакета RTA PLS фирмы «Real Time Computersoftware Ges.m.b.H». RTA PLS имеет хорошую историю применения на европейских промышленных объектах, однако его связь с ТПТС51 выполнена впервые.

2.1 Новизна проекта АСУ ТП для российских АЭС и преемственность для последующих проектов.

Создание и внедрение комплексной цифровой АСУ ТП на блоке №3 Калининской АЭС является «пилотным» проектом для российских АЭС. В рамках этого проекта отрабатывается не только технология реализации системы контроля и управления АЭС с использованием современных программно-технических средств, но и концепция БПУ нового поколения, базирующаяся на компьютерных технологиях представления информации и реализации управления оборудованием блока.

Проекты блоков АЭС, возводимых и модернизируемых по государственной программе развития атомной энергетики России будут базироваться на опыте проектирования, внедрения, пуско-наладки и эксплуатации цифровой АСУ ТП на Калининской АЭС.

Эффективность и качество проектирования, разработки, внедрения и последующего сопровождения цифровых АСУ ТП для этих блоков в значительной степени будет определяться наличием развитых средств инженерной поддержки всех фаз и процессов жизненного цикла АСУ ТП, средств поддержки эксплуатации блока и подготовки персонала АЭС. Вследствие этого опыт создания и использования средств инженерной поддержки и подготовки персонала для блока №3 Калининской АЭС представляет практический интерес для реализации последующих проектов АЭС.

3 Фазы жизненного цикла (ЖЦ) АСУ ТП АЭС

Жизненный цикл цифровых АСУ ТП АЭС с учетом сложившейся технологии их создания и внедрения включает следующие характерные фазы и процессы:

- разработка проектных алгоритмов АСУ ТП;
- разработка спецификаций в рамках заданий на ПТК АСУ ТП и его компонентов;
- разработка конечных функционально-логических алгоритмов (GET-планов) АСУ ТП;
- проектирование и разработка компонентов АСУ ТП;
- поэтапная верификация проекта и разработанных компонентов;
- интеграция компонентов АСУ ТП;
- валидация компонентов и АСУ ТП в целом;
- пуско-наладка АСУ ТП;
- обслуживание и эксплуатация АСУ ТП;
- модернизация / модификация АСУ ТП или ее компонентов;
- обучение персонала обслуживания ПТК АСУ ТП и управления блоком.

Современный уровень технологии проектирования, создания, и эксплуатации сложных компьютерных систем предполагает использование развитых инструментальных средств поддержки всех фаз их жизненного цикла. Практика создания АСУ ТП АЭС характерна тем, что различные этапы проекта, а также проекты отдельных подсистем АСУ ТП выполняют разные фирмы, использующие свои платформы и инструментальные средства поддержки разработки. Создание единой сквозной технологии разработки и реализации проекта и последующей эксплуатации АСУ ТП – задача, которая будет реализовываться в рамках проектов АЭС-2006, АЭС-

2009. В данном докладе описаны средства инженерной поддержки, позволяющие существенно повысить эффективность процедур анализа, отладки и поэтапной верификации проектных алгоритмов, модификации проектных решений, интеграции компонентов АСУ ТП, проведения пуско – наладочных работ, мониторинга функционирования ПТК АСУ ТП в условиях имеющейся технологии проектирования и создания компонентов АСУ ТП.

4 Концепция создания инженерных средств поддержки ЖЦ АСУ ТП АЭС

Определение функциональных требований к средствам инженерной поддержки ЖЦ АСУ ТП базировалось на учете следующих основных факторов:

- чрезвычайно большой объем алгоритмов АСУ ТП и их постоянная модификация в процессе разработки и реализации проекта определяют необходимость использования инструментальных средств их формирования, анализа и тестирования. Как правило, собственные инструментальные средства фирм-разработчиков компонентов АСУ ТП или недоступны фирме-интегратору АСУ ТП, а также АЭС, или функционально недостаточны;
- организации-разработчики отдельных стадий проекта АСУ ТП используют различные информационные технологии для проектирования и представления разработанных алгоритмов, что затрудняет реализацию процедур их интеграции, верификации и отладки;
- современный мировой опыт создания и внедрения цифровых АСУ ТП на электрических станциях показывает высокую эффективность использования моделей проектных алгоритмов отдельных компонентов и уровней АСУ ТП в составе средств поддержки их проектирования, отладки и тестирования;
- верификация, отладка и валидация АСУ ТП в максимально возможном объеме должны проводиться на площадке фирмы-интегратора до поставки на АЭС. Поэтому фирма должна располагать необходимыми инструментальными средствами, в том числе средствами имитации значений сигналов, программными моделями алгоритмов, моделями функционирования ПТК АСУ ТП, а также, для реализации динамического тестирования, моделями процессов в оборудовании АЭС.

Принятая концепция комплекса средств инженерной поддержки (СИП) ЖЦ АСУ ТП для блока №3 Калининской АЭС включает создание и использование:

- графических и программных моделей алгоритмов для всех уровней проекта АСУ ТП, а также средств их генерации из исходных форматов фирм-разработчиков;
- средств анализа функционирования и сравнения версий алгоритмов компонентов АСУ ТП на всех уровнях проекта;
- моделей функционирования компонентов АСУ ТП и средств имитации состояния элементов АСУ ТП и значений сигналов;
- моделей объекта управления (процессов в оборудовании АЭС);
- средств сопряжения программных моделей компонентов АСУ ТП с реальными компонентами ПТК АСУ ТП.

Данные средства должны реализовываться на общей программной платформе для обеспечения высокой эффективности поддержки реализации всех указанных выше фаз процессов ЖЦ АСУ ТП.

5 Состав комплекса средств инженерной поддержки (СИП) АСУ ТП

Комплекс средств инженерной поддержки АСУ ТП блока №3 Калининской АЭС включает:

- САПР моделей систем управления, реализующий в СИП функции графического и программного моделирования алгоритмов проекта систем АСУ ТП нижнего уровня.
- Модель АСУ ТП нижнего уровня (ТПТС) и средства ее генерации по GET- планам.
- Средства визуализации и сравнения GET- проектов.
- Модель АСУ ТП верхнего уровня (СВБУ) и средства ее генерации.
- Подсистема связи модели ТПТС с реальной СВБУ,
- Модель физических процессов в оборудовании АЭС.
- Многофункциональный анализатор АСУ ТП.
- Программный комплекс рабочего места персонала цеха ТАИ.

Функциональные возможности и использование данных СИП для поддержки реализации процессов ЖЦ АСУ ТП представлены ниже.

6 Платформа реализации тренажеров и средств инженерной поддержки АСУ ТП.

МИФИ под руководством и в тесном сотрудничестве с Главным Конструктором АСУ ТП российских АЭС – фирмой ВНИИАЭС – разработал для Калининской АЭС несколько тренажеров и средства инженерной поддержки АСУ ТП АЭС. Эти продукты базируются на созданной в МИФИ программной платформе ЭНИКАД. Целесообразность использования единой платформы обусловлена следующими факторами:

- для создания обоих типов систем необходимо решать множество сходных проблем, связанных с разработкой и эксплуатацией моделей и пользовательских интерфейсов.
- единая платформа позволяет обмениваться моделями, что сокращает затраты на разработку моделей
- одна универсальная платформа дешевле, чем несколько специализированных
- для обучения персонала, занятого инженерной поддержкой, необходимо моделировать некоторые средства инженерной поддержки

Программный комплекс ЭНИКАД функционирует на персональных компьютерах с ОС MS Windows. ЭНИКАД помогает решать множество проблем. Вот наиболее важные из них:

- Создание моделей алгоритмов АСУ ТП и физических процессов в оборудовании
- Работа с графическими изображениями (интерфейсами оператора, схемами САПР)
- Отладка моделей на уровне исходной формы представления (source-level debugging)
- Интеграция моделей в тренажер (поддерживаются однопроцессорные, многопроцессорные и сетевые конфигурации)
- Поддержка обучения на тренажере и управление тренажером (встроенная инструкторская станция, инфраструктура для моделирования отказов, сохранения/восстановления состояния модели и т.п.)
- Сравнение версий графических изображений (схем САПР, видеокадров)

Рассмотрим подходы к решению вышеперечисленных задач средствами ЭНИКАД

6.1 Создание моделей алгоритмов АСУ ТП и физических процессов в оборудовании

В ЭНИКАД использованы три различных метода создания моделей:

- автоматическая генерация
 - модели систем контроля и управления на базе ТПТС
 - модели СВБУ на базе RTA PLS
- разработка средствами графических САПР
 - модели теплогидравлических сетей и теплообменного оборудования
 - модели электрических сетей и электротехнического оборудования
 - модели систем контроля и управления
- ручной код
 - модели нейтронно-физических и теплогидравлических процессов в активной зоне

САПР моделей теплогидравлических и электрических сетей, а также моделей систем управления, встроены в ЭНИКАД. Они используют один и тот же графический редактор и одинаковые методы создания новых элементов.

6.2 Работа с графическими изображениями

Для работы с графикой в ЭНИКАД имеется графический редактор. Он решает все задачи по обработки графики, которые возникали у нас за последние 10 лет разработки тренажеров. Эти задачи можно поделить на два класса:

- создание человеко-машинных интерфейсов для тренажеров, в том числе моделей пультов управления
- создание схем при разработке моделей средствами САПР

Графический редактор позволяет создавать видеокadres и схемы, размещая на рисунке различные предопределённые элементы и соединяя их друг с другом. Большой диапазон решаемых графическим редактором задач (моделирование новых мнемознаков и типовых устройств) требует частого добавления новых элементов. Написание программы под каждый новый элемент трудоёмко. Поэтому в ЭНИКАД встроено создание новых элементов методом рисования их тем же графическим редактором.

Для создания человеко-машинных интерфейсов элементы графического редактора предусматривают возможность связи с данными модели. Связь эта двусторонняя - элементы могут как получать информацию от модели для отображения, так и передавать команды пользователя в модель. Всё взаимодействие строится на основе передачи значений переменных - например, нажатие мышкой на элементе "кнопка" может быть передано в модель как прибавление к связанной с кнопкой переменной величины, пропорциональной длительности нажатия.

Графический редактор имеет два режима работы - редактирования и управления. В режиме редактирования пользователь может менять видеокادر. В режиме управления возможна передача информации от видеокадра к модели. Изображение видеокадра в обоих режимах идентично.

Использование единого графического редактора для видеок кадров и схем САПР даёт возможность размещать на схеме САПР элементы, изначально предназначенные для видеок кадров. Это облегчает отладку моделей и улучшает документацию.

6.3 Отладка моделей на уровне исходной формы представления

Если модель создана из схемы средствами САПР, графический редактор ЭНИКАД может отобразить данные модели прямо на соответствующих элементах схемы.

Для САПР моделей автоматика это в основном делается раскраской соединительных линий в цвета, соответствующие передаваемым значениям. Такая раскраска делает интуитивно понятным прохождение логических сигналов по схеме.

Для других САПР применяется вывод числовых значений параметров под изображением элемента.

В любом САПР можно сделать изображение самого элемента зависящим от переменных модели. Например, элемент – «насос» САПР моделей теплогидравлических систем содержит график расходно-напорной характеристики, на котором отображается текущая рабочая точка.

В ходе отладки модели пользователь имеет весь арсенал средств воздействия на модель. Простейшие средства позволяют менять входные переменные вручную, задавая её имя и значение, а наиболее продвинутое - задавать зависимость переменных от времени и даже составлять программы воздействий с условными выражениями.

6.4 Интеграция моделей в тренажер

Модель составляется из нескольких подмоделей, которые являются относительно независимыми частями, связанными друг с другом исключительно по данным. Каждая подмодель экспортирует специальную подпрограмму для расчёта временного шага. Для того, чтобы смоделировать один временной шаг, ЭНИКАД вызывает каждую из этих подпрограмм и затем проводит обмен данными. ЭНИКАД создаёт отдельный поток для каждой DLL модели, что позволяет эффективно использовать многопроцессорные и многоядерные вычислительные системы и при этом не усложнять модели поддержкой многопоточности.

Связь подмоделей по данным основывается на концепции глобального имени переменной. Каждая подмодель объявляет своим переменным глобальные имена с указанием способа использования: для приёма данных, передачи данных, хранения констант или текущего состояния. Переменные с одинаковыми глобальными именами связываются друг с другом. При связывании проверяется корректность связей, например нельзя иметь два выхода с одинаковым глобальным именем. Связывание происходит в два этапа, в зависимости от взаимного расположения подмоделей. Для подмоделей, располагаемых в одной DLL, связывание проводится перед компиляцией исходных текстов. Для подмоделей, располагаемых в различных DLL, как в одной машине, так и в разных – на этапе загрузки модели в память.

Платформа ЭНИКАД обеспечивает доступ видеок кадров к переменным моделей по глобальным именам независимо от взаимного расположения видеок кадра и модели в сети.

6.5 Поддержка обучения на тренажере и управление тренажером

Для реализации обучения на тренажере и управления тренажером ЭНИКАД оснащён встроенной инструкторской станцией. Она обеспечивает выполнение следующих функций:

- конфигурирование режимов работы и запуск ПТК (программно-технического комплекса) тренажера
- управление состояниями (начальными условиями) модели (загрузка состояния, сохранение состояния, возврат на запомненное состояние, сверка ключей)
- управление моделью (пуск/заморозка/изменение масштаба моделирования)
- контроль состояния моделируемого оборудования (отображение видеок кадров и графиков, управление отказами)
- регистрация параметров моделируемого процесса и действий обучаемых и инструкторов
- контроль работоспособности ПТК тренажера
- управление УТЗ (*учебно-тренировочные задачи – training tasks*) (настройки: сценарии, начальные условия, параметры регистрации)
- воспроизведение ранее выполненной УТЗ
- генерация отчетов по выполненным УТЗ
- управление архивами УТЗ

6.6 Сравнение версий графических изображений

В процессе проектирования систем часто возникает необходимость сравнить, в чём конкретно одна версия отличается от другой. Это характерно для проектирования тренажерных моделей и алгоритмов реальных АСУ ТП. Обычно исходным представлением алгоритма является его схема. В ЭНИКАД встроены функции сравнения схем и видеок кадров. Эти функции обнаруживают такие изменения, как

- добавление нового элемента
- удаление элемента
- перемещение элемента
- изменение атрибутов элемента

Применение функции сравнения к изображениям алгоритмов АСУ ТП, полученных непосредственно из используемой для её проектирования САПР, позволяет выявить различия в версиях реальной АСУ ТП. Так как для АСУ ТП на базе ТПТС в ЭНИКАД есть конвертор, позволяющий считывать непосредственно файлы GET-планов (алгоритмов), эта возможность реализуется автоматически.

7 Средства инженерной поддержки (СИП) АСУ ТП.

7.1 САПР моделей систем управления

Система автоматического проектирования предназначена для создания графических и программных моделей логико-динамических систем управления.

Объектом САПР является технологическая система или система управления, которую можно смоделировать путём разбиения её на отдельные элементы, связанные по сигналам между собой, с последовательным моделированием элементов. Таким образом можно смоделировать практически любые системы сигнализации, защиты и управления технологическим оборудованием. В случае моделирования системы

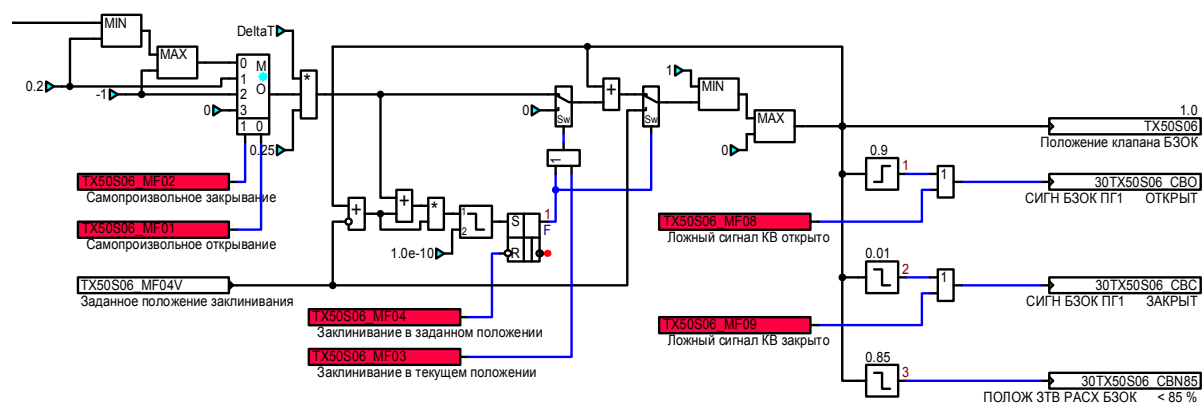
управления, построенной на логических элементах, возможно прямое моделирование схемы системы. При моделировании цифровой системы управления в качестве элементов выступают отдельные блоки алгоритмов, которые реализует моделируемая система. В качестве элементов схемы системы могут использоваться как простейшие логические, аналоговые и смешанные элементы, так и элементы пользователя, реализующие отдельные блоки моделируемой системы (при заданной полноте моделирования). Возможно как прямое, так и блочное моделирование технологической системы управления с любой необходимой степенью детализации.

В САПР моделей систем управления:

- обеспечена возможность моделирования нескольких систем как одной модели или как нескольких подмоделей;
- обеспечено автоматическое определение порядка обработки элементов;
- обеспечена информационная поддержка технологических имен сигналов, отличных от стандартов программных имен (длинные имена, русскоязычные и смешанные имена, использование нестандартных символов и т.д.);
- обеспечена открытость разрабатываемой модели, легкость ее настройки или модификации без использования средств программирования;
- обеспечено автоматическое документирование разрабатываемых моделей на схемном уровне.

САПР моделей систем управления может быть расширена с помощью внутренних средств; есть возможность создания индивидуальной элементной базы для моделирования конкретной системы. Для разработки средствами САПР моделей возможно привлечение специалистов-технологов без знания основ программирования.

Пример фрагмента схемы приведён на рисунке:



7.2 Модель АСУ ТП нижнего уровня (на основе ТПТС) и программа SIMUS для ее генерации

Для генерации модели АСУ ТП, основанного на ТПТС, в МИФИ разработана программа SIMUS. Эта программа преобразует копию GET-проекта в модель соответствующей ему АСУ ТП.

Модель АСУ ТП нижнего уровня решает следующие задачи:

- Управление моделируемым физическим процессом
- Моделирование управляющей системы с целью проверки её работоспособности
- Взаимодействие с моделями СВБУ и пультов при моделировании человеко-машинного интерфейса энергоблока

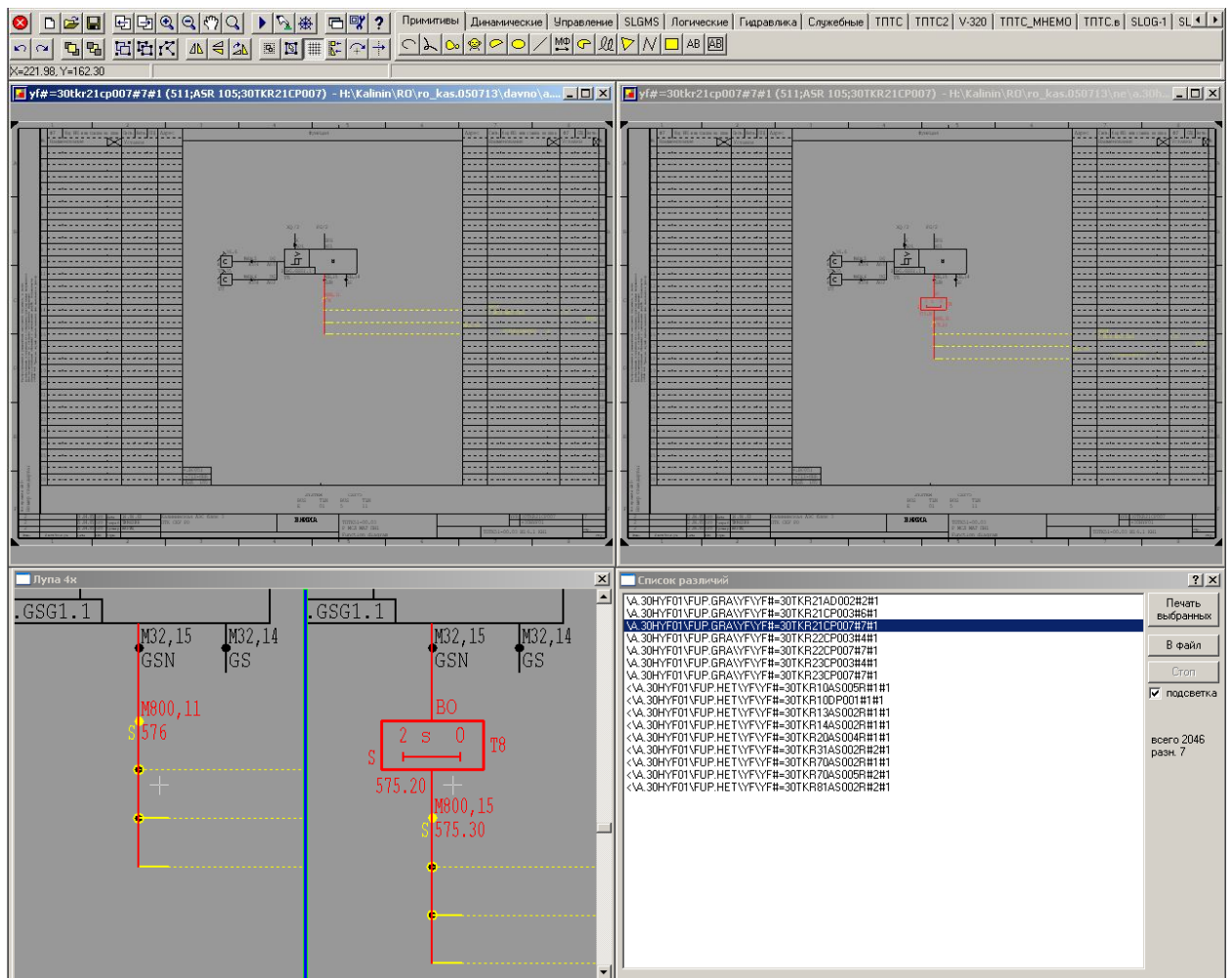
- Поставки информации для визуализации деталей работы алгоритмов АСУ ТП на GET-планах
- Проведения численных экспериментов перед модернизацией АСУ ТП (моделируется новая версия алгоритмов, сравнивается с предыдущей, и принимается решение – загрузить новую версию в реальную систему управления или оставить как было)
- Проведения численных экспериментов при изучении ТПТС персоналом, в том числе с возможностью пошагового прохода алгоритма

7.3 Средства визуализации и сравнения версий GET-проектов

Средства визуализации GET-проектов обеспечивают выполнение следующих функций:

- Перенос копии GET-проекта с инженерной станции ТПТС на персональный компьютер, что делает их доступными для многих пользователей. Пользователи могут использовать одну копию по сети или иметь каждый свой экземпляр.
- Отображение составляющих проект GET-планов, с возможностью привязки изображения к модели. Во время моделирования прямо на GET-плане можно видеть значения сигналов, проходящих между его элементами.
- Навигация по проекту, включающая:
 - поиск листа по фрагменту наименования GET-плана, или используемого им сигнала, или упоминаемой на нём телеграммы.
 - поиск всех GET-планов, реализуемым заданным функциональным модулем.
 - переход с GET-плана источника сигнала на GET-план приёмника и наоборот. Последний использованный для перехода сигнал подсвечивается.
- Вызов управляющих/информационных окон для элементов GET-планов, имеющих интерфейс с верхним уровнем. Упомянутые окна функционально похожи на окна NOVI в OM-650 фирмы Siemens.
- Отображение параметров настройки элемента GET-плана, с указанием значений, адресов и кратких описаний.

Пример GET-плана приведён на следующем слайде:



7.4 Модель АСУ ТП верхнего уровня (СВБУ) и средства ее генерации.

Модель СВБУ предназначена для использования в тренажерах (в том числе ПМТ) и СИП. В аналитических тренажерах она применяется также как средство вызова на экран GET-плана, связанного с имеющимся на видеокadre мнемознаком.

При разработке средств генерации модели СВБУ учитывались следующие факторы:

- СВБУ является новой системой и можно прогнозировать внесение многочисленных изменений как в процессе пуско-наладки, так и при дальнейшей эксплуатации энергоблока;
- СВБУ содержит большое количество видеокadre и других экранных элементов, ручное воспроизведение и верификация которых является очень трудоемкой задачей;
- Вся графическая информация СВБУ хранится в файлах известного формата.

Модель СВБУ является полной функциональной репликой своего прототипа. В основу реализации положен имитатор исполняющей системы RTA PLS, функционирующий с использованием актуальных файлов графических моделей формата и таблиц баз данных прототипа (RTDB). В силу особенностей графической среды ЭНИКАД и для повышения производительности моделирующего комплекса

актуальные файлы СВБУ используются в предварительно скомпилированном виде, а не в режиме интерпретации.

Модель СВБУ обеспечивает следующие функции дисплейного рабочего места СВБУ:

- конфигурацию рабочего места в соответствии с его назначением;
- поддержку одного или двух дисплеев и всех устройств ввода, предусмотренных на рабочем месте;
- авторизацию пользователя и определение его прав по мониторингу и управлению;
- воспроизведение графической информации всех видов, предусмотренной на экранах рабочего места, включая:
 - служебные области навигации и сигнализации;
 - технологические видеокadres всех типов;
 - анимированные схемы алгоритмов управления;
 - окна управления и информационные окна;
 - окна сигнализации;
 - окна протоколов;
 - окна графиков.
- навигацию по видеокadрам;
- реализацию команд технологического управления и обслуживания оборудования, задаваемых с помощью трекбола (мыши) или клавиатуры;
- предоставление доступа к предусмотренной эксплуатационной документации;
- вывод на печать информации с текущих видеокadров и других окон.

Модель СВБУ обеспечивает выполнение всех функций управления и отображения на экраны коллективного пользования, используемые в штатной СВБУ, а так же функции сервера PLS.

Модель СВБУ реализуется на базе платформы ЭНИКАД. Моделирование одной рабочей станции СВБУ требует одного компьютера с таким же числом мониторов. На каждом компьютере работает исполняющая система ЭНИКАД, которая обеспечивает взаимодействие с остальными моделями тренажера. Такое решение обеспечивает как возможность построения работоспособных фрагментов модели СВБУ на этапе тестирования системы, так и функционирование полного комплекса модели СВБУ в различных приложениях.

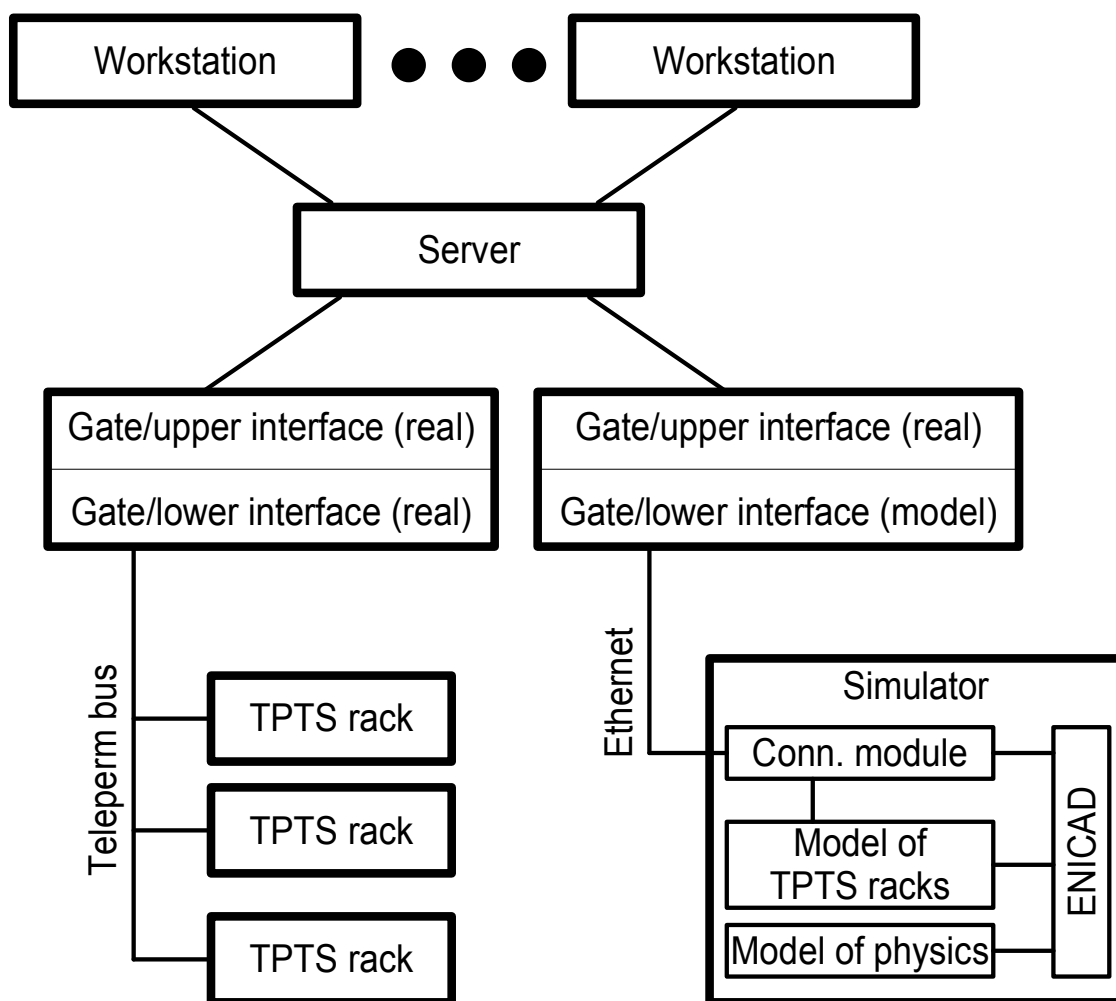
Модель СВБУ создается путем процедуры автоматической генерации из рабочих файлов штатной системы.

7.5 Подсистема связи модели ТПТС с реальной СВБУ.

Подсистема связи модели ТПТС с реальной СВБУ предназначена для проведения испытаний СВБУ на площадке её поставщика (ОАО ВНИИАЭС). В состав подсистемы включены:

- Модуль связи для ЭНИКАД, выполняющий большинство функций подсистемы
- Программа связи, подменяющая собой одну из программ шлюза СВБУ и применяемая для доставки запросов в модуль и ответов модуля в шлюз СВБУ.

Структура испытаний СВБУ в упрощённом виде представлена на рис:



СВБУ является новой системой – на блоке № 3 Калининской АЭС было её первое внедрение. При её разработке потребовалось проверить её работоспособность и оценить пропускную способность. Выполнение этих проверок на реальном оборудовании затруднительно (и, теоретически, опасно). Для выполнения проверок на модели и была создана подсистема связи модели ТПТС с реальной СВБУ.

Эта подсистема выполняет следующие функции:

- моделирование программы “lower interface” шлюза сопряжения (см. рисунок)
- передачу телеграмм AKS, MKS, LUT, BST в шлюз сопряжения
- приём запросов подписки на телеграммы AKS, MKS, LUT, BST от шлюза сопряжения и передача ответов на эти запросы
- приём PL/PS запросов от шлюза сопряжения и передача ответов на эти запросы

Существует альтернативный вариант программы “lower interface (model)”, позволяющий подсистеме работать с СВБУ производства ИПУ.

Последнее время стала доступна новая версия шины ТПТС, физически совместимая с Ethernet. Эта шина подходит для прямого моделирования интерфейса ТПТС, позволяющего избежать изменений в ПО шлюза. Мы планируем соответствующее развитие модуля связи на конец этого года.

7.6 Модель физических процессов в оборудовании АЭС.

Назначение модели физических процессов, работающей в составе учебного тренажера, не требует обсуждения. Для СИП такая модель может быть полезна при решении следующих задач:

- Динамическое тестирование АСУ ТП: через модель замыкаются обратные связи, которые не всегда очевидны и могут приводить к неправильной работе АСУ ТП энергоблока. До пуска блока в эксплуатацию возможно динамическое тестирование его АСУ ТП с использованием модели физических процессов блока-прототипа.
- Оценка качества человеко-машинного интерфейса АСУ ТП, поиск возможностей его улучшения. Без эксперимента оценить качество интерфейса в отношении выполнимости сложных операций, удобства идентификации состояния оборудования оператором энергоблока и т.п. достаточно сложно. При наличии моделей, разрабатываемых для ПМТ, появляется возможность провести эксперимент на модели.

Применяемая в ПМТ третьего энергоблока Калининской АЭС модель физических процессов представлена ниже.

7.7 Многофункциональный анализатор АСУ ТП (МФА АСУ ТП)

Многофункциональный анализатор АСУ ТП (МФА АСУ ТП) предназначен для

- анализа проекта АСУ ТП, то есть
 - изучения устройства
 - поиска ошибок в проекте
 - верификации и валидации
 - подготовки модернизаций
- подготовки как оперативного персонала БПУ, так и персонала РЦ, ТЦ, ЭЦ и ЦТАИ.

МФА АСУ ТП представляет собой интегрированный комплекс модели АСУ ТП и модели физических процессов, выполняемый на двух быстродействующих, многоядерных, двухмониторных ПК. Такой МФА АСУ ТП легко тиражируется т.к. использует только минимальное количество стандартных ПК. Это позволяет получить необходимое количество рабочих мест обучаемых, и параллельно с ПМТ вести эффективную подготовку категорий персонала, не относящихся к оперативному персоналу БПУ.

Кроме того, программный комплекс МФА АСУ ТП дополнен отсутствующими на ПМТ аналогами средств программного комплекса рабочего места ЦТАИ (ПК РМ ЦТАИ), описанного ниже, что не только позволяет вести на МФА АСУ ТП полноценную подготовку персонала ЦТАИ, но и значительно увеличивает его возможности как анализатора алгоритмов управления. Как показала практика внедрения АСУ ТП 3-го энергоблока, необходимость глубокого анализа алгоритмов и взаимодействия нижнего и верхнего уровня АСУ ТП возникает уже с самого начала ПНР. Если бы МФА АСУ ТП к этому моменту существовал, сроки и затраты на ПНР АСУ ТП были бы существенно меньше.

7.8 Программный комплекс рабочего места персонала цеха ТАИ (ПК РМ ЦТАИ)

ПК РМ ЦТАИ включает в себя представленные выше средства инженерной поддержки. Кроме того, версия подсистемы связи с ТПТС для платформы ЭНИКАД,

входящая в его состав, имеет дополнительные возможности, которые позволяют использовать реализованный в ТПТС51 режим имитации (simulation mode) удобным способом. Термин «режим имитации» (simulation mode) не предусматривает моделирования. Режим имитации позволяет заменить реальное значение параметра, принимаемое функциональным модулем с датчика или из другого модуля, на значение, заданное пользователем. В результате появляется возможность проводить некоторые испытания алгоритмов на реальной аппаратуре без моделирования. Кроме того, это позволяет заменить показания неустойчиво работающего датчика на константу, тем самым предотвратив засорение протокола сообщениями сломался/починился. ПК РМ ЦТАИ, в отличие от оригинальных программ фирмы Сименс, позволяет управлять режимом имитации непосредственно с графических образов алгоритмов (GET-планов).

8 Средства инженерной поддержки эксплуатации реакторной установки на базе программной платформы «ЭНИКАД».

8.1 Общая характеристика задач инженерной поддержки эксплуатации РУ

В атомной энергетике России (как и в других странах мира) одной из важнейших и актуальных проблем является повышение экономичности эксплуатации оборудования станции при сохранении высокого уровня их безопасности. В настоящем разделе выделяются только те эксплуатационные задачи, которые связаны с совершенствованием инженерной поддержки эксплуатации АЭС с ВВЭР.

Среди задач инженерной поддержки эксплуатации реакторных установок можно выделить группы задач, для реализации которых наряду со штатными средствами расчетного сопровождения целесообразно использовать дополнительные и альтернативные моделирующие средства. Это, прежде всего, следующие задачи:

- Повышение коэффициента использования установленной мощности за счет совершенствования расчетно-измерительного сопровождения эксплуатации. При этом нужно иметь в виду, что точность расчетов может быть повышена не только за счет глубины моделирования физических процессов, но и за счет повышения объема моделируемого оборудования АЭС.
- Обеспечение безопасности эксплуатации РУ. В качестве примера приведем экспериментальное определение «веса» всех стержней аварийной защиты на МКУ. Не вдаваясь в детали экспериментальной методики, можно сказать, что данная методика имеет много неопределенностей в интерпретации результатов измерений. Поскольку «вес» стержней является одним из важнейших параметров, определяющих уровень ядерной безопасности РУ, то устранение неопределенности при определении «веса» является актуальной задачей инженерной поддержки эксплуатации.
- Расчетное обоснование симптомо-ориентированных инструкций по управлению аварийными процессами на АЭС с ВВЭР-1000.

8.2 Концепция использования полномасштабных моделирующих комплексов в системе инженерной поддержки эксплуатации РУ (СИП РУ)

Современные требования к точности и корректности выполняемых расчетов определяют необходимость, наряду со стандартными штатными кодами расчетного сопровождения, использовать комплексные модели, обеспечивающие объем моделирования систем АЭС, аналогичный ПМТ, а качество моделей должно быть сопоставимо с расчетными кодами сопровождения. Особенно важно, чтобы в моделях присутствовали модели АСУ ТП, работа которых существенно влияет на получаемые результаты. Необходимость использования комплексных моделей определяется следующими факторами.

1. Структура расчетного обоснования безопасности и сопровождения эксплуатации энергоблоков АЭС с ВВЭР давно сложилась. В России основу ее сегодня составляют расчетные программы, разрабатываемые ВНИИАЭС, РНЦ «Курчатовский Институт», ОКБ «Гидропресс». Эти программы имеют высокую точность моделирования наиболее важных для оценки ядерной безопасности технологических элементов АЭС (активная зона, реактор, основные элементы ГЦК), но не моделируют подробно все элементы технологических систем в связном виде, как это делается, например, в полномасштабных тренажерах (ПМТ). Многие решения при обосновании регламентных ограничений различных параметров РУ принимаются этими организациями по результатам расчетов разных сторон одного явления, как правило, с целью повышения консервативности, без учета обратных связей между ними (разными сторонами одного явления). Учет этих связей в комплексных моделях приводит к смягчению регламентных ограничений, что очень важно при решении задачи повышения КИУМ АЭС.

2. При проведении расчетного обоснования новых регламентных ограничений эксплуатации в соответствии с принципом разнообразия следует использовать несколько отличных друг от друга программ и программных комплексов расчета одних и тех же характеристик оборудования, что приводит к увеличению надежности и доверительности полученных результатов. Рекомендации МАГАТЭ по этому вопросу также включают проведение эксплуатационных расчетов с использованием разного программного обеспечения, базирующегося на альтернативных методах расчета. При выполнении данных рекомендаций очень важно иметь в виду, что используемые модели активной зоны должны базироваться на альтернативных библиотеках нейтронно-физических констант, подготовленных разными методами (в России альтернативные библиотеки могут быть подготовлены такими программами, как ТВС-М, UNK, САПФИР, ГЕТЕРА). Альтернативные тепло-гидравлические программы должны базироваться на разных замыкающих соотношениях и корреляциях при расчете свойств теплоносителя и материалов (особенно в активной зоне).

Обобщение результатов, полученных по разным программам, как правило, приближает расчетные данные к экспериментальным значениям и позволяет повысить точность расчетов.

Таким образом, реализуемая концепция совершенствования инженерной поддержки эксплуатации РУ включает:

- создание и внедрение, в дополнение к штатным расчетным кодам, комплексных моделей РУ;
- комплексные модели должны включать объем моделируемого оборудования, близкий к ПМТ, и базироваться на альтернативных по отношению к штатным кодам методах расчета физических процессов при сопоставимой точности расчёта;

- комплексные модели должны функционировать в реальном и ускоренном масштабе времени, иметь развитый пользовательский и графический интерфейс, а также программный интерфейс со штатными БД и программами расчетного сопровождения эксплуатации РУ с целью обеспечения удобства и эффективности их эксплуатации.

8.3 Многофункциональный анализатор реакторной установки (МФА-РУ) АЭС с ВВЭР-1000 в СИП эксплуатации РУ на Калининской и Волгодонской АЭС

В настоящем разделе приведены общее описание и примеры использования многофункционального анализатора режимов реакторной установки ВВЭР-1000 в СИП эксплуатации Калининской АЭС и Волгодонской АЭС. Анализатор реакторной установки (МФА-РУ) АЭС с ВВЭР-1000 предназначен для решения задач, связанных с расчетной поддержкой эксплуатации РУ и подготовкой инженерного и оперативного персонала АЭС. Анализатор разработан на базе программной платформы ЭНИКАД и сдан в эксплуатацию соответственно в 2001 году на Калининской АЭС и в 2007 году на Волгодонской АЭС.

МФА-РУ используется как дополнительное программное средство к расчетным программам сопровождения и для решения ряда эксплуатационных задач при реализации мероприятий по повышению КИУМ АЭС и модернизации оборудования на Калининской АЭС. С теми же целями начата эксплуатация МФА-РУ на Волгодонской АЭС.

8.3.1 МФА-РУ АЭС с ВВЭР-1000 и его отличительные особенности

Анализатор реакторной установки (МФА-РУ) АЭС с ВВЭР-1000 предназначен для решения следующих задач, связанных с эксплуатацией энергоблока, надзором за уровнем ядерной и технической безопасности реакторной установки и подготовкой инженерного и оперативного персонала АЭС:

- Прогнозирование основных нейтронно-физических и тепло-гидравлических характеристик активной зоны и параметров топливного цикла при учете их взаимосвязи с параметрами 1-го контура и 2-го контура.
- Расчетная поддержка проведения плановых экспериментов по определению основных нейтронно-физических характеристик активной зоны и «веса» аварийной защиты (АЗ) в составе системы управления и защиты реактора (СУЗ).
- Исследование различных алгоритмов контроля и управления системами реакторной установки в стационарных и динамических режимах и выработка рекомендаций по их совершенствованию.
- Обработка в режиме on-line стационарных данных, проверка показаний стационарных датчиков, их дополнительная отбраковка и фильтрация с помощью моделей МФА. и уточнение расчета теплового баланса РУ.
- Формирование целостного понимания процессов, происходящих в реакторной установке и зависимости их протекания от типа топливной загрузки в ходе профессиональной подготовки персонала АЭС.
- Отработка действий оперативного персонала по оптимальному управлению энергоблоком (при различных критериях оптимальности) в плановых режимах и режимах с нарушением нормальных условий эксплуатации, связанных с переходом энергоблока с одного значения мощности на другое и наличием офсетных колебаний мощности.
- Расчетное обоснование симптомно-ориентированных инструкций по управлению аварийными процессами на АЭС с ВВЭР-1000.

Ниже приведены отличительные особенности МФА-РУ:

- Обеспечение реального масштаба моделирования процессов при решении тренажерных задач и режима уплотненного времени при решении многих инженерных задач эксплуатации.
- Наличие возможности МФА-РУ читать исходные данные расчетного сопровождения в соответствии с их структурой, принятой на АЭС с ВВЭР. Это позволяет проводить расчеты выгорания топлива с учетом реального графика тепловых нагрузок на активную зону до произвольного момента кампании реактора.
- Обеспечение возможности выделения из модели МФА-РУ автономно работающей модели реактора МФА-Р без проведения специальных операций по декомпозиции полномасштабной модели. Такая возможность выделения МФА-Р эффективна для формирования начальных состояний полной модели для произвольной топливной загрузки и на произвольный момент кампании. В рамках МФА-Р возможно уплотнение времени до 1000000 раз и быстрый расчет выгорания, как в программах расчетного сопровождения.
- Наличие возможности подсоединения произвольных программ, написанных на языках ФОРТРАН или СИ, к анализатору МФА-РУ или МФА-Р. Такая возможность, обеспечиваемая программным комплексом «ЭНИКАД», удобна для формирования более гибких сценарных воздействий на модель и для организации связи станционных баз данных с переменными моделирующего комплекса.
- Поставки МФА-РУ и МФА-Р на АЭС осуществлялись с библиотекой нейтронно-физических (н/ф) констант для всей номенклатуры ТВС, используемых на Калининской и Волгодонской АЭС за все годы эксплуатации (57 типов конструкций ТВС). Библиотеки н/ф констант, используемые в модели активной зоны МФА-РУ, являются альтернативными к библиотекам н/ф констант, используемым в расчетных кодах сопровождения на АЭС.
- Совмещение в едином коде модели нейтронной кинетики, модели теплогидравлики активной зоны и модели течения теплоносителя от холодных петель главного циркуляционного контура (ГЦК) до выхода в горячие петли ГЦК. Данное совмещение позволяет повысить точность расчета нейтронных и температурных полей распределения по объёму зоны.

8.3.2 Объем моделируемых технологических систем и режимов

В состав моделируемого оборудования включены все технологические системы АЭС, входящие в состав РУ. Моделируются основные и вспомогательные системы 1-го контура.

Для имитации второго контура моделируются трубопроводы подачи питательной воды в ПГ и трубопроводы острого пара, включая БЗОК, ГПЗ, СРК, БРУ-А, БРУ-К и сами ПГ.

МФА-РУ позволяет имитировать нормальные условия эксплуатации технологического оборудования 1-го контура и его систем, нарушение нормальных условий эксплуатации, а также аварийные ситуации, связанные с отказами со срабатыванием защит и блокировок систем 1-го и 2-го контуров (от ПГ до ГПК) и различными отказами технологического оборудования. Помимо перечня проектных режимов, анализатор может моделировать аварийные режимы с наложением множественных отказов разного оборудования..

8.3.3 Состав МФА-РУ и перечень моделируемых явлений, характерных для реакторов ВВЭР-1000

Ядро МФА-РУ АЭС с ВВЭР-1000 составляет программный комплекс «ПРОСТОР» ([..]), аттестованный ГАН РФ и предназначенный для моделирования стационарных и динамических процессов в РУ.

Для иллюстрации глубины моделирования физических процессов в оборудовании РУ укажем моделируемые в МФА-РУ процессы:

- Явление неполного перемешивания теплоносителя на входе в нижнюю камеру смешения из опускных участков и явление неполного перемешивания теплоносителя на выходе из активной зоны в верхней камере смешения.
- Температурное расслоение теплоносителя на входе в активную зону при несимметричной работе парогенераторов, а также температурное расслоение теплоносителя при его течении в горячих петлях ГЦК.
- Учитываются различия в процессах теплообмена в трубках под ПЭЛ и межтвэльном пространстве внутри кассеты.
- Зависимость теплопроводных свойств газового зазора между оболочкой и топливом от глубины его выгорания и величины тепловых потоков и возможность парациркониевой реакции на оболочке ТВЭЛ;
- Моделируются ксеноновые процессы в зоне в режиме реального и уплотненного времени.
- Спектральная история выгорания, характеризующая зависимость динамики изотопного состава от условий выгорания топлива.
- Явление резонансной неустойчивости реактора при его работе на мощности и естественной циркуляции теплоносителя с воспроизведением так называемых «волн ЛАССАЛЯ».
- Явление нейтронной вспышки на мгновенных нейтронах в реакторе при мгновенном извлечении большего количества органов СУЗ из активной зоны (как в режиме реального времени, так и в режиме автоматического выбора шага по времени).
- Работа датчиков прямой зарядки в динамическом режиме при полной детализации реакций, происходящих при захвате родием гамма-излучения и нейтронов.
- Стационарный и динамический выход радиоактивных газов и других легких фракций через микротрещины тепловыделяющего элемента в воду и активация нейтронами кислорода в воде.
- Явление обезвоживания активной зоны с повторным заливом зоны и переход с общей циркуляции теплоносителя в реакторе на циркуляцию между ТВС при падении уровня реактора ниже уровня выходных патрубков горячих петель главного циркуляционного контура (ГЦК).

8.3.4 Примеры использования МФА-РУ на АЭС с ВВЭР-1000

На Калининской и Волгодонской АЭС МФА-РУ используется в качестве дополнительного программного средства к имеющимся программам сопровождения, работающего на альтернативных принципах и подходах. На Калининской АЭС регулярно выпускаются отчеты с результатами прогнозных и поверочных расчетов основных нейтронно-физических характеристик активной зоны, полученных по МФА-РУ. Проводится перекрестная верификация результатов расчета по штатной программе

сопровождения и МФА-РУ, которая признана целесообразной и полезной для повышения надежности полученных результатов.

Помимо статических расчетов с использованием МФА-РУ, проводится динамическое моделирование экспериментального определения «веса» аварийной защиты и коэффициентов реактивности по температуре теплоносителя на МКУ. Результаты данного моделирования также регулярно оформляются в виде отчетов. В последнее время результаты динамического моделирования по МФА-РУ стали включаться в официальные отчетные материалы Калининской АЭС для Эксплуатирующей организации. Более того, в отдельных экспериментах были найдены ошибки при проведении измерений «веса» аварийной защиты. Аналогичная работа планируется и на Волгодонской АЭС.

Другим примером из опыта использования МФА-РУ в СИП на Калининской АЭС явилась разработка нового алгоритма оперативной оценки критической концентрации борной кислоты при пуске блока. При этом определяется и время достижения критического состояния. Применение МФА-РУ позволило оценить влияние пространственных эффектов и скорости выведения борной кислоты на точность получаемых результатов.

Использование предложенного алгоритма для обработки данных, получаемых при реальных пусках блоков, показали существенное снижение погрешности определения критической концентрации борной кислоты по сравнению с результатом физических расчетов по штатным программам сопровождения, что позволяет заметно сократить потери времени при операциях боромассообмена. Алгоритм аттестован ГАН РФ и используется в качестве альтернативного к применяемому в настоящее время на АЭС алгоритму.

Третьим примером использования МФА-РУ на Калининской АЭС является его применение в решении задачи по уточнению определения тепловой мощности активной зоны, с величиной которой связаны многие регламентные ограничения эксплуатации. Штатная методика, по которой традиционно определяется величина тепловой мощности, обладает погрешностью, равной 2%. Модификация методики за счет использования МФА-РУ, использующего в качестве исходных данных показания стационарных датчиков, позволяет учитывать не только физические особенности процессов, протекающих в 1-ом и 2-ом контурах, влияние работы вспомогательных систем на тепловые и массовые балансы в РУ, но и особенности работы различных регуляторов и их влияние на показания стационарных датчиков, что в настоящих методиках не учитывается.

Применение МФА-РУ в этой задаче позволяет снизить погрешность определения тепловой мощности как минимум в 1.5 раза и существенно уточнить значения температуры теплоносителя по горячим петлям и расходов теплоносителя через ГЦН.

МФА-РУ также использовался в проводимых исследованиях возможности применения режима естественной циркуляции теплоносителя (ЕЦТ) в расширенной области параметров РУ на АЭС с ВВЭР-1000 при нарушении нормальных условий эксплуатации. Данное исследование проводилось по заданию Эксплуатирующей организации- концерна «Росэнергоатом».

9 Учебные тренажеры для подготовки персонала блока №3 Калининской АЭС

9.1 Состав комплекта учебных тренажеров и анализаторов режимов АЭС

В учебный центр Калининской АЭС на протяжении последних нескольких лет был поставлен ряд тренажеров различных типов, и они активно используются в системе подготовки персонала станции. В частности, для персонала блока №3 нами были разработаны и поставлены:

- многофункциональный анализатор режимов реакторной установки (МФА-РУ);
- многофункциональный анализатор режимов реакторного отделения (МФА-РО);
- многофункциональный анализатор режимов турбинного отделения (МФА-ТО);
- компьютерный тренажер по рабочему месту персонала цеха тепловой автоматики и измерений (КТ РМ ЦТАИ);
- компьютерный тренажер по системам химводоочистки (КТ СХВО);
- комплексный компьютерный тренажер оперативного персонала БПУ (ККТ);
- полномасштабный комплексный тренажер оперативного персонала БПУ (ПМТ).

Все перечисленные учебные тренажеры и анализаторы разработаны на единой программной платформе ЭНИКАД с использованием входящих в его состав инструментальных средств разработки моделей - САПР моделей технологических систем и генераторов моделей компонентов АСУ ТП.

Компьютерные тренажеры и анализаторы режимов по рабочим местам операторов, по отделениям АЭС и по отдельным технологическим системам применяются для индивидуальной подготовки персонала, в отличие от ПМТ, предназначенного для тренировки смены БПУ. Использование компьютерных тренажеров и анализаторов в системе подготовки персонала направлено на формирование целостных знаний по технологии и обеспечению безопасности АЭС, а также интеллектуальных навыков диагностики состояния и управления системами и оборудованием АЭС.

Многофункциональный анализатор режимов реакторной установки используется в качестве компьютерного средства поддержки аудиторного обучения персонала.

Многофункциональный анализатор режимов реакторного отделения (МФА-РО) разработан на базе МФА-РУ и отличается расширением объема моделируемых систем до требований, предъявляемых к ПМТ.

Компьютерный тренажер по рабочему месту персонала цеха тепловой автоматики и измерений (КТ РМ ЦТАИ) предназначен для обучения и тренировки персонала, осуществляющего обслуживание АСУ ТП блока.

Комплексный компьютерный тренажер (ККТ) оперативного персонала БПУ представляет собой компьютерную версию полномасштабного тренажера. ККТ предназначен, в первую очередь, для формирования навыков оперативного контроля и управления посредством компьютерного интерфейса, характерного для АЭС с цифровыми АСУ ТП.

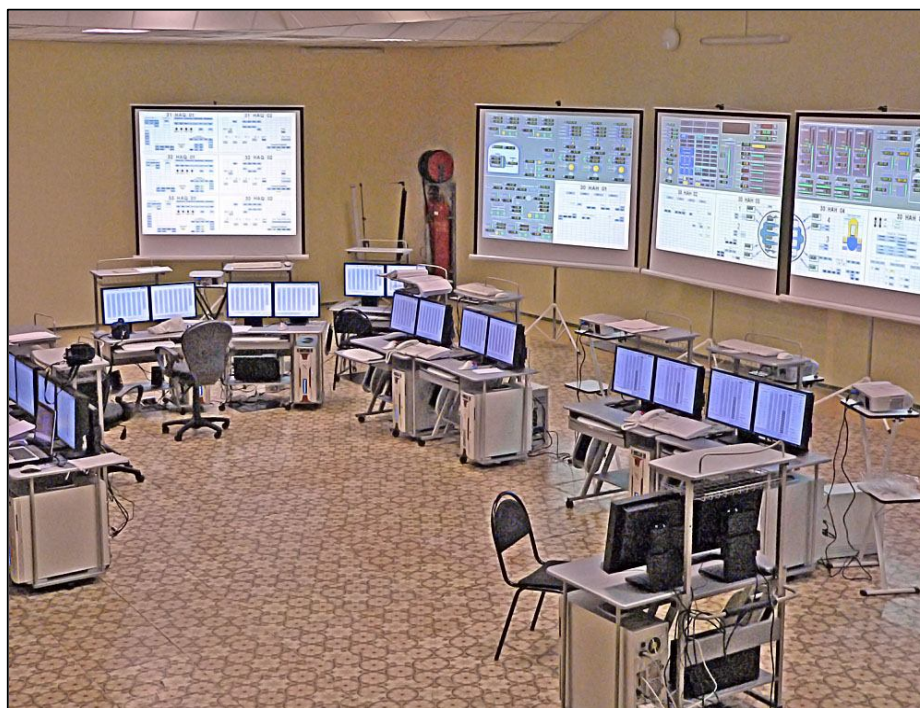
Целесообразность создания и использования ККТ для блока №3 до завершения работ по созданию и пуску в эксплуатацию ПМТ была обусловлена следующими факторами:

- в процессе сооружения блока №3 был изменен его проект – впервые для российских АЭС было принято решение о создании и внедрении на данном блоке современной цифровой АСУ ТП;
- изменение концепции управления блоком потребовало формирования у оперативного персонала, в том числе, у опытного, навыков управления посредством компьютерного интерфейса новой АСУ ТП;
- в процессе создания и пуско-наладки блока имели место многочисленные изменения в проекте АСУ ТП, включая БПУ, и создание ПМТ до завершения пуско-наладки блока было нецелесообразным.

9.2 Комплексный компьютерный тренажер (ККТ) оперативного персонала БПУ

Комплексный компьютерный тренажер (ККТ) персонала БПУ выполнен на базе проекционных средств имитации панелей БПУ и компьютерных средств управления с рабочих мест операторов, представляющих собой копию рабочих станций штатной СВБУ.

В ККТ реализована полная модель процессов в оборудовании блока и алгоритмов АСУ ТП, аналогичные соответствующим моделям для ПМТ.



Комплексный компьютерный тренажер (ККТ) персонала БПУ

ККТ был поставлен в Учебный Центр Калининской АЭС за год до пуска блока №3. Персонал для блока №3 набирался из числа операторов, имеющих опыт работы на других блоках станции, поэтому, при отсутствии в тот период времени полномасштабного тренажера, их подготовка в требуемые сроки до пуска блока была проведена на ККТ и была признана достаточной для допуска к работе.

9.3 Полномасштабный комплексный тренажер

Полномасштабный тренажер блока №3 введен в эксплуатацию в июне 2007 года.

Создание полномасштабного тренажера для 3-го энергоблока Калининской АЭС имело особое значение в связи с тем, что на этом энергоблоке впервые внедрялась современная цифровая АСУ ТП на базе средств ТПТС, производимых в России по лицензии фирмы SIEMENS, и оболочки RTA PLS в качестве основы СВБУ, поставленной фирмой ВНИИАЭС.

Состав комплекса технических средств ПМТ

В состав ПМТ включены следующие компоненты:

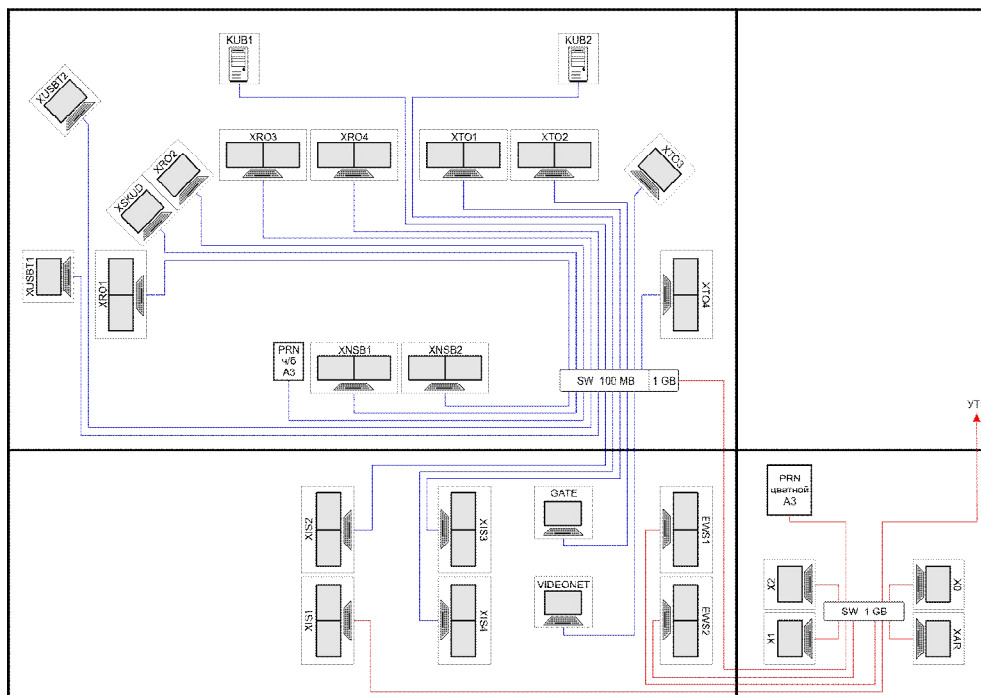
- Имитатор БПУ;
- Моделирующий компьютерный комплекс (МКК);
- Модуль связи МКК с имитатором БПУ (УСО);
- Станция инструкторов.

Имитатор БПУ является точной копией штатного оборудования.

Комплекс технических средств МКК в составе ПМТ-3 включает оборудование:

- серверного комплекса (расчетных серверов, архивного сервера, контроллера домена);
- системы управления тренажером (инструкторских станций);
- инженерных рабочих мест;
- рабочих мест СВБУ;
- системы передачи данных локальной вычислительной сети ПМТ;
- шлюзов связи с УСО;
- контроллеров Экранов Коллективного Пользования (ЭКП);
- принтеров;
- средств защиты программного обеспечения ПМТ от несанкционированного копирования;
- системы надежного электропитания.

Структура Моделирующего компьютерного комплекса ПМТ приведена на рисунке.



Структура моделирующего компьютерного комплекса ПМТ

Программное обеспечение (ПО) ПМТ

Стандартное ПО включает операционные системы MS WINDOWS и пакет MS Office.

Специальное ПО включает в себя специальное системное ПО и прикладное ПО.

В состав специального системного программного обеспечения МКК входят:

- программная платформа ЭНИКАД, включая инструментальные средства разработки моделей;
- библиотеки ОРС сервера;
- штатная утилита СВБУ для представления графиков;
- система электронной защиты от копирования.

В состав прикладного программного обеспечения МКК входят:

- моделирующее программное обеспечение (МПО), включая модель АСУ ТП;
- специализированные модули расширения ЭНИКАД для реализации интерфейса рабочих мест инструктора и рабочих мест СВБУ;
- система информационного обмена с УСО.

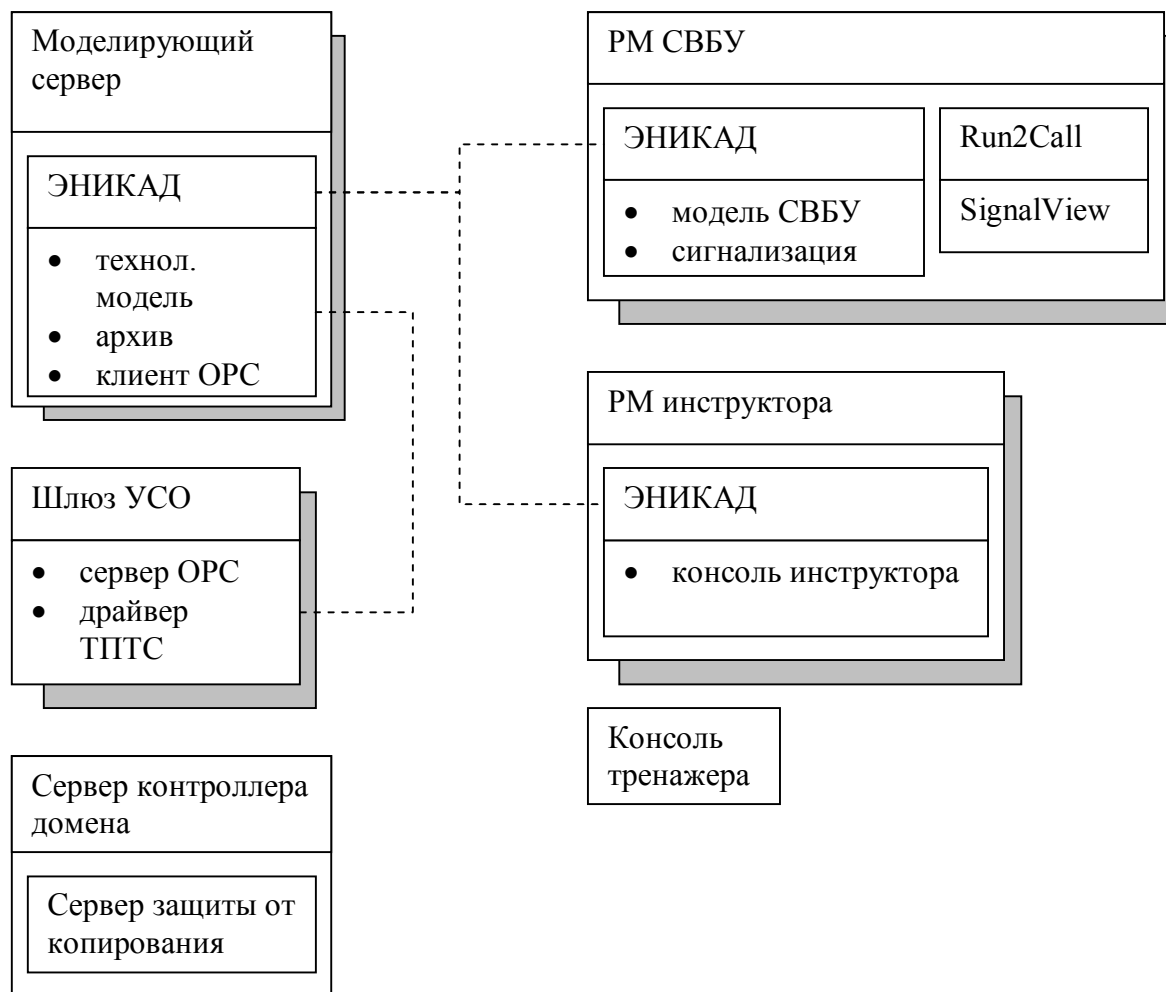
В МКК ПМТ реализуется принцип распределенного моделирования. Комплекс содержит узлы нескольких типов (моделирующие, рабочие места СВБУ, рабочие места инструкторов), объединенные с помощью исполняющей системы ЭНИКАД. Специализация узлов достигается с помощью подключения необходимых модулей в исполняющую систему ЭНИКАД. Сборка узлов в единый комплекс осуществляется динамически и производится при каждом старте системы.

Обслуживание файлов МКК, конфигурирование и старт моделирующего комплекса реализуется с помощью программы консоли тренажера.

Функции поддержки обучения и управления тренажером реализуется с помощью программ консоли инструктора.

Для обмена с имитатором БПУ используются шлюзы УСО, выполненные в виде ОРС серверов. Взаимодействие с ОРС-серверами осуществляется с помощью модулей ОРС-клиентов, включенных в моделирующие узлы комплекса. Шлюзы УСО функционируют автономно от моделирующего комплекса и подключаются к нему динамически.

Защита компонентов МКК от копирования реализуется с помощью общего ПО проверки ключей, расположенного на сервере контроллера домена. Обобщенная структура специального системного ПО МКК изображена на рисунке.



Структура специального системного ПО МКК ПМТ

Модели физических процессов и АСУ ТП

Моделирование процессов и систем АЭС осуществляет функционирующий в среде ЭНИКАД комплекс расчетных программ. Эти программы могут быть структурированы в следующие группы:

- модель нейтронно-физических процессов в активной зоне
- модели теплогидравлических систем
- модели электрических систем
- модели Контрольно-Измерительных Приборов (КИП)
- модели Систем Контроля и Управления на средствах ТПТС
- модели спецсистем СУЗ
- модели СВБУ и систем представления информации

Инструментальные средства системы поддержки моделирования предназначены для обеспечения разработки и сопровождения моделирующего ПО.

Объем моделирования включает все технологические системы и оборудование, оперативный контроль и управление которыми осуществляется с БПУ, а также, в необходимом объеме, оборудование и технологические системы, не управляемые с БПУ, но оказывающие существенное влияние на моделируемые режимы.

Объем моделирования обеспечивает адекватное поведение моделей на задаваемые обучаемым и инструктором управления в ходе тренажерного занятия.

Перечень воспроизводимых моделью режимов включает проектные режимы нормальной эксплуатации, режимы с нарушениями условий нормальной эксплуатации и аварии, связанные с отказами систем и оборудования и возможными неправильными действиями персонала.

ПМТ обеспечивает воспроизведение нормальных режимов эксплуатации энергоблока №3 Калининской АЭС, непрерывно и без необходимости изменений в модели и загрузки состояний в ходе выполнения тренировки.

Модель активной зоны обеспечивает расчет нейтронно-физических, теплофизических и тепло-гидравлических характеристик активной зоны в динамических и стационарных режимах с учетом реальных топливных загрузок и конструкции активной зоны.

Модель активной зоны включает в себя:

- Модель нейтронной кинетики;
- Модель теплогидравлики активной зоны;
- Модель внутриреакторного контроля и внешних ионизационных камер.

Модель внутриреакторного контроля и внешних ионизационных камер учитывает зависимость показаний датчиков от их пространственного расположения, от глубины выгорания, плотности теплоносителя в зоне и опускном участке реактора, положения органов СУЗ и воспроизводит следующие показания или результаты их обработки:

- показания всех штатных ионизационных камер;
- показания ДПЗ СВРК;
- показания термодатчиков.

Модель воспроизводит зависимость как интегральных, так и распределенных по объему нейтронно-физических характеристик зоны от локальных значений температуры воды и топлива, плотности воды, весовой концентрации бора, глубины выгорания топлива с коррекцией изотопного состава, концентраций ксенона и самария и рассчитывает их на каждом такте по времени.

Используемая в ПМТ модель активной зоны аналогична модели, реализованной в МФА-РУ и представленном выше.

Модель активной зоны воспроизводит следующие режимы и состояния (пределным ограничением модели зоны является нарушение целостности конструкции активной зоны):

- Произвольное состояние активной зоны от холодного состояния реактора до состояния на произвольной мощности (до начала расплавления зоны) в любой момент кампании реактора между перегрузками топлива, включая непрерывный переход из одного момента топливного цикла в другой.
- Произвольную схему перегрузки топлива с произвольной картограммой топливныхборок (ТВС) в зоне из числа ТВС, принадлежащих регламентному ряду обогащений используемого для данного типа реактора.
- Произвольные движения и положения органов СУЗ в зоне, включая падение одного или нескольких органов, самопроизвольное их движение вверх, мгновенное их извлечение из активной зоны, «застывание» в произвольном положении.
- Переход с одного уровня мощности реактора на другой (как мгновенный переход, так и постепенный) с воспроизведением соответствующих ксеноновых процессов в зоне (возможные колебания интегральной и пространственного распределения

мощности в реакторе, процессы ксенонового «отравления» и «разотравления» зоны, возникающие при останове и пуске энергоблока);

- Практически любую аварийную ситуацию в зоне, включая «нейтронную вспышку» на мгновенных нейтронах в реальном масштабе времени при моделировании всех пространственных распределений в зоне.

Модели физических процессов в оборудовании АЭС и алгоритмов АСУ ТП разработаны с использованием инструментальных средств системы поддержки моделирования ПМТ, включающей:

- САПР моделей систем автоматики;
- САПР моделей теплогидравлических систем;
- САПР моделей электрических систем;
- генератор моделей алгоритмов ТПТС;
- генератор модели алгоритмов СВБУ.

Модели, получаемые при помощи САПР, генерируются с автоматическим соблюдением всех требований к моделям, предъявляемым технологией моделирования под графической оболочкой GIW платформы ЭНИКАД:

- обеспечено единообразие способов описания средствами оболочки GIW схемы моделируемой системы и составляющих ее элементов;
- обеспечено единообразие описания кода модели, используемых данных и способа инициализации модели, сгенерированной САПР, а также прочих моделей, работающих в среде GIW;
- обеспечен полный стандартный интерфейс генерируемой модели с графической оболочкой моделей GIW;
- автоматически обеспечено сохранение состояния модели, сгенерированной САПР, с возможностью архивирования состояния, рестарта, отката и т.д.;
- обеспечен доступ всеми средствами оболочки GIW ко всем параметрам настройки и информационно важным сигналам модели, сгенерированной при помощи САПР.

Модель нижнего уровня АСУ ТП (модели СКУ на базе ТПТС) генерируется полностью автоматически с помощью описанного выше средства SIMUS. Исходными данными для такой генерации является штатная резервная копия GET-проекта.

Модель СВБУ представляет собой имитацию интерфейса рабочего места СВБУ и реализует полный набор функций рабочей станции и часть функций сервера, необходимых для обеспечения функций рабочей станции. С учетом специализации рабочих мест, модель СВБУ выполнена как набор специализированных моделей (для РО, ТО и ЭКП).

Модель СВБУ также генерируется полностью автоматически с помощью созданного на базе платформы ЭНИКАД программного комплекса. Исходными данными для модели СВБУ являются компьютерные файлы и дампы базы данных (БД) реальной СВБУ. При этом модель СВБУ полностью совместима с моделью нижнего уровня АСУ ТП на базе средств ТПТС.

Наличие инструментальных средств для генерации моделей компонентов АСУ ТП по БД и файлам реальной АСУ ТП блока позволяет при необходимости обновлять версии модели АСУ ТП для ПМТ и тем самым обеспечивать адекватность ПМТ реальному блоку.

Станция инструкторов

Тренажерная версия платформы ЭНИКАД содержит средства поддержки реализации учебных задач и управления тренажером. Поддерживаются все стандартные функции ПМТ по формированию сценариев УТЗ, заданию отказов, регистрации параметров и действий обучаемых, по откату во времени и воспроизведению записи УТЗ и т.д.

Модуль связи МКК с имитатором БПУ

Модуль связи МКК с имитатором БПУ (УСО) выполнен на базе программно-технических средств ТПТС, являющихся штатными средствами АСУ ТП блока №3.

Использование в ПТК ПМТ штатных средств АСУ ТП позволяет использовать ПМТ для подготовки персонала ЦТАИ, осуществляющего обслуживание АСУ ТП блока.

Диагностика состояния ПТК ПМТ

В Моделирующем Компьютерном Комплексе ПМТ предусмотрены средства диагностики работоспособности программных и аппаратных компонентов. Используются методы аппаратной, программной и функциональной диагностики.

Аппаратная диагностика применяется для средств УСО и реализуется средствами штатной самодиагностики модулей УСО. Информация о состоянии аппаратуры обрабатывается ПО шлюза УСО и выводится на экран компьютера шлюза. Информация о состоянии аппаратуры, также, заводится в сервер ОРС и доступна для других узлов МКК, в том числе для консоли инструктора.

Программная диагностика выполняется средствами самодиагностики программных модулей или обработчиками исключительных ситуаций, реализованными в исполняющей системе ЭНИКАД. Таким способом диагностируются:

- нарушения защиты от копирования
- выходы за пределы моделирования
- ошибки конфигурирования узлов
- недостаток вычислительных ресурсов
- отсутствие доступа к требуемым файлам
- вычислительные ошибки типа деления на 0, потери точности и т.д.

Функциональная диагностика осуществляется при запущенном сеансе работы тренажера и базируется на тайм-аутах при взаимодействии узлов комплекса. Отсутствие ответа за определенный промежуток времени считается отказом узла из-за невозможности выполнять свои функции. Информация об отказах узлов поступает на консоль тренажера.



Полномасштабный тренажер блока №3 Калининской АЭС

9.4 Использование компьютерных анализаторов режимов в системе подготовки персонала Калининской АЭС на примере МФА-РУ

МФА-РУ АЭС с ВВЭР-1000 в 2001 году был установлен в учебном центре (training center) Калининской АЭС и по настоящее время используется в качестве компьютерного средства поддержки аудиторного обучения (computer based training aid for classroom training) при проведении начальной подготовки (initial training), переподготовки (retraining) и повышении квалификации (requalification training) персонала подразделений АЭС, отвечающих за обеспечение ядерной безопасности, и персонала реакторных цехов, включая оперативный персонал.

Широкие функциональные возможности МФА-РУ позволяют его эффективно использовать в учебных занятиях, направленных на формирование целостного понимания процессов, происходящих в реакторной установке, в том числе зависимости их протекания от типа топливной загрузки.

На базе МФА-РУ разработан ряд учебных курсов, в том числе курсы по следующим темам:

- «Основные нейтронно-физические характеристики активной зоны ВВЭР-1000 и их зависимость от типа топливной загрузки»
- «Вопросы безопасной эксплуатации РУ с реактором ВВЭР-1000»
- Для данных курсов разработаны учебные занятия, подготовлены учебные пособия.

В качестве примера приведем темы некоторых учебных занятий:

- Получение ксеноновых колебаний локальной мощности в активной зоне реактора ВВЭР-1000 и вычисление основных параметров аксиальных колебаний для различных топливных загрузок в различные моменты кампании.
- Изучение основных механизмов подавления ксеноновых колебаний локальной мощности в активной зоне реактора ВВЭР-1000 и критериев их успешности в базовом режиме работы энергоблока.
- Изучение основных механизмов подавления ксеноновых колебаний локальной мощности в активной зоне реактора ВВЭР-1000 и критериев их успешности в режиме работы энергоблока при переходе с одной мощности на другую.
- Изучение последствий аварии с разрывом неотсекаемой части паропровода на выходе из одного из ПГ при наложении единичного и множественных отказов в работе СУЗ реактора.
- Изучение последствий аварии с разрывом неотсекаемой части паропровода на выходе из одного из ПГ при наложении единичного и множественных отказов в работе СУЗ реактора при воспроизведении консервативных условий моделирования, принимаемых Главным Конструктором при расчете такой аварии.

Высокая эффективность учебных занятий с применением МФА-РУ обусловлена тем, что теоретический материал дополняется демонстрацией процессов в РУ, причем демонстрируется не мультимедиа запись, а происходит моделирование данного процесса с изменением работы многих компонентов оборудования РУ по желанию слушателей в текущий момент времени. При этом на лекциях можно проводить сравнение характеристик РУ при работе разных энергоблоков на разных АЭС в разные моменты кампании и на реальных графиках тепловых нагрузок на активную зону. Более того, часто на лекциях происходит разбор нестандартных ситуаций из практики оперативных смен в прошлые годы или в текущем году. Разбираются основные особенности протекания

аварийной ситуации, случившейся на какой-либо АЭС с ВВЭР-1000. Показывается поведение основных факторов безопасности РУ и определяется запас до их предельных значений. Объясняются принципы консервативности, используемые при проектном обосновании технической безопасности РУ.

10 Заключение

Разработка анализаторов режимов АЭС, учебных тренажеров средств инженерной поддержки выполнена на общей программной платформе - ЭНИКАД. Это позволило для разработки СИП использовать имеющиеся в ЭНИКАД мощные средства графического и программного моделирования алгоритмов и физических процессов в оборудовании, обеспечить возможность использования разработанных моделей в качестве СИП, а также обеспечить адекватность моделей за счет использования средств их полностью автоматической генерации из файлов и ПО реальной АСУ ТП.

Следует также отметить, что в настоящее время в проекты АСУ ТП для строящихся в России АЭС в качестве составных частей включены анализаторы АСУ ТП и учебные тренажеры.

Материалы доклада содержат достаточные аргументы, подтверждающие эффективность совместного проектирования средств инженерной поддержки АСУ ТП, эксплуатации АЭС, учебных тренажеров и анализаторов режимов и использования для их создания общей программной платформы. Использование этого принципа способствует решению задачи создания единой технологии проектирования, создания и внедрения АСУ ТП, проведения пуско-наладочных работ, сопровождения эксплуатации блока и подготовки его персонала, стоящей перед ВНИИАЭС как главным конструктором - системным интегратором АСУ ТП российских АЭС.