

УДК 371.693

## ОПЫТ РАЗРАБОТКИ И ВНЕДРЕНИЯ ТРЕНАЖЕРОВ ДЛЯ ПОДГОТОВКИ ПЕРСОНАЛА ЭНЕРГОБЛОКОВ № 3,4 КАЛИНИНСКОЙ АЭС С ЦИФРОВЫМИ АСУ ТП

А.Н. ЛУПИШКО, В.А. ЧЕРНАКОВ, А.П. МОЛЕВ, С.А. МИЩЕРИН,  
С.А. КОРОЛЕВ\*, С.Б. ВЫГОВСКИЙ\*, Е.В. МИНАЕВ\*, Ю.В. КРАЮШКИН\*

*Всероссийский научно-исследовательский институт по эксплуатации атомных электростанций  
Ферганская, 25, Москва, 109507, Россия,*

*\*Национальный исследовательский ядерный университет  
«Московский инженерно-физический институт»  
Каширское шоссе, 31, Москва, 115409, Россия*

*Поступила в редакцию 3 февраля 2015*

На энергоблоке № 3 Калининской АЭС, общий вид блочного пульта управления (БПУ) которого представлен на рис. 1, впервые в России была внедрена современная цифровая автоматизированная система управления технологическими процессами (АСУ ТП). Эта АСУ ТП представляла собой новый проект, опыт внедрения которого отсутствовал, и имела два принципиальных отличия от АСУ ТП атомных блоков предыдущего поколения:

1. Система верхнего блочного уровня (СВБУ) АСУ ТП разработана и внедрена Главным конструктором АСУ ТП АЭС с ВВЭР – АО «ВНИИАЭС». Основным способом управления в СВБУ – компьютерный, через экранные форматы управляющих рабочих станций СВБУ, расположенных на БПУ/РПУ. Органы индикации и управления на пультах и панелях БПУ лишь «резервируют» основной компьютерный способ управления на случай сбоев в работе СВБУ. Навыки компьютерного управления у персонала Калининской АЭС до пуска 3-го блока полностью отсутствовали, и их нужно было своевременно сформировать. Эта задача была решена с помощью поставленного АО "ВНИИАЭС" тренажерного комплекса для подготовки оперативного и эксплуатационного персонала блока, разработанных совместно с НИЯУ МИФИ.

2. Нижний уровень АСУ ТП систем нормальной эксплуатации построен на базе программно-технических комплексов ТПТС-51 (далее – ПТК ТПТС). Эти средства – цифровые, так же впервые применялись на российских АЭС. Конфигурирование ПТК ТПТС производится на объектно-графическом языке высокого уровня в специализированной оболочке GET-R инженерной GET-станции ТПТС. В ней разрабатываются GET-проект (проект прикладного ПО, загружаемого в модули ТПТС) и NET-проект (проект связей модулей ТПТС с датчиками, исполнительными механизмами и другими ПТК АСУ ТП). По GET-проекту автоматически генерируется STER-код, непосредственно загружаемый в модули ТПТС. Объем GET-проекта для энергоблока ВВЭР-1000 огромен и составляет более 50 000 листов GET-планов, из-за чего усвоение логики работы нижнего уровня АСУ ТП крайне сложно для оперативного персонала энергоблока. К тому же в ходе развития проекта АСУ ТП GET-проект многократно (десятки раз) меняется, в особенности на завершающей стадии проекта – в ходе ПНР по АСУ ТП. Поэтому для разработки адекватной модели нижнего уровня АСУ ТП обычно применяемые методы моделирования нижнего уровня АСУ ТП (прорисовка в специализированной САПР графических образов алгоритмов и генерации по ним модели) не подходят из-за огромных трудозатрат. Выход в этой ситуации только один – создание специализированного программного комплекса, позволяющего генерировать модель нижнего уровня АСУ ТП

непосредственно по текущей версии GET-проекта автоматизированным способом, без его перерисовки вручную.



Рис. 1. Общий вид БПУ 3 энергоблока Калининской АЭС.

Все тренажеры тренажерного комплекса для подготовки персонала энергоблоков № 3,4 Калининской АЭС были разработаны на базе интегрированной системы ENICAD (далее ЭНИКАД), созданной коллективом сотрудников кафедры «Автоматика» НИЯУ МИФИ. ЭНИКАД работает под ОС Windows на стандартных ПЭВМ и обеспечивает эффективную разработку различных моделирующих комплексов для АЭС и ТЭС, включая сложные многомашинные сетевые комплексы полномасштабных тренажеров. В состав программных средств ЭНИКАД входят следующие.

- Специализированный графический редактор с широкими интерактивными возможностями.

- САПР моделей систем автоматики, позволяющий строить интерактивные схемы моделей систем управления из широкого набора функциональных блоков и предоставляющий средства их отладки. Имеется возможность создания макроэлементов. САПР охватывает средства УКТС, ТПТС-51,ЕМ и КТПС-ПН.

- САПР моделей тепло-гидравлических систем для создания интерактивных моделей тепло-гидравлических сетей из набора функциональных блоков (баков, теплообменников, запорно-регулирующей арматуры и т.д.) со средствами их отладки.

- САПР моделей электрических систем, позволяющий создавать интерактивные электрические схемы из набора функциональных блоков (трансформаторов, выключателей, двигателей, линий, генераторов и т.д.) и предоставляющий средства их отладки.

- Средства интеграции. В их состав входят средства ведения проекта, диспетчеризации и поддержки многопроцессорных, многомашинных сетевых и многомониторных конфигураций, средства интеграции программных модулей, средства ведения базы переменных модели.

- Система поддержки процесса обучения. Она предоставляет возможность создания учебных задач и средства контроля их выполнения обучаемым.

- Средства разработки модели (СВБУ) цифровой АСУТП на базе RTA PLS.

- Средства полной эмуляции (СВБУ) цифровой АСУТП на базе ПОРТАЛ по файлам прикладного ПО штатной СВБУ.

По составу программных средств платформа ЭНИКАД аналогична платформам ведущих зарубежных производителей тренажеров, таких как GSE (США), CORYS (Франция), STN ATLAS ELEKTRONIK (Германия). ЭНИКАД создавался более 15 лет, постоянно дополняется и модернизируется коллективом его разработчиков, чтобы удовлетворять современным требованиям. Так, например, в ходе работ по энергоблокам Калинин-3,4 и Ростов-2 ЭНИКАД был дополнен новыми средствами (выделены на слайде курсивом) для автоматизированной генерации моделей ПТК технологических программно-технических средств (ТПТС) вышеуказанным способом, непосредственно по GET-проекту, средствами

разработки моделей ПТК на базе средств КТПС-ПН, а также средствами разработки модели СВБУ на базе RTA PLS и ПОРТАЛ. Более подробно платформа ЭНИКАД описана в [1].

Новые средства платформы ЭНИКАД для генерации моделей ПТК ТПТС и СВБУ, разработанные в ходе проекта энергоблока № 3 Калининской АЭС, обеспечили не только генерацию в темпе проекта адекватных моделей АСУ ТП для тренажерных комплексов 3-го энергоблока Калининской АЭС, но и эффективное тестирование проекта АСУ ТП на всех стадиях ее создания и внедрения, включая пусконаладочные работы (ПНР). Это стало возможным вследствие практически полной адекватности модели АСУ ТП, генерируемой этими новыми средствами ЭНИКАД, которые впоследствии стали основой для создания программного комплекса статического тестирования (ПКСТ). ПКСТ обеспечил комплексное тестирование прикладного ПО ПТК ТПТС в контуре «ПТК ТПТС-СВБУ-БПУ/РПУ» не только в процессе его разработки на площадках разработчиков с помощью моделей (в том числе и на полигоне Главного конструктора АСУ ТП – АО «ВНИИАЭС», представленном на рис. 2), но и непосредственно на площадке АЭС – путем тестирования прикладного ПО, уже загруженного в аппаратуру ПТК ТПТС. По своей функциональности ПКСТ соответствует аналогичным средствам современных платформ для создания АСУ ТП, имеющихся у ведущих зарубежных производителей средств АСУ ТП и подробно описан в [2].

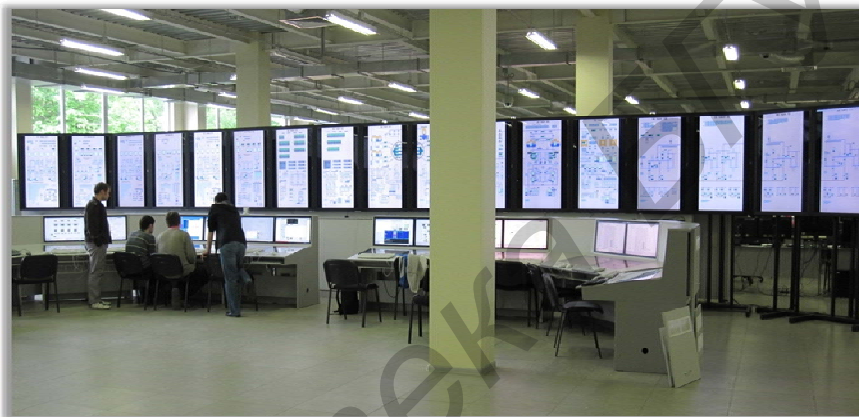


Рис. 2. Полигон Главного конструктора АСУ ТП - АО «ВНИИАЭС»

В состав тренажерного комплекса для подготовки персонала энергоблока № 3 Калининской АЭС входят:

- полномасштабный тренажер (ПМТ-3);
- тренажер оборудования и систем АСУ ТП (ТОС АСУ ТП);
- компьютерный тренажер по системе химводоочистки (КТ ХВО).

Программный комплекс ТОС АСУ ТП был разработан в дополнение к ПМТ-3 в связи с тем, что освоение новой цифровой АСУ ТП для персонала Калининской АЭС оказалось крайне сложным. Поэтому, еще до готовности ПМТ-3, потребовалось начать опережающую подготовку персонала к работе с новой цифровой АСУ ТП. В состав программного комплекса ТОС АСУ ТП вошла полномасштабная модель АСУ ТП (модель СВБУ, модели всех ПТК, электронные панели БПУ/РПУ) и сервисные средства, обеспечивающие изучение работы алгоритмов и структуры АСУ ТП на стандартном персональном компьютере только с использованием графически представленной модели АСУ ТП, но без использования модели физических процессов в технологических системах энергоблока. ТОС АСУ ТП обеспечил в массовом порядке:

- изучение структуры АСУ ТП;
- детальное изучение алгоритмов управления и индикации;
- выработку практических навыков работы с цифровой АСУ ТП.

Компьютерный тренажер по системам химводоочистки был разработан в связи с тем, что система химводоочистки на блоке имела собственную рабочую станцию СВБУ со своим форматами и не входила в состав систем, моделируемых в ПМТ-3.

В связи с задержкой начала финансирования работ по ПМТ-3 и длительным сроком изготовления полномасштабного имитатора БПУ было принято решение о создании ПМТ-3 в

два этапа. На первом этапе был создан пусковой комплекс ПМТ-3, разработанный на базе стандартных персональных компьютеров, которые можно было быстро поставить. На нем, задолго до готовности полномасштабного имитатора БПУ ПМТ-3 была полностью отлажена и начала функционировать полномасштабная модель энергоблока.

На втором этапе на базе пускового комплекса ПМТ-3, путем подключения через устройства связи (УСО), изготовленной производителем штатного БПУ точной реплики штатного БПУ энергоблока, была завершена разработка ПМТ-3. Общий вид пускового комплекса и итогового ПМТ-3 представлены на рис. 3.

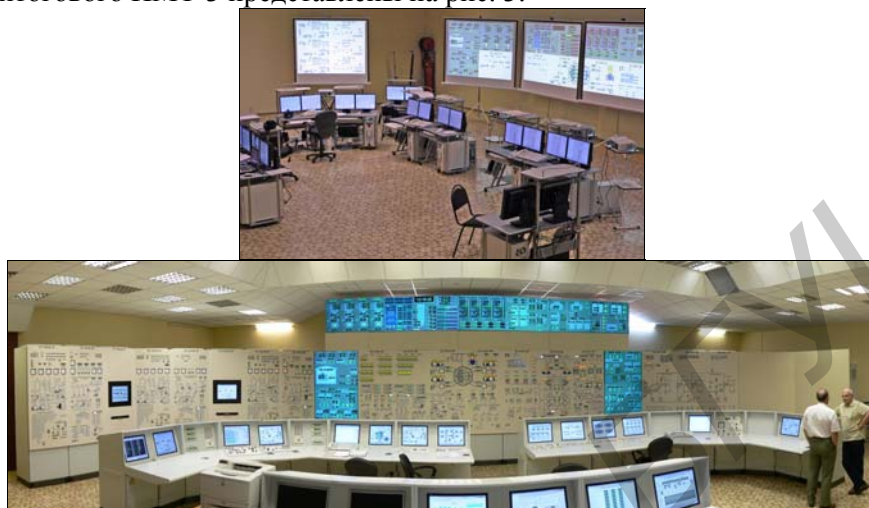


Рис. 3. Пусковой комплекс ПМТ-3 и общий вид итогового ПМТ-3

Следует отметить, что принятые при разработке ПМТ-3 технические решения (использование в тренажере штатного БПУ без каких-либо изменений и использование в качестве УСО аппаратуры ТПТС) позволили, при уже отлаженной на пусковом комплексе полномасштабной модели ПМТ-3, провести его интеграцию и отладку в кратчайшие сроки – 6 недель. Но платой за эту скорость стала цена этих решений, т.к. БПУ/РПУ производства ФГУП «НИИИС» и аппаратура ТПТС производства ФГУП «ВНИИА», применяемые в АСУ ТП реального блока, очень дороги для ПМТ. Кроме того, конструкция мозаичных панелей БПУ ФГУП «НИИИС» крайне неудобна для их последующих модернизаций. Тем не менее, принцип отладки полномасштабной модели ПМТ на виртуальном БПУ и поставки полномасштабного имитатора БПУ на площадку АЭС прямо с завода-изготовителя, минуя площадку поставщика – АО «ВНИИАЭС» – оказался очень эффективен и позволил сократить срок ввода ПМТ-3 на 6 мес. Поэтому он был применен впоследствии и при разработке ПМТ блока № 4 Калининской АЭС.

Введенный в эксплуатацию в декабре 2012 г. энергоблок № 4 Калининской АЭС, в том числе его БПУ, имеет значительные отличия от энергоблока №3, что обусловило необходимость создания для блока № 4 отдельного ПМТ (ПМТ-4). Поставщиком ПМТ-4 также являлось АО «ВНИИАЭС». Разработчиком технического проекта, специализированного программного комплекса, математического и программного обеспечения ПМТ-4 являлся НИЯУ МИФИ. Поставщиком специализированного аппаратного комплекса ПМТ-4, включающего полномасштабный имитатор БПУ и виртуальный имитатор резервного и блочного пунктов управления (РПУ/БПУ) – ФГУП УЭМЗ (г. Екатеринбург).

ПМТ-4 был спроектирован, изготовлен, введен в эксплуатацию в сентябре 2012 г. в рекордно короткие сроки – менее, чем за 18 месяцев. Поставка полномасштабного имитатора БПУ для ПМТ-4 так же, как и для ПМТ-3, осуществлялась с завода-изготовителя сразу на площадку АЭС, минуя площадку АО «ВНИИАЭС». ПМТ-4 является на сегодня наиболее современным действующим ПМТ в России и примером успешного сотрудничества в области разработки технических средств обучения для подготовки персонала АЭС предприятий ГК «Росатом» и НИЯУ МИФИ. ПМТ-4, так же, как и ПМТ-3, был допущен к обучению по стандарту ОАО «Концерн Росэнергоатом» СТО 1.1.1.01.004.0680-2006 «Технические средства обучения», комиссией ОАО «Концерн Росэнергоатом» 14.02.2013.

Кратко остановимся на двух основных компонентах ПМТ-4.

*Комплекс технических средств ПМТ-4.* Является сложным программно-техническим моделирующим комплексом и включает в себя следующие компоненты:

- полномасштабный имитатор БПУ энергоблока № 4 КАЭС;
- виртуальный имитатор РПУ/БПУ энергоблока № 4 КАЭС, способный работать самостоятельно в качестве аналитического тренажера;
- специализированный моделирующий компьютерный комплекс (МКК), подключенный к полномасштабному имитатору БПУ и виртуальному имитатору РПУ/БПУ, включающий два комплекта моделирующих, архивных и файловых серверов с предустановленным специальным программным обеспечением;
- устройства связи МКК с полномасштабным имитатором БПУ (УСО);
- систему электропитания комплекса технических средств ПМТ-4;
- систему управления тренажером – станцию инструктора (СИ);
- систему поддержки обучения (класс предтренажерной подготовки);
- систему аудио-видеонаблюдения и регистрации;
- систему оперативной связи.

Внешний вид полномасштабного имитатора БПУ и расширенного виртуального имитатора РПУ, позволяющего имитировать и БПУ, представлены на рис. 4. Такой расширенный РПУ позволил провести на нем полную отладку и тестирование полномасштабной модели энергоблока в НИЯУ МИФИ параллельно с длительным изготовлением полномасштабного имитатора БПУ во ФГУП УЭМЗ и резко сократить срок поставки ПМТ-4. Структурная схема КТС ПМТ-4 приведена на рис. 5.



Рис. 4. Полномасштабный имитатор БПУ ПМТ-4 и виртуальный имитатор РПУ/БПУ ПМТ-4

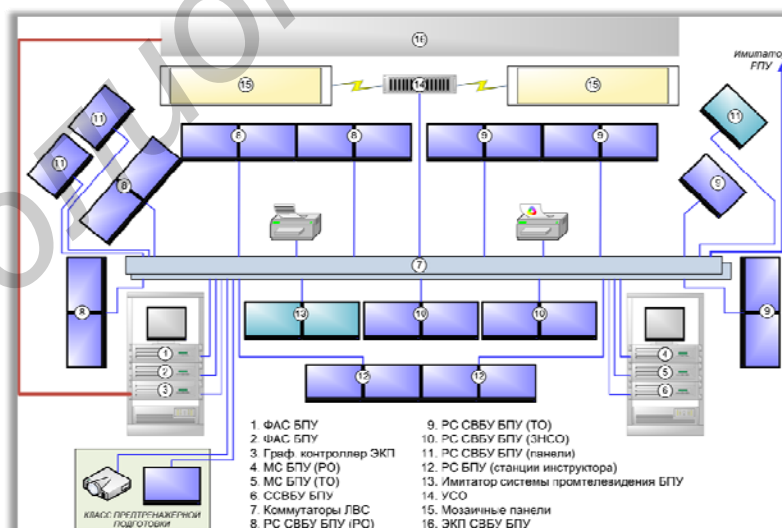


Рис. 5. Структурная схема КТС ПМТ-4

Система информационного обмена моделирующего компьютерного комплекса (МКК) с УСО имитатора БПУ строится на базе серверов ОРС и клиентов ОРС на узлах моделирующего комплекса. И сервер, и клиент ОРС являются программами и могут обеспечивать обмен как в пределах одного узла, так и между узлами.

Устройство связи МКК ПМТ-4 с пультами имитатора БПУ выполнено на базе современных контроллеров семейства Wago750. Для связи с контроллерами Wago используется протокол Modbus TCP. Применение контроллеров Wago750 вместо средств ТПТС, ранее использованных в устройстве связи с объектом УСО ПМТ блока № 3 Калининской АЭС, резко увеличило быстродействие, уменьшило объем УСО и сделало его регулярным, при одновременном резком уменьшении его стоимости, а использование стандартного протокола Modbus TCP сделало УСО более открытым и легко настраиваемым. Контроллеры установлены непосредственно в пультах и панелях имитатора БПУ, что уменьшило количество оборудования и резко упростило его монтаж и наладку. Всего через 31 контроллер Wago750 подключено 13334 сигнала пульта. Сигналы на имитаторы спецсистем (100 сигналов) передаются по 12 каналам RS-485. На рабочие станции СВБУ ПМТ-4 передаются 95304 дискретных и 18854 аналоговых сигналов, определяемых штатной рабочей базой данных СВБУ энергоблока. Организация связи МКК с имитатором БПУ ПМТ-4 представлена на рис. 6.

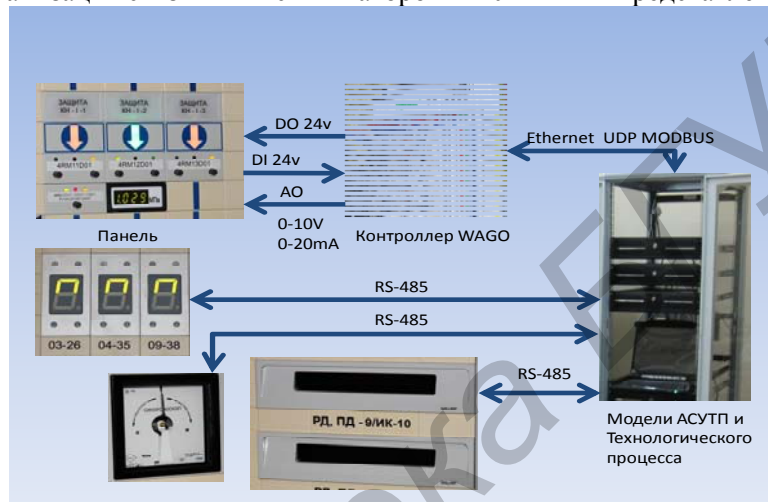


Рис.6. Организация связи МКК с имитатором БПУ ПМТ-4

Полномасштабная модель энергоблока ПМТ-4. Моделирование процессов и систем АЭС в ПМТ-4 осуществляется функционирующим в среде специального системного ПО (платформа ЭНИКАД) комплексом расчетных программ, составляющим моделирующее программное обеспечение (МПО). Структура МПО ПМТ-4 представлена на рис. 7.

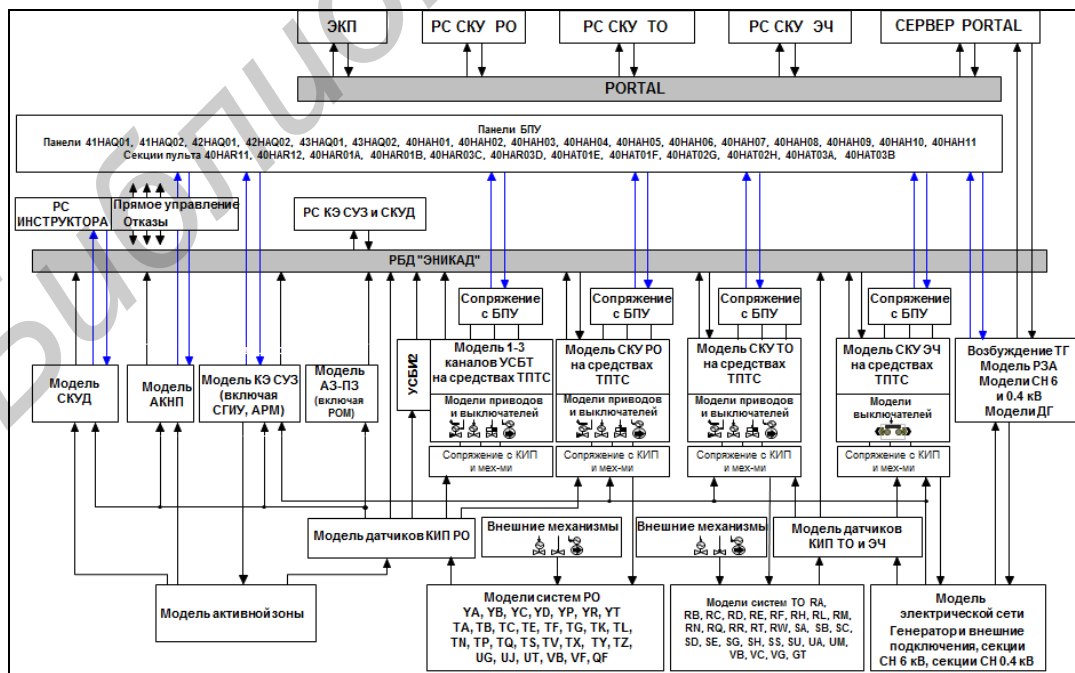


Рис. 7. Структура моделирующего ПО ПМТ-4

Объем моделирования систем АЭС и перечень воспроизводимых эксплуатационных режимов соответствуют требованиям, установленным стандартом ОАО «Концерн Росэнергоатом» «Технические средства обучения. СТО 1.1.1.01.004.0680-2006». В объем моделирования включены все технологические системы и оборудование, оперативный контроль и управление которыми осуществляются с БПУ/РПУ, а также, в необходимом объеме, оборудование и технологические системы, не управляемые с БПУ/РПУ, но оказывающие существенное влияние на моделируемые режимы. Объем и глубина моделирования обеспечивают адекватное поведение полномасштабной модели энергоблока в ходе тренажерного занятия или других видов сессий функционирования ПМТ-4, в том числе при его использовании в противоаварийных тренировках с воспроизведением ряда запроектных аварий. Состав моделируемых программным комплексом ПМТ-4 технологических систем и оборудования энергоблока обеспечивает воспроизведение:

- режимов нормальной эксплуатации;
- отклонений от режимов нормальной эксплуатации с нарушениями пределов и/или условий безопасной эксплуатации;
- аварийных режимов, вызванных отказами оборудования или ошибочными действиями персонала;
- запроектных аварий до точки плавления активной зоны.

В ПМТ-4 впервые в России использована не модель СВБУ, как в ПМТ-3, а тренажерная версия штатного прикладного ПО системы верхнего блочного уровня АСУ ТП - СВБУ (сервер, рабочие станции), что обеспечивает полную адекватность функций и интерфейса, а также возможность модернизации этой части полномасштабной модели ПМТ-4 путем простой загрузки актуальной версии ПО штатной СВБУ. Такое решение, в сочетании с уже применявшейся на ПМТ-3 автоматизированной генерацией средствами ПКСТ моделей ПТК ТПТС, составляющих более 90 % нижнего уровня АСУ ТП, позволило обеспечить в ПМТ-4 практически полную адекватность моделирования всей АСУ ТП.

Моделирование процессов и систем АЭС осуществляется расчетными серверами МКК. Моделирующее ПО, за исключением модели активной зоны, разработано средствами систем автоматизированного проектирования моделей (САПР) платформы ЭНИКАД, в состав которых входят:

- САПР моделей тепло-гидравлических систем;
- САПР моделей электрических систем;
- САПР моделей систем автоматики, включая вышеописанные средства генерации моделей ПТК ТПТС по GET-проекту.

Здесь следует отметить основную особенность вышеуказанных САПР. САПР моделей систем автоматики, включая средства генерации моделей ПТК ТПТС, нацелены на создание максимально точной и полной модели АСУ ТП и реально позволяют создавать практически полностью адекватные модели АСУ ТП. Для САПР модели физических процессов в технологических системах энергоблока выбран другой подход – принцип разумной достаточности. Эти САПР используют только те исходные данные, которые можно получить от Генпроектанта блока и нацелены на минимизацию затрат на разработку и отладку полномасштабной модели энергоблока, гарантированно обеспечивающих точность расчета параметров, установленных стандартом ОАО «Концерн Росэнергоатом» СТО 1.1.1.01.004.0680-2006 «Технические средства обучения», до пределов моделирования.

Таким образом, в ходе работ по энергоблокам № 3,4 Калининской АЭС на платформе ЭНИКАД был разработан целый набор программных комплексов, которые обеспечили как создание тренажерного комплекса, обеспечившего своевременную и качественную подготовку персонала этих блоков к эксплуатации, так и эффективный анализ, и тестирование проекта АСУ ТП в ходе его внедрения.

#### Список литературы

1. Чернаков В.А., Королев С.А., Выговский С.Б. и др. // Ядерные измерительно-информационные технологии. 2009. № 2.
2. Краюшкин Ю.В., Минаев Е.В., Чернаков В.А. // 1-я Междунар. науч.-технич. конф. «Автоматизированные системы управления технологическими процессами АЭС и ТЭС». Минск, 25–27 февраля 2015 г.