

В. С. Красноруцкий¹, Е. Ю. Михайлова²,
Э. А. Резниченко¹, О. П. Сергеев²

¹ Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»

² ОП Южно-Украинская АЭС НАЭК «Энергоатом»

Система мониторинга активной зоны для проекта квалификации ядерного топлива США для Украины

Рассмотрены основные цели и задачи модернизации вычислительного комплекса штатной системы внутриреакторного контроля реактора ВВЭР-1000 для поддержки эксплуатации ТВС производства фирмы «Вестингауз» на украинских АЭС. Приведено краткое описание Концепции модернизации, функциональных возможностей нового оборудования и основных этапов ввода модернизированной системы в промышленную эксплуатацию на энергоблоке № 3 ЮУ АЭС.

В. С. Красноруцкий, О. Ю. Михайлова, Е. О. Резниченко, О. П. Сергеев

Система мониторингу активної зони для проекту кваліфікації ядерного палива США для України

Розглянуто основні цілі та задачі модернізації обчислювального комплексу штатної системи внутріреакторного контролю реактора ВВЕР-1000 для підтримки експлуатації ТВЗ виробництва фірми «Вестингауз» на українських АЕС. Наведено короткий опис Концепції модернізації, функціональних можливостей нового обладнання та основних етапів вводу модернізованої системи до промислової експлуатації на енергоблоці № 3 ЮУ АЕС.

Система мониторинга активной зоны (СМАЗ) — условное наименование в рамках Проекта квалификации ядерного топлива для Украины (ПКЯТУ) модернизированного вычислительного комплекса штатной системы ВРК энергетического реактора ВВЭР-1000 типа В320 энергоблока № 3 Южно-Украинской АЭС. Проект квалификации направлен на обоснование возможности использования (в качестве альтернативного) ядерного топлива производства фирмы «Вестингауз» (США) на украинских АЭС с реакторами ВВЭР-1000.

Еще на стадии подготовки предложений по ПКЯТУ возникла проблема адаптации штатной системы ВРК для безопасной эксплуатации АЗ со смешанной загрузкой. В частности, в отличие от российских ТВС, «Вестингауз» производит топливо с переменной величиной обогащения по высоте и радиусу топливной сборки. Кроме того, отличия топлива фирмы «Вестингауз» от российского в конструкции и используемых конструкционных материалах приводят к отличиям в нейтронно-физических и теплогидравлических характеристиках ТВС даже идентичного обогащения. Существующий вычислительный комплекс «Хортица» системы ВРК способен обеспечить расчет нейтронно-физических параметров АЗ только для топлива с однородным обогащением, причем набор констант для ТВС ограничен 8 типами ТВС по обогащению в АЗ. Поскольку ежегодно в АЗ ВВЭР-1000 обычно уже используются 7–8 типов ТВС по обогащению, то настройка ВК «Хортица» для дополнительного топлива оказывается технически неосуществимой. Для решения этой проблемы ЮУ АЭС предложила, согласовала с ГКЯР Украины и совместно с ООО «Вестрон» и фирмой «Вестингауз» (США) при поддержке Центра проектирования активных зон (ННЦ ХФТИ) и PNNL (США) реализовала Концепцию модернизации ВК системы ВРК.

В рамках предложенной Концепции основная цель модернизации ВК системы ВРК заключается в компенсации недоверности нейтронно-физических расчетов, выполняемых СВРК при эксплуатации смешанной топливной загрузки АЗ в составе ТВС производства фирмы «Вестингауз» и российских ТВС. Основным критерием достижения цели модернизации было выбрано полное восстановление достоверности нейтронно-физических расчетов при эксплуатации смешанной активной зоны и полное восстановление связанных с этими расчетами функций архивирования, документирования и отображения параметров смешанной АЗ.

В основу модернизации легли следующие основные принципы:

- соблюдение установленных процедур лицензирования всех видов деятельности при модернизации системы;
- сохранение в полном объеме штатных технических и программных средств системы ВРК, обеспечивающих автономный режим работы системы;
- использование принципа разнообразия и резервирования программно-технических средств системы;
- обеспечение высокой надежности и жизнеспособности за счет внедрения элементов и принципов распределенных систем;
- минимизация объемов доработки технического, математического и программного обеспечения эксплуатируемых компонентов и систем;
- минимизация монтажа на БЩУ дополнительных технических средств;
- обеспечение качества выполняемых работ на всех этапах проектирования и внедрения ПТК.

Концепция строится на применении в качестве вычислительного комплекса системы ВРК ПТК на основе оборудования «Вулкан» и использовании для нейтронно-физических расчётов вместо ВМПО «Хортица» программного комплекса BEACON. Разработанный компанией «Вестингауз» BEACON способен обрабатывать различные виды топлива как с однородным, так и с неоднородным обогащением, допускает использование неограниченного количества типов ТВС и широко применяется в ядерной энергетике США и других стран. Оборудование «Вулкан» изготавливается «Вестроном», сертифицировано и широко используется на АЭС Украины. Структурная схема интерфейсов СМАЗ с нижним уровнем системы ВРК и АСУ ТП энергоблока представлена на рис. 1.

Из приведенной схемы следует, что реализация функций контроля АЗ со смешанной загрузкой обеспечивается функционированием следующих компонентов:

ПТК АР системы ВРК «Гиндукуш»;

ПТК «Вулкан-ВРК»;

программных средств BEACON.

ПТК автономного режима (АР) системы ВРК («Гиндукуш») является нижним уровнем штатной системы ВРК [1], в состав которого входят:

датчики энерговыделения (ДПЗ) и температуры, аналоговые и дискретные сигналы от общетехнологических датчиков и от системы управления и защиты (СУЗ) реактора, компенсационные устройства, линии связи;

два комплекта программно управляемой информационно-измерительной аппаратуры СВРК0105(06);

два комплекта технологических компьютеров;

два дисплея, установленные на БЩУ и отображающие информацию как от ПТК АР, так и от ВК;

внутреннее математическое и программное обеспечение.

На базе аппаратуры «Гиндукуш» реализован автономный режим работы системы ВРК, обеспечивающий безопасную работу РУ. Концепцией модернизации не затрагиваются функции «Гиндукуша»: автономный режим сохранения и по завершении модернизации.

ПТК «Вулкан-ВРК» (разработан и изготовлен ООО «Вестрон») — система сбора и обработки данных, построенная на принципах распределённых модульных структур. Предназначена для мониторинга, отображения, сигнализации, записи и отображения всех входных/выходных данных.

ПТК «Вулкан-ВРК» состоит из независимых однотипных (совместимых) рабочих станций, объединённых информационной магистралью. Каждая рабочая станция для выполнения своих задач использует соответствующий набор периферийных устройств.

Обобщенный перечень функциональных подсистем ПТК «Вулкан» включает:

подсистему локальной автоматики, подсистему внешних интерфейсов;

вычислительную подсистему;

подсистему представления оперативной информации;

подсистему архивирования;

подсистему документирования;

инженерную подсистему.

При модернизации ВК системы ВРК использовано лицензированное математическое, алгоритмическое и программное обеспечение широко используемого на АЭС оборудования «Вулкан» и программных средств BEACON. ПТК «Вулкан-ВРК», построенный на базе оборудования «Вулкан-М», выполняет отработанные базовые функции отображения, архивирования и документирования инфор-

мации. На программных средствах BEACON выполняются нейтронно-физические расчёты параметров смешанной АЗ.

BEACON — это подсистема программных средств оперативного контроля, анализа и прогноза активной зоны, обеспечивающая персонал энергоблока непрерывно обновляемой информацией о состоянии реакторной установки [2].

BEACON рассчитывает текущее объемное распределение поля энерговыделения внутри реакторной установки, используя усовершенствованную модель активной зоны. Непрерывный контроль распределения мощности активной зоны реактора предусматривает точную оценку и соблюдение допустимых пределов работы реакторной установки. Модель активной зоны согласуется с измеренными данными, получаемыми от стандартной аппаратуры энергоблока, в том числе с данными:

о достоверной тепловой мощности активной зоны;

токах датчиков энерговыделения;

положении стержней органов регулирования СУЗ;

температуре теплоносителя в холодных нитках циркуляционных петель;

расходе теплоносителя в циркуляционных петлях;

давлении над активной зоной;

концентрации борной кислоты на входе в активную зону.

Прогнозирующие функции BEACON позволяют сделать точные оперативные предсказания, основанные на трехмерной эталонной узловой модели. BEACON автоматизирует прогнозирующие функции для определения и оценки критических состояний реакторной установки, концентрации бора. Прогнозирующие функции могут также использоваться для оценки эффекта некоаксиального (разрегулированного) контроля органов управления и несоответствий температуры петель для предупреждения развития и подавления возникших радиальных ксеноновых колебаний.

BEACON функционирует на технологическом компьютере ПТК «Вулкан-ВРК». Дополнительные автоматизированные рабочие места могут быть подсоединены с использованием стандартной сети, чтобы обеспечить параллельный доступ для контроля, анализа и прогноза активной зоны другими пользователями. Это позволяет как операторам реактора, так и другому техническому персоналу иметь доступ к информации для оценки и принятия решения.

Таблица 1. Обобщенный состав функций ВК до модернизации («Хортица») системы ВРК и после модернизации (СМАЗ)

Функция	«Хортица»	СМАЗ	
		ПТК «Вулкан»	BEACON
Внешние интерфейсы	+	+	
Оперативный расчет	+	+	
Фоновый расчет	+		+
Регистрации	+	+	+
Накопления	+	+	+
Представления	+	+	+
Дополнительные вычисления		+	
Прогнозирование			+

Из сравнительного анализа функциональных возможностей ВК до и после модернизации (табл. 1) следует, что новое оборудование и программный комплекс BEACON обеспечивают не только полное выполнение всех функций

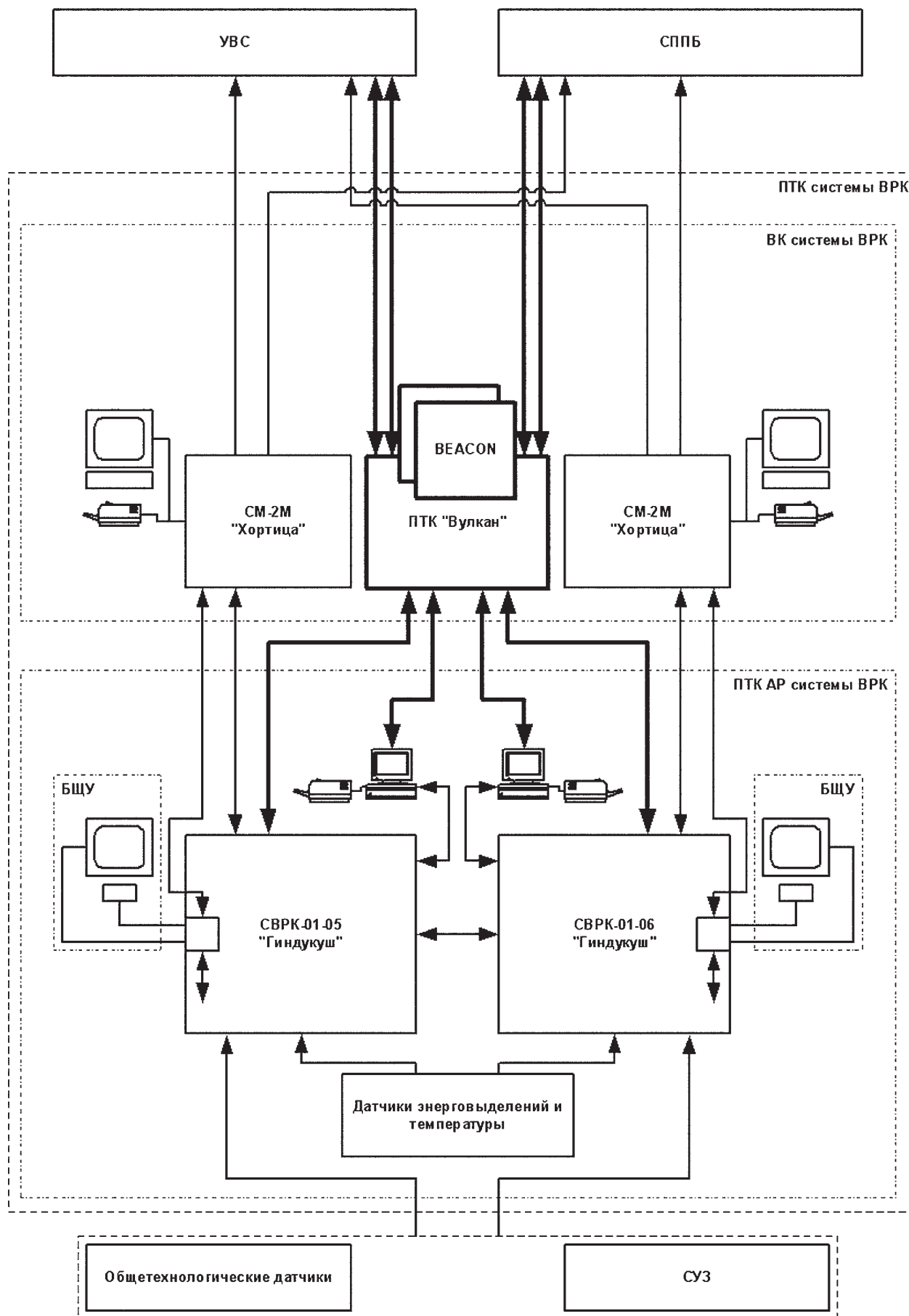


Рис. 1. Структурная схема интерфейсов СМА3 с системой ВРК и АСУ ТП энергоблока

«Хортицы», но и позволяют реализовать дополнительные возможности для мониторинга состояния активной зоны, в том числе:

оценку состояний активной зоны как в режиме on-line, так и в режиме прогноза состояний;

подготовку констант для ТВС для каждой топливной загрузки (у «Хортицы» отсутствует сервисная поддержка разработчиком константной базы);

улучшенный метод решения уравнения переноса нейтронов в активной зоне на основе применения улучшенной, по сравнению с применяемой в «Хортице», схемой решения уравнения диффузии (в BEACON реализована схема решения на основе двухгруппового уравнения диффузии в отличие от упрощённой одногрупповой разностной схемы, применяемой в «Хортице»);

улучшенный механизм контроля энерговыделения в активной зоне при переходных процессах за счёт реализации схемы периода расчёта функционалов поля энерговыделения, зависящей от изменений состояния активной зоны, в частности от аксиального офсета;

учёт выгорания изотопа ^{10}B в теплоносителе 1-го контура;

улучшенную схему расчёта концентраций отравителей (Xe, Sm) за счёт учёта вклада каждого из изотопов-предшественников в зависимости от выгорания загрузки;

применение в нейтронно-физической модели активной зоны более мелкой сетки разбиения активной зоны на «гомогенные» участки (в BEACON зона разбита на $163 \times 24 \times 6 = 23\,472$ участка, в «Хортице» — на $163 \times 16 = 2608$ участков);

улучшенную систему архивизации параметров активной зоны, позволяющую хранить информацию в течение всей топливной кампании;

получение через интерфейс пользователя более полной и более наглядной информации о состоянии активной зоны; форма представления данных позволяет оператору РУ выработать правильную стратегию управления активной зоной в режимах работы не только на номинальной мощности, но и в переходных режимах;

объёмное (трёхмерное) графическое представление на видеокадрах результатов расчетов.

На рис. 2. показан один из видеокадров, доступный для оператора из СМАЗ.

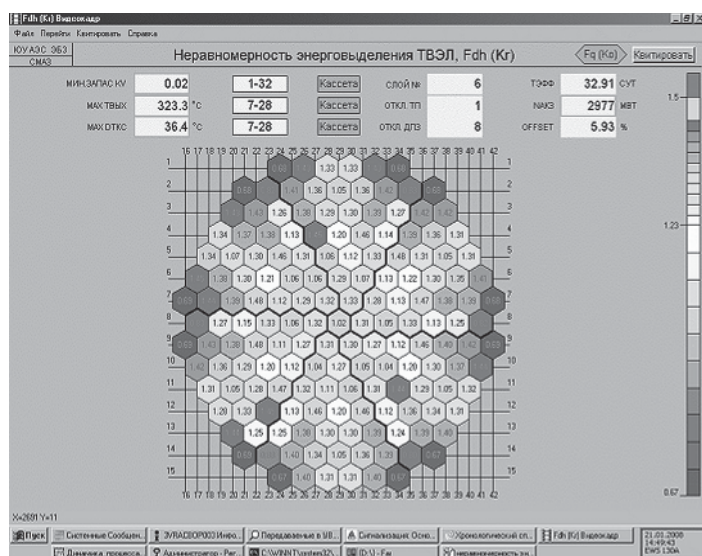


Рис. 2. Пример видеокадра из СМАЗ

С целью обеспечения безопасной эксплуатации РУ в ходе работ по модернизации, подтверждения работоспособности нового оборудования и обучения персонала АЭС, модернизация ВК системы ВРК в соответствии с Планом лицензирования процесса модернизации, согласованным с ГКЯРУ, производилась поэтапно. На первом — подготовительном — этапе разрабатывались и поставлялись программные средства BEACON и ПТК «Вулкан-ВРК» для их установки и подключения к действующей системе ВРК. Затем была организована параллельная работа действующего ВК («Хортица») системы ВРК и вновь смонтированного оборудования при эксплуатации в АЗ реактора ТВС российского производства.

В рамках этого этапа проведены предварительные испытания и опытная эксплуатация (декабрь 2004 — май 2005 г.) СМАЗ с целью оценки и сравнения результатов нейтронно-физических расчетов, производимых двумя способами («Хортица» и СМАЗ) при загрузке АЗ российским топливом. Целью опытной эксплуатации было подтверждение возможностей ПТК «Вулкан-ВРК» и программных средств «BEACON» производить нейтронно-физические и теплогидравлические расчеты однородной активной зоны с ТВС российского производства при параллельной работе с действующей системой ВРК и верификации этих расчетов по показаниям штатных программных средств «Каскад» и ВК («Хортица») системы ВРК. В ходе опытной эксплуатации установлено, что отклонения в значениях параметров входных данных «BEACON», рассчитанных СМАЗ и «Хортица», не превышают допустимых значений, что подтверждает выполнение ПТК «Вулкан-ВРК» функций передачи в BEACON достоверных входных данных. В части нейтронно-физических расчетов поле энерговыделения, смоделированное BEACON, удовлетворительно совпадает с полем энерговыделения, восстановленным комплексом «Каскад» («ПИР-А»), а также БИПР-7А, что подтверждает достоверность оценки поля энерговыделения.

Положительные результаты опытной эксплуатации СМАЗ дали возможность перейти к этапу её опытно-промышленной эксплуатации после загрузки в активную зону (август 2005 г.) шести пилотных ТВС производства фирмы «Вестингауз», которая продолжается по настоящее время. В ходе опытно-промышленной эксплуатации СМАЗ получены подтверждения работоспособности оборудования и функциональных возможностей СМАЗ для сопровождения эксплуатации смешанной топливной загрузки. В частности, периодическое сравнение расчетных значений относительного энерговыделения ТВС, генерируемых системой BEACON, с восстановленными значениями энерговыделения по токам ДПЗ показывает, что максимальные отклонения не превышают 3–4 % при допустимых 5 %.

В заключение можно отметить, что предварительные положительные результаты опытно-промышленной эксплуатации СМАЗ дают основания утверждать о положительной перспективе ввода модернизированного ВК системы ВРК энергоблока № 3 ЮУ АЭС в постоянную эксплуатацию.

Литература

1. В. А. Брагин, И. В. Батенин, М. Н. Голованов и др. Системы внутриреакторного контроля АЭС с реакторами ВВЭР / Под ред. Г. Л. Левина. — М.: Энергоатомиздат, 1987.
2. William A. Boyd and R. Wade Miller. The beacon on-line core monitoring system: functional upgrades and applications // Proceedings of a Specialists' Meeting on In-core Instrumentation and Reactor Core Assessment, Mito-shi, Japan, 14–17 October, 1996.