

А. Е. Калинушкин, А. Ю. Курченков,
В. И. Митин, Ю. М. Семченков

РНЦ «Курчатовский институт»

Современная система внутриреакторного контроля (СВРК-М), мониторинг ядерного топлива ВВЭР-1000

Приводится краткая информация о современной системе контроля эксплуатации ядерного топлива на реакторах типа ВВЭР (СВРК-М), разработанной в РНЦ «Курчатовский институт». Описываются основные технические решения СВРК-М.

Ключевые слова: АЭС, ВВЭР, СВРК-М, Хортица-М, ДПЗ, защита по локальным параметрам активной зоны.

А. Е. Калинушкин, А. Ю. Курченков, В. И. Митин, Ю. М. Семченков

Сучасна система внутріреакторного контролю (СВРК-М), моніторинг ядерного палива ВВЕР-1000

Наводиться коротка інформація про сучасну систему контролю експлуатації ядерного палива на реакторах типу ВВЕР (СВРК-М), розроблену в РНЦ «Курчатовський інститут». Описуються основні технічні рішення СВРК-М.

Ключові слова: АЕС, ВВЕР, СВРК-М, Хортиця-М, ДПЗ, захист за локальними параметрами активної зони.

© А. Е. Калинушкин, А. Ю. Курченков, В. И. Митин,
Ю. М. Семченков, 2010

Целью данной статьи является краткое описание современной системы внутриреакторного контроля СВРК-М, работающей на 11 энергоблоках с ВВЭР-1000. В современных условиях для обеспечения безопасности эксплуатации энергоблоков АЭС необходимо наличие точной и оперативной информации об эксплуатации ядерного топлива, другими словами, необходим независимый от проектных расчетов мониторинг ядерного топлива. Основным источником такой информации на АЭС с ВВЭР является система внутриреакторного контроля (СВРК).

Главная задача СВРК — оперативный контроль распределения поля энерговыделения и его функционалов в процессе эксплуатации энергоблока. Важной особенностью СВРК применительно к контролю ядерного топлива должна быть независимость используемых методов и программ от кодов, используемых при расчетах топливных загрузок, для невозможности ошибки по общей причине.

В настоящее время создана и внедряется на АЭС с ВВЭР современная система внутриреакторного контроля (именуемая СВРК-М), которая выполняет информационные, защитные и диагностические функции с высокой точностью, надёжностью и быстродействием (подтверждено опытом её эксплуатации на 11 энергоблоках с ВВЭР-1000), что позволяет обеспечить реальное повышение качества, надёжности и безопасности эксплуатации ядерного топлива и энергоблоков АЭС.

Отметим, что в отличие от всех расчетных программных комплексов, имитирующих распределение энерговыделения в зоне реактора, программное обеспечение Хортица-М [1], [2] опирается при восстановлении энерговыделения в зоне только на показания ДПЗ с использованием мелкосеточного нейтронно-физического расчета и крупносеточного для интерполяции полей нейтронов в кассетах, не содержащих ДПЗ. Это практически исключает пропуски возможных аномалий в активной зоне реактора. Так, на энергоблоке № 2 Хмельницкой АЭС в 5-й топливной загрузке СВРК-М своевременно обнаружен радиальный перекося энерговыделения, особенно заметный в начале кампании на низкой мощности при слабых обратных связях. В дальнейшем этот перекося полностью подтвержден как показанием внутриреакторных датчиков (ДПЗ и термодатчиков), так и петлевых термодатчиков. Анализ показал, что СВРК-М обеспечивает достоверный контроль активной зоны.

Краткое описание СВРК-М. Структурно (рис. 1) СВРК-М представляет собой трехуровневую систему [1]: уровень связи с объектом (датчики); нижний уровень (измерительная аппаратура СВРК-М); верхний уровень (вычислительные средства и средства отображения информации).

Для контроля распределения поля энерговыделения в активной зоне проекта В-320 используются сигналы следующих датчиков:

448 родиевых ДПЗ (7 × 64);

95 термоэлектрических преобразователей (ТП) градуировки ХА (тип К);

16 ТП и 8 термометров сопротивления (ТС) на петлях 1-го контура;

датчиков положения ОР СУЗ, концентрации борной кислоты, давления, расхода теплоносителя и т. д.

Аппаратура СВРК-М («Гиндукуш-М») [2] является результатом технических решений, проверенных большим

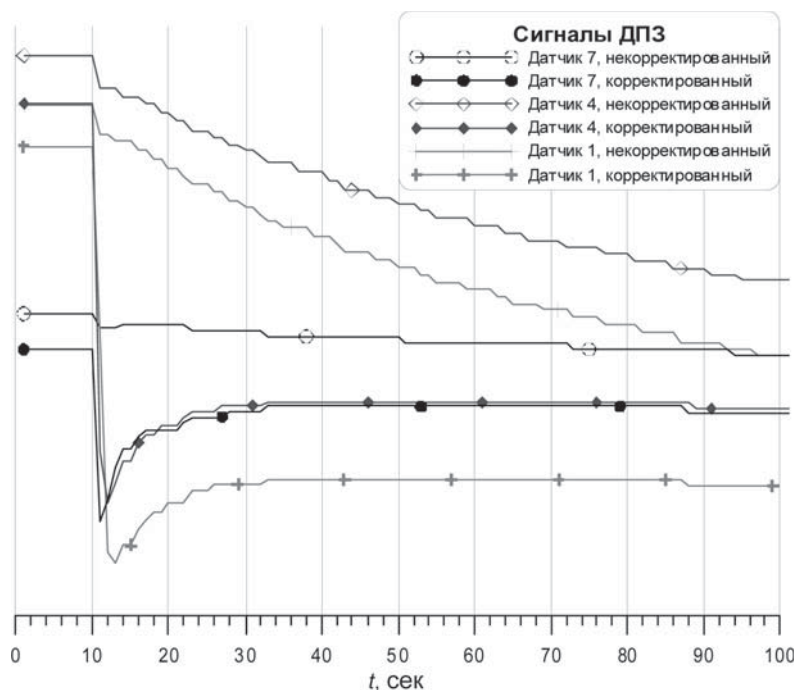


Рис. 2. Устранение запаздывания родиевого ДПЗ

использование элементов, узлов и вычислительных средств, разработанных и изготовленных для ответственного применения;

введение широко развитой процессной процедуры самодиагностики;

наличие двойного запаса по скорости выполнения расчетов и использование процессорных возможностей вычислительных средств.

В результате реализации этих решений значительно улучшены характеристики СВРК ВВЭР большой мощности. На рис. 2 и 3 представлен контроль процессов в активной зоне ВВЭР в переходном режиме на АЭС «Козлодуй». Изменение показаний АКНП и СВРК-М (в части контроля тепловой мощности по показаниям ДПЗ) совпадает во времени. Отставание СВРК-М в части контроля тепловой мощности по показаниям термодатчиков 1-го контура циркуляции теплоносителя объясняется значительной теплоемкостью материалов активной зоны, влияющей на разогрев реактора.

Перечисленные решения, а также структура построения обеспечили соответствие СВРК-М следующим принципам проектирования систем АСУТП: единичного отказа; отказа по общей причине; разнообразия; независимости; резервирования; контролепригодности и ремонтпригодности. СВРК-М, построенная на этих принципах, позволила в условиях реальной эксплуатации ВВЭР реализовать новые функции: защиту по локальным параметрам активной зоны (линейное энерговыделение твэлов, запас до кризиса теплообмена) и внутриреакторную шумовую диагностику. Поскольку указанные локальные параметры являются расчетными и изменяющимися в процессе эксплуатации, данный тип защиты может реализовываться только с применением программного обеспечения («software»). Этой части разработки комплексной информационно-измерительной системы и верификации решений уделено особое внимание. В частности, на первом этапе были определены основные технические решения и проведено расчетное обоснование для определенного перечня проектных

исходных событий (аварий) с учетом прогнозируемой проектной деградации свойств самой системы контроля, диагностики и управления. Впоследствии разработаны аппаратура (с условным названием «Гиндукуш-М») и необходимое программное обеспечение. Аппаратура прошла процедуру квалификации по МЭК 60780 как аппаратура систем защиты реактора (с учетом эффекта «старения»). Программное обеспечение для этой информационно-измерительной системы разработано в соответствии с рекомендациями МЭК 60880. Это означает, что весь процесс разработки включал в себя процедуры подтверждения качества разработки, в нашем случае — оригинальные процедуры независимой верификации и валидации программного обеспечения.

Учитывая, что по действующим правилам в процессе эксплуатации АЭС недопустимо специально создавать условия для проверки формирования сигналов защиты по локальным параметрам, на полигоне АСУТП (ЭНИЦ, г. Электрогорск) были проведены имитационные испытания качества работы СВРК в условиях, близких к натурным условиям эксплуатации. В процессе имитационных испытаний завершена успешная проверка формирования сигналов защиты в некоторых возможных случаях при реальной эксплуатации реакторных установок с ВВЭР. В частности, проведена проверка при отключении главных циркуляционных насосов контура циркуляции теплоносителя, при неуправляемом извлечении органов регулирования СУЗ, при возможном снижении концентрации борной кислоты в теплоносителе, в случае, характеризующемся выбросом одного органа регулирования СУЗ.

В дальнейшем функция защиты по внутриреакторным локальным параметрам прошла проверку в процессе пусконаладочных работ и эксплуатации на энергоблоке № 3 Калининской АЭС, блоках №№ 1 и 2 АЭС «Тяньвань», блоках №№ 1—3 Балаковской АЭС, а также блоках №№ 5 и 6 АЭС «Козлодуй» (Болгария). Испытания осуществлялись по специально разработанным программам. Следует отметить, что на Тяньваньской АЭС в составе СВРК-М введена

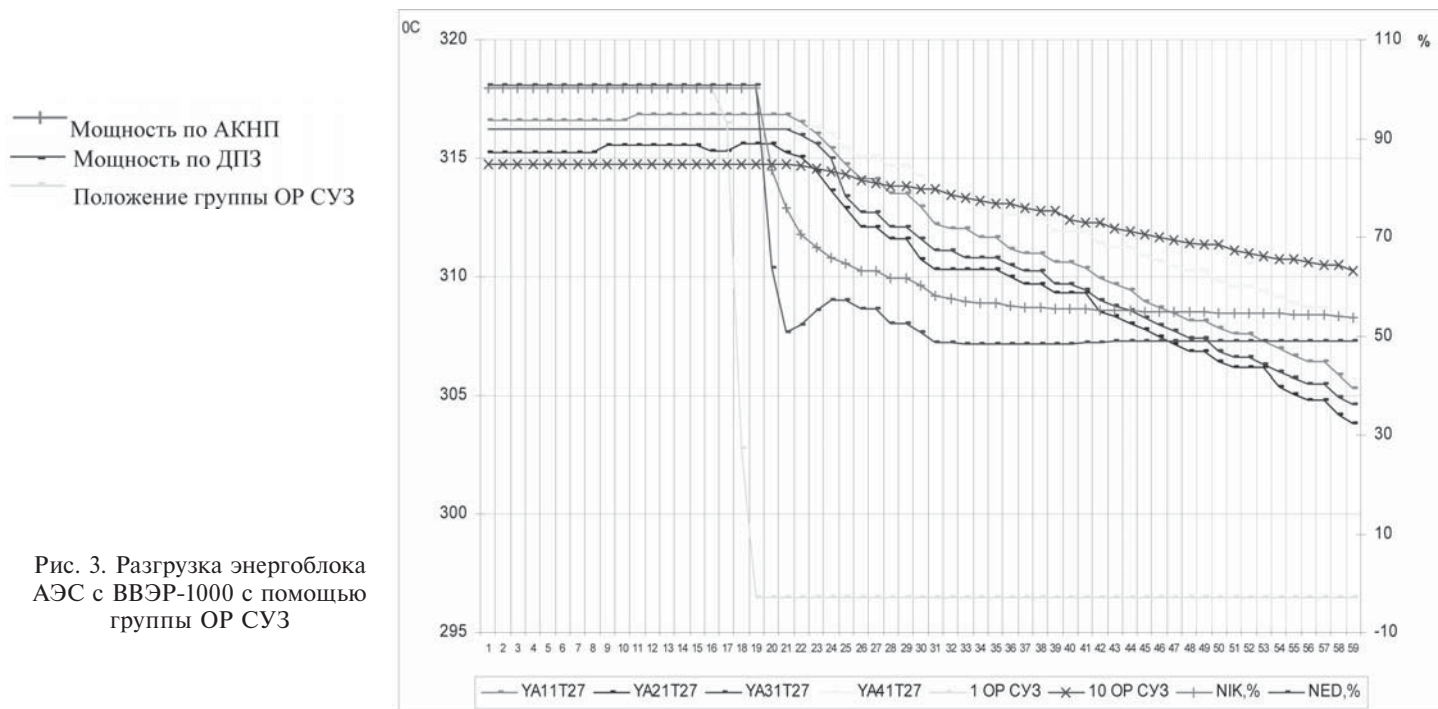


Рис. 3. Разгрузка энергоблока АЭС с ВВЭР-1000 с помощью группы ОР СУЗ

в штатную эксплуатацию функция внутриреакторной шумовой диагностики, суть которой состоит в контроле локальных изменений нейтронного потока и появления кипения в активной зоне ВВЭР. В качестве изменяющейся в момент наступления кипения характеристической функции индикатора технического состояния выбрано отношение дисперсии флюктуации («шума») нейтронного потока к току ДПЗ. Такое решение апробировано и подтверждено натурными испытаниями.

В проекте АЭС-2006 обоснованно предполагается дополнить возможности СВРК-М функциями оперативного контроля эксплуатационных ограничений по интегральной мощности твэлов и выдачи рекомендаций по оптимальному ведению водно-химического режима 1-го контура циркуляции теплоносителя.

Список литературы

1. Митин В. И. Основные решения по модернизированной системе внутриреакторного контроля реакторов ВВЭР-1000: Доклад на международном симпозиуме «Измерения, важные для безопасности в реакторе» / В. И. Митин, А. Е. Калинушкин, М. Н. Голованов и др. — М., 20–22.09.07.
2. Голованов М. Н. Система контроля, управления и диагностики РУ для ВВЭР-1000 / М. Н. Голованов, А. Е. Калинушкин, В. И. Митин и др. // Ядерные измерительно-информационные технологии. — 2002. — № 2.
3. Mitin V. Modern in-core monitoring system of VVER-1000 reactors (V-320) by fuel assembler with individual characteristics using: Report on 17 AER Symposium on VVER reactor physics and reactor safety / V. Mitin, Yu. Semchenkov, A. Kalinushkin. — Yalta, Ukraine, 23–29.09.07.

Надійшла до редакції 21.07.2010.