

УДК 621.039.5

СИСТЕМА РАСЧЕТНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ДИАГНОСТИКИ РБМК-1000

Глазков О.В., Груздов Ф.В., Дружаев А.А., Семенов А.А., Соловьев Д.А., Черезов А.Л., Щукин Н.В.
(НИЯУ МИФИ, г. Москва), Морозов А.Ю. (Смоленская АЭС, г. Десногорск)

Рассматриваемый в настоящей статье алгоритм системы диагностики ECRAN 3D основан на предположении, что большинство неисправностей и нарушений в работе РБМК-1000 можно трактовать как возмущение параметров математической модели, порождающее наблюдаемый сигнал рассогласования — расхождение между расчетными и измеренными данными. Предлагаемая система диагностики основана на математически корректной процедуре обработки этого сигнала и развивает подходы, предложенные в работах [1—5].

Неисправностями, которые могут быть обнаружены с использованием системы диагностики ECRAN 3D, являются:

изменение положения органа регулирования, вызванное выходом из строя исполнительных механизмов привода СУЗ или частичным обрывом секций поглотителя;

ошибки датчиков положения органов СУЗ;

ошибки в показаниях радиальных и/или высотных внутриреакторных детекторов нейтронного поля;

ошибки в показаниях датчиков поканального расхода теплоносителя;

неверное введение в информационно-измерительную систему типа ТВС или ее энерговыработки;

неправильная регистрация положений запорно-регулирующих клапанов при изменении расхода теплоносителя через каналы активной зоны;

ошибки или запаздывание при передаче данных из информационно-измерительной системы в программный комплекс отдела ядерной безопасности и надежности.

Алгоритм системы диагностики ECRAN 3D [6, 7] включает в себя следующие шаги:

проверка на доступность и обновление данных о состоянии реакторной установки;

проверка на наличие перегрузок и включения/выключения внутриреакторных детекторов;

нейтронно-физический и теплогидравлический расчет;

пространственно-временная фильтрация сигнала рассогласования;

сравнение компонентов пространственно-временной невязки с установленными пределами и вывод сигнала об обнаружении возмущения;

анализ, распознавание и количественная оценка обнаруженного возмущения с использованием средств графического интерфейса системы.

Исследования, проведенные на данных первого энергоблока Смоленской АЭС, показали, что корректная обработка перегрузок и включения/выключения внутриреакторных детекторов позволяет снизить число ложных срабатываний с 2,3 до 0,3 события в сутки.

Нейтронно-физический расчет проводится с помощью кода POLARIS — диффузионной двухгрупповой трехмерной программы полномасштабного нейтронно-физического расчета РБМК. В настоящее время программа эксплуатируется в АО «ВНИИАЭС» и в отделах ядерной безопасности и надежности на АЭС с РБМК-1000 в составе аттестованного комплекса программ ЭНЕРГИЯ.

Для повышения точности моделирования с помощью кода POLARIS корректируются нейтронно-физические сечения по показаниям внутриреакторных детекторов. С учетом корректировки сечений уравнения нейтронного поля имеют вид

$$\begin{aligned} (-\nabla D_1 \nabla + \Sigma_{a1} + \Sigma_{12})\varphi_1 &= \delta_\Sigma (v \Sigma_{f2} \varphi_2 + v \Sigma_{f1} \varphi_1); \\ (-\nabla D_2 \nabla + \Sigma_{a2})\varphi_2 &= \Sigma_{12} \varphi_1; \\ \int_{az} (v \Sigma_{f2} \varphi_2 + v \Sigma_{f1} \varphi_1) dr &= Q; \\ \varphi_1|_G &= \varphi_2|_G = 0, \end{aligned} \quad (1)$$

где δ_Σ — поправка к сечениям генерации — поправочная функция к источнику нейтронов, обеспечивающая согласие расчетной модели с показаниями радиальных и высотных датчиков контроля энерговыделения, выбранная таким образом, что для скорректированной расчетной модели коэффициент размножения равен единице. На экстраполированных границах G бокового, верхнего и нижнего отражателей задается граничное условие нулевого нейтронного пото-

ка. Все обозначения в уравнениях (1) общепринятые.

По сравнению с обычной процедурой восстановления нейтронного поля и корректировки сечений по показаниям датчиков в диагностическом режиме расчета с помощью кода POLARIS пороги отбраковки сигналов внутриреакторных детекторов значительно увеличены. В результате датчики с сильными отклонениями используются в процедуре восстановления, а не бракуются, что позволяет в дальнейшем получить информацию о возмущении.

Однако для диагностики теплогидравлических неисправностей нейтронно-физических моделей оказывается недостаточно. Это связано с тем, что в настоящее время стремятся достичь близкого к нулю парового коэффициента реактивности в РБМК-1000. Это значит, что изменение плотности теплоносителя в канале не может сильно повлиять на его мощность и показания ближайших внутриреакторных детекторов. Поэтому в системе ECRAN 3D для повышения чувствительности к теплогидравлическим возмущениям также используется теплогидравлическая модель, в основу которой положены алгоритмы программ ГИДРА и КОНТУР-М.

Теплогидравлическая модель системы ECRAN 3D основана на предположении, что пароводяной тракт между барабаном-сепаратором и нижними водяными коммуникациями может быть разбит на несколько участков, а именно запорно-регулирующий клапан, парогенерирующий канал, пароводяные коммуникации, а также неизвестное гидросопротивление, связанное с особенностями всего участка, например, разная длина пароводяных коммуникаций, разное гидросопротивление труб и др.:

$$P_{Б.С} = \Delta P_{\text{доп}} + \Delta P_{\text{Т.К}} + \Delta P_{\text{З.Р.К}} + P_{\text{Н.В.К}},$$

где $P_{Б.С}$ — давление в барабане-сепараторе; $\Delta P_{\text{доп}}$ — дополнительный перепад давления; $\Delta P_{\text{Т.К}}$ — перепад давления на парогенерирующем канале; $\Delta P_{\text{З.Р.К}}$ — перепад давления на запорно-регулирующем клапане; $P_{\text{Н.В.К}}$ — давление в нижних водяных коммуникациях. Влияние появления на участке между барабаном-сепаратором и нижними водяными коммуникациями неучтенного гидросопротивления отразится на дополнительном перепаде давления.

После нейтронно-физического и теплогидравлического расчетов формируется сигнал рассогласования со следующими компонентами:

$$\delta = \begin{pmatrix} \delta_r \\ \delta_h \\ \delta_\Sigma \\ \Delta P_{\text{доп}} \end{pmatrix};$$

$$\delta_r = W_{r_{\text{изм}}} - W_{r_{\text{расч}}};$$

$$\delta_h = W_{h_{\text{изм}}} - W_{h_{\text{расч}}},$$

где δ — сигнал рассогласования; $W_{r_{\text{изм}}}$, $W_{r_{\text{расч}}}$ — измеренные и расчетные показания внутриреакторных радиальных детекторов соответственно; $W_{h_{\text{изм}}}$, $W_{h_{\text{расч}}}$ — измеренные и расчетные показания внутриреакторных высотных детекторов соответственно; δ_Σ — поправки к сечениям генерации; $\Delta P_{\text{доп}}$ — дополнительный перепад давления в технологических каналах.

Система диагностики одновременно анализирует все компоненты сигнала рассогласования. В результате возмущение неизвестной природы будет выявлено в каком-то одном или нескольких компонентах сигнала. В идеальном случае, когда модель точно описывает поведение моделируемого объекта, $\delta = 0$.

Сформированные сигналы рассогласования первоначально обрабатываются медианным фильтром для исключения импульсных помех. Затем отфильтрованные сигналы рассогласования вводятся в две последовательные по времени очереди А и Б. Сначала осуществляется ввод в первую временную очередь А. По мере поступления все новых данных сигнал рассогласования движется к концу первой очереди, затем переводится во вторую временную очередь Б. При заполнении второй очереди находящиеся в ней устаревшие данные удаляются из области фильтрации. Если обе очереди заполнены, сигналы рассогласования в каждой очереди усредняются. Результатом усреднения являются созданные на основе временных очередей два усредненных сигнала рассогласования δ_A , δ_B . Использование для усреднения фильтров скользящего среднего позволяет снизить случайный шум. После усреднения вычисляется покомпонентная разница между усредненными сигналами рассогласования $\Delta\delta = \delta_A - \delta_B$. Таким образом, на выходе получаем разницу усредненных

сигналов рассогласований, называемую пространственно-временной невязкой $\Delta\delta$ и характеризующую пространственно-временные изменения в состоянии реакторной установки.

При обнаружении начала перегрузки две последовательные очереди очищаются, новая информация начинает накапливаться после завершения перегрузки. Как следствие алгоритм не диагностирует загружаемые в активную зону ТВС.

При выходе компонентов $\Delta\delta$ за установленные пределы формируется сигнал о возмущении и его координатах. Эта информация отображается через графический интерфейс, дающий возможность пользователю анализировать обнаруженное возмущение. Пределы, при превышении которых формируются сигналы о возмущении, подбираются индивидуально для каждого энергоблока, исходя из анализа уровня шума, полученного после обработки архивной информации. Чувствительность алгоритма диагностики приведена в таблице.

Чувствительность системы диагностики ECRAN 3D

Параметр	Ошибка	Вероятность обнаружения
Энерговыработка, МВт·сут/ТВС	800	0,90
Положение поглощающих стержней, см	50	0,94
Показания внутриреакторных детекторов, %	3	0,96
Расход, %	10	0,98
Положение запорно-регулирующего клапана, мм	1	0,97

Приведем методику и покажем результаты выбора порогов чувствительности на примере выявления внесенных возмущений в показания положения запорно-регулирующего клапана первого энергоблока Смоленской АЭС. Для удобства описания введем определение чистого состояния реакторной установки — состояние на номинальной мощности, заведомо не содержащее ошибок. Для определения чувствительности алгоритма анализировались состояния, содержащие возмущения. На основе чистого состояния строились сигнал рассогласования $\delta_{\text{чист.}}$, затем набор сигналов рассогласования $\delta_{\text{тип,разм.,поз.}}$, полученных на основе чистого состояния, в которое вносились различные по типу,

размеру и позиции в активной зоне возмущения. Затем вычисляли набор $\Delta\delta_{\text{тип,разм.,поз.}}$ пространственно-временных невязок, полученных следующим образом:

$$\Delta\delta_{\text{тип,разм.,поз.}} = \delta_{\text{тип,разм.,поз.}} - \delta_{\text{чист.}}$$

где тип — тип ошибки (положение ОР СУЗ, расход и др.); разм. — вносимая ошибка; поз. — позиция в активной зоне.

Пространственно-временную невязку вычисляли описанным образом, чтобы исключить влияние шумов измерительной аппаратуры на внесенное возмущение. Затем на одном графике строились зависимости шума и максимальных отклонений компонентов пространственно-временных невязок из набора $\Delta\delta_{\text{тип,разм.,поз.}}$ от параметров состояния активной зоны: энергоснабжения, расхода, положения ОР СУЗ и др. Пример такой зависимости для добавочного перепада давления от положения запорно-регулирующего клапана показан на рис. 1. Сравнение отклика на внесенное возмущение и характерного уровня шума для возмущений разного типа позволяет выбрать порог чувствительности по каждому компоненту пространственно-временной невязки. Затем вычисляется вероятность обнаружения отказа в зависимости от порога для каждого типа возмущения. На рис. 2 показана зависимость вероятности обнаружения ошибки в положении запорно-регулирующего клапана от порога чувствительности.

Аналогичным образом анализировались возмущения в показаниях внутриреакторных

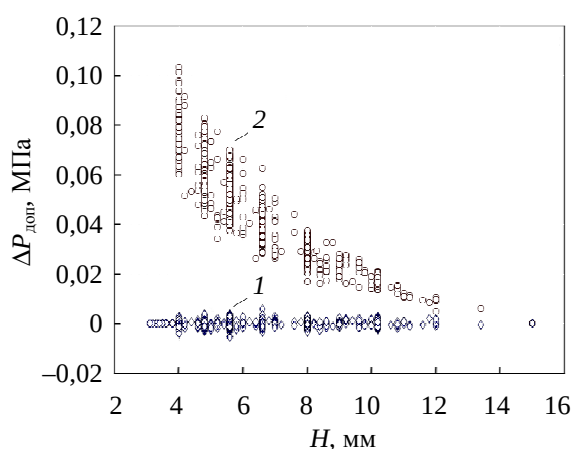
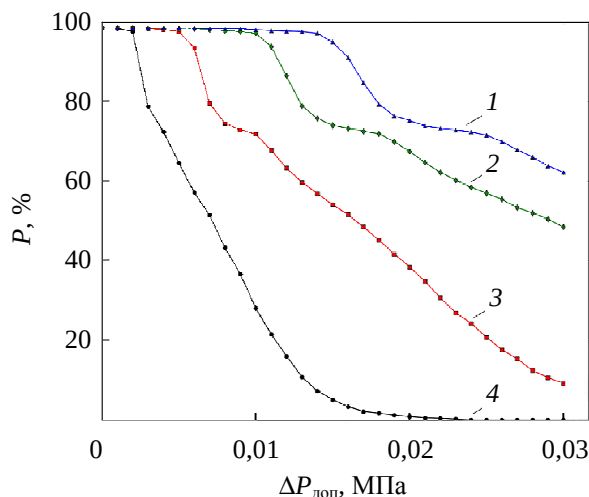


Рис. 1. Дополнительный перепад давления без ошибки (1) и с ошибкой 1,5 мм от начального положения запорно-регулирующих клапанов (2) в зависимости от положения запорно-регулирующих клапанов



Р и с. 2. Вероятность обнаружения ошибки в положении запорно-регулирующего клапана 1,5 (1), 1 (2), 0,5 (3), 0,2 мм (4) в зависимости от порога чувствительности (дополнительного перепада давления)

детекторов, расходомеров, энерговыработки и положениях ОР СУЗ. Для выбранных порогов чувствительности было оценено число ложных срабатываний системы диагностики — 0,3 события в сутки.

Авторы статьи выражают признательность А.В. Калининскому за помощь в подготовке и оформлении материалов статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Филатов А.В., Щукин Н.В., Семенов А.А. и др. Расчетно-измерительная система ECRAN диагностики состояния активной зоны РБМК-1000. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, 2000, вып. 3, с. 23—32.
2. Щукин Н.В., Филатов А.В., Семенов А.А., Романов С.Д. ECRAN — система контроля загрузки активной зоны ядерного реактора. — В сб.: Научные исследования в области ядерной энергетики в технических вузах России. М., МЭИ, 1999, вып. 4, с. 36—38.
3. Shchukin N.V., Filatov A.V., Chernov E.V. et al. Development of mathematical models for NPP core analysis during operation. — In: PHYSOR 96, 1996, v. 4, p. 78—86.
4. Филатов А.В. Расчетно-измерительная система диагностики состояния активной зоны ЯЭУ. Дис. на соискание ученой степени к.т.н. М., МИФИ, 2000.
5. Зонов И.В., Щукин Н.В., Хотылев В.А. Развитие методов контроля и их применения для действующих и перспективных реакторов канального типа. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, 1995, вып. 4, с. 92—103.
6. Соловьев Д.А., Щукин Н.В., Семенов А.А. и др. Система пространственно-временной диагностики состояния активной зоны ECRAN 3D. — Там же. Сер. Физика и техника ядерных реакторов, 2012, вып. 4, с. 68—77.
7. Solovyyev D.A., Semenov A.A., Gruzlov F.V. et al. Computer code for space-time diagnostics of nuclear safety parameters. — In: PHYSOR 2012, 2012, v. 2, p. 1536—1541.

Поступила в Редакцию 21.11.14

УДК 621.039.546:621.039.542.34

ПОВЕДЕНИЕ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ ТВЭЛОВ ПЛАВУЧИХ ЭНЕРГООБЛОКОВ

Кулаков Г.В., Ватулин А.В., Еришов С.А., Коновалов Ю.В., Морозов А.В.,
Сорокин В.И., Федотов В.В. (АО «ВНИИНМ», г. Москва),
Шишин В.Ю., Овчинников В.А., Шельдяков А.А. (АО «ГНЦ НИИАР», г. Димитровград)

Актуальность разработки плавучих энергоблоков и атомных электростанций малой мощности определяется экономической целесообразностью и перспективами их использования в труднодоступных районах. Плавучий энергоблок — это автономный энергетический объект, который создается на судостроительном заводе как несамоходное судно и затем буксируется морским или речным транспортом к месту его эксплуатации. К его активной зоне предъявляются повышенные требования в части маневренности, надежности и безопасности в нормальных и аварийных условиях. Указанные требования могут быть удовлетворены посредством использования проверенных судовых техноло-

гий при проектировании активной зоны. Для практической демонстрации этой технологии в Певеке будет размещен головной плавучий энергоблок «Академик Ломоносов», снабженный реакторной установкой КЛТ-40С, прототипом которой является установка действующих атомных судов. Разработка твэлов ведется путем модернизации твэлов атомных ледоколов на основе проверенных конструкций и технологий.

Одно из основных требований, предъявляемых к твэлам, заключается в использовании в них топлива обогащением не выше 20%. Топливная композиция твэлов атомных ледоколов не может обеспечить загрузку урана, необходимую для выполнения этого требования. Топлив-