

В. Ф. Шикалов, А. В. Журбенко,
А. С. Кужиль, Л. В. Козлова

РНЦ «Курчатовский институт»

Физическое разнообразие при формировании сигналов аварийной защиты по нейтронно-физическим параметрам для АЭС с ВВЭР

Рассмотрены возможности и условия использования принципа физического разнообразия для сигналов по нейтронно-физическим параметрам применительно к АЭС с ВВЭР. Исследована возможность использования сигналов, формируемых от традиционных автоматизированных систем контроля нейтронного потока (АКНП), в сопоставлении с сигналами новых разработанных средств на базе системы внутриреакторного контроля (СВРК). На основе анализа эксплуатационных данных современных систем АКНП и СВРК реакторов ВВЭР показаны преимущества сигналов СВРК при работе на энергетических уровнях мощности. Определены концепции построения систем контроля нейтронно-физических параметров активных зон ВВЭР с использованием принципа физического разнообразия.

Ключевые слова: водо-водяные энергетические реакторы, сигналы аварийной защиты, физическое разнообразие, вне реакторный контроль, внутриреакторный контроль.

В. Ф. Шикалов, О. В. Журбенко, О. С. Кужиль, Л. В. Козлова

Фізична різноманітність у формуванні сигналів аварійного захисту за нейтронно-фізичними параметрами для АЕС із ВВЕР

Розглянуто можливості та умови застосування принципу фізичної різноманітності для сигналів за нейтронно-фізичними параметрами для АЕС із ВВЕР. Досліджено можливість застосування сигналів, які формуються від традиційних автоматизованих систем контролю нейтронного потоку (АКНП), у співставленні з сигналами нових розроблених засобів на базі системи внутрішньореакторного контролю (СВРК). На підставі аналізу експлуатаційних даних сучасних систем АКНП і СВРК реакторів ВВЕР показано переваги сигналів СВРК під час роботи на енергетичних рівнях потужності. Визначено концепції з використанням принципу фізичної різноманітності.

Ключові слова: водо-водяні енергетичні реактори, сигнали аварійного захисту, фізична різноманітність, позареакторний контроль, внутріреакторний контроль.

© В. Ф. Шикалов, А. В. Журбенко, А. С. Кужиль, Л. В. Козлова, 2010

В РНЦ «Курчатовский институт» проводятся исследования принципа физического разнообразия применительно к задаче контроля ядерной безопасности и построения систем защиты по нейтронно-физическим параметрам. Российский термин *физическое разнообразие* (диверситет) соответствует английскому термину *diversity* (разнородность, разнообразие), применяемому в иностранных проектах.

В рекомендациях МАГАТЭ сказано:

«Более высокая безотказность достигается при помощи избыточности или разнообразия. Например, возможно контролировать мощность реактора многократными каналами или разнообразными средствами, такими как измерения нейтронного потока или температуры теплоносителя или давления.

Использование разнообразности предусматривает защиту против некоторых отказов по общей причине».

Эффективность использования такого принципа очевидна и тем выше, чем больше разделены между собой основы получения информации.

Состояния активной зоны, на которые распространяется принцип физического разнообразия. Основное состояние — это работа на энергетическом уровне мощности: средняя плановая продолжительность такого состояния составляет более 90 % времени. Исходя из экономических соображений, именно на этот режим, прежде всего, следует распространять принципы избыточного контроля с применением физического разнообразия.

Отдельного рассмотрения и обоснования заслуживает вопрос вероятности ложного срабатывания. При использовании физически независимых комплектов формирования сигналов аварийной защиты вероятность ложного срабатывания увеличивается, что в свою очередь требует наличия внутри каждого комплекта отказоустойчивых, высоконадежных подсистем.

Параметры, подлежащие контролю. При работе ядерного реактора должна контролироваться интенсивность процесса деления как функция от времени. Процесс деления сопровождается выделением энергии в виде осколков деления и различных видов излучений, в том числе нейтронного. При этом именно полное число нейтронов в активной зоне реактора характеризует интенсивность процесса деления и используется в теоретических основах при построении систем контроля и защиты. Основными контролируемые нейтронно-физическими параметрами, на которые устанавливаются нормы и ограничения, являются плотность нейтронного потока, скорость нарастания плотности нейтронного потока и реактивность. При этом речь идет о параметрах, характеризующих активную зону в целом, а любые средства измерения (детектирования) имеют локальный характер. Если показать, что относительное изменение локального значения параметра или совокупности локальных значений соответствует средним по активной зоне, то задача применения принципа физического разнообразия сводится к поиску детекторов, отличающихся между собой по физической природе получения информации о полном числе нейтронов в активной зоне или средней плотности потока нейтронов (ППН). При наличии такой возможности эффект физического разнообразия может быть усилен за счет применения разнородных аппаратных, программных и конструкционных решений.

Основные принципы и особенности физически разнообразного контроля нейтронно-физических параметров. Исходя

из постановки задачи, она легко решается использованием детекторов нейтронов с различными физическими принципами получения сигнала, например нейтронных счетчиков на основе ^{10}B и ^3He или ионизационных камер на основе ^{10}B или ^{235}U . В этом случае в качестве постулируемого исходного события (ПИС) отказа по общей причине будет, например, случайное заполнение свободного пространства между активной зоной и детекторами борной кислотой. Такой пример имеется в практике. Более высокий уровень устойчивости к отказу по общей причине достигается при использовании сигналов детекторов принципиально различного размещения, например внутрореакторных детекторов (СВРК) и вне реакторных (АКНП).

На практике задача осложняется очень широким динамическим диапазоном изменения ППН. Для реакторов типа ВВЭР этот диапазон составляет более 10 порядков (10^{10}), и в его пределах можно выделить зоны контроля, сильно отличающиеся по признакам, важным для безопасного проведения работ. Физическая суть отличия может быть условно определена как «холодное» и «горячее» состояние. С точки зрения контроля нейтронно-физических характеристик, их принято называть *пусковой* диапазон и *рабочий* диапазон.

Определим, что же с точки зрения ядерной безопасности важно контролировать в каждом из этих диапазонов. Согласно НП 082-07, отличий в требованиях практически нет. По физической сути отличия принципиальные. В первом случае основные работы проходят в подкритическом состоянии активной зоны при интенсивных действиях персонала по вмешательству в процесс. Во втором случае работает преимущественно автоматика. В первом случае физические процессы описываются уравнениями кинетики, во втором — уравнениями динамики с учётом влияния многочисленных обратных связей и реакций среды на вносимые возмущения.

Средства контроля нейтронно-физических параметров. Традиционно для всех проектов АЭС с реакторами типа ВВЭР для всех состояний и режимов контроль ППН осуществляется высоконадежной системой АКНП (разработчики и производители — ЗАО «СНИИП-СИСТЕМАТОМ» [2] и ЗАО «Северодонецкое научно-производственное объединение «Импульс» [3]), построенной с использованием принципов отказоустойчивости. Детекторы нейтронного потока этой системы располагаются в специальных каналах, находящихся за корпусом реактора. При работе на энергетических уровнях мощности контроль величин и распределений ППН и энерговыделения реакторов ВВЭР осуществляется системой внутрореакторного контроля (ВРК). Современные и перспективные разработки таких систем позволяют получать все виды сигналов, аналогичных по физическому смыслу и техническим характеристикам сигналам АКНП [4]. Однако попытки привести измеряемые сигналы к единому для обеих систем нейтронно-физическому параметру, например к реактивности или средней плотности потока нейтронов, дают наблюдаемые расхождения.

Исследование одних и тех же переходных процессов по сигналам СВРК и АКНП показало их взаимное соответствие и выявило ряд особенностей.

Сопоставление показаний АКНП и СВРК. При сопоставлении были использованы следующие сигналы:

АКНП: $I(t) = \sum_{i=1}^6 PK_2$ — средний сигнал ионизационных камер (ИК) рабочего диапазона;

СУЗ: $\begin{cases} H(t) \\ \Delta H(t) \end{cases}$ — положение органов регулирования;

СВРК: $\sum_{i=1}^N I_i(t)/N$ — средний ток по всем детекторам прямого заряда (ДПЗ); N — общее число ДПЗ;

$I_j = \sum_{i=1}^{p_j} I_i(t)/p_j$ — средний ток по слоям, где j — номер слоя ($j = 1, \dots, 7$ по числу ДПЗ в сборке); p_j — число ДРЗ в слое j (равно числуборок, если все ДПЗ исправны);

$I_k = \sum_{i=1}^{m_k} I_i(t)/m_k$ — средний ток по орбитам, где k — номер орбиты ($k = 1, \dots, 7$); m_k — число ДПЗ в орбите k .

Исходные данные получены из файлов архивных записей случайных и типовых переходных процессов на АЭС с реакторами ВВЭР. Из простого сопоставления усредненных показаний выявляются систематические расхождения более чем в 20 %. Возникает естественный вопрос, какой сигнал наиболее достоверно отображает основной контролируемый параметр — полное число нейтронов в реакторах. Дальнейшим анализом было проверено логичное предположение, что совокупность внутрореакторных детекторов ППН более достоверно отображает полное число нейтронов в активной зоне.

Сигналы внутрореакторных детекторов были систематизированы и объединены по двум геометрическим признакам:

- высотному расположению (по слоям);
- радиальному расположению (по орбитам).

Принцип распределенияборок по орбитам поясняется рис. 1.

Сигналы внутрореакторных детекторов были скорректированы согласно алгоритмам коррекции инерционности [4]. Эти алгоритмы обеспечивают необходимое быстродействие. Доказательство аддитивности преобразований сигналов одиночных детекторов и их совокупностей, связанных

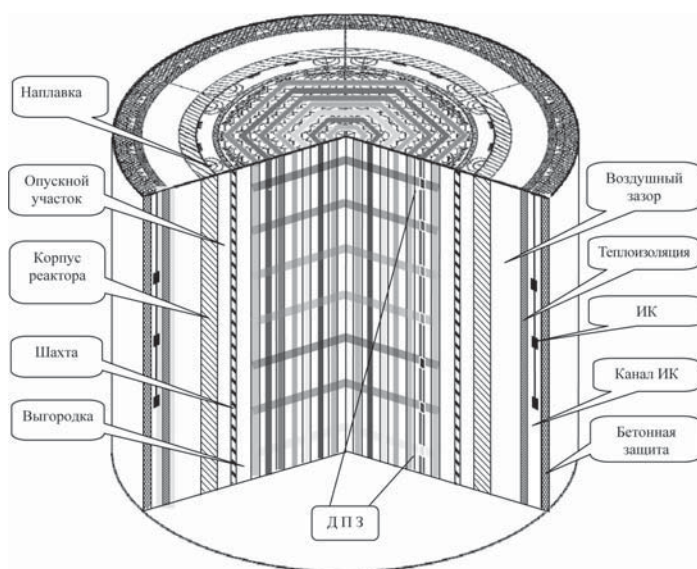


Рис. 1. Схема распределения детекторов плотности нейтронного потока в реакторе ВВЭР-1000 с тоновым обозначением орбит и слоев

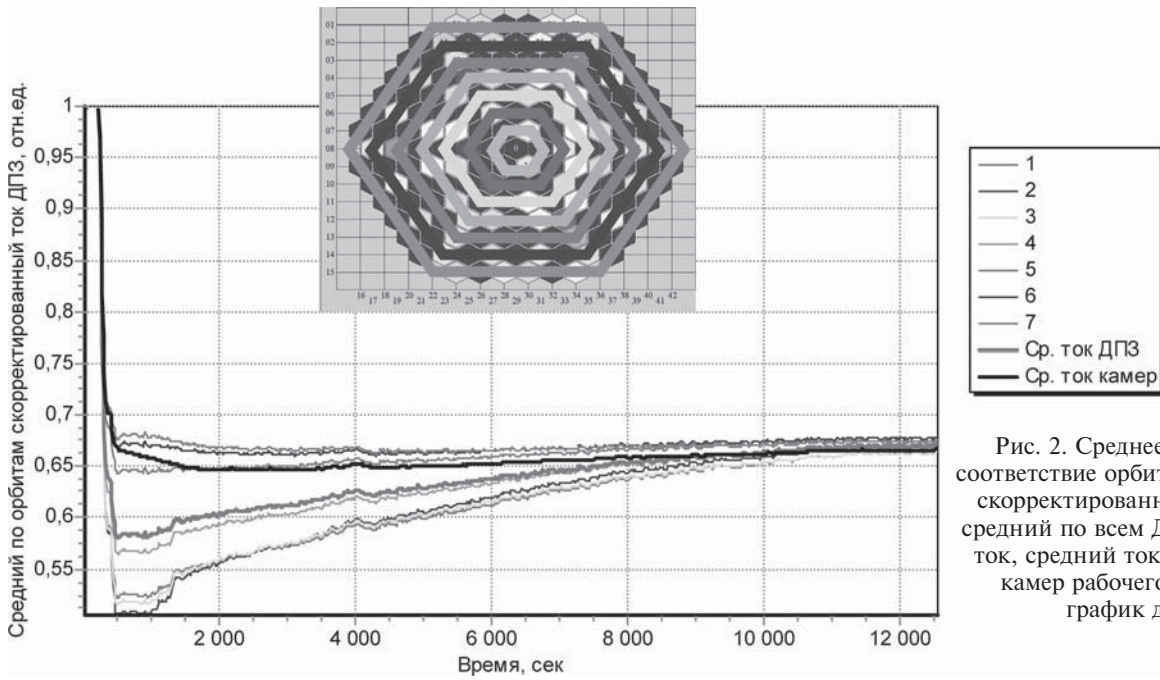


Рис. 2. Среднее по орбитам (тоновое соответствие орбит на рис. 1 и на графике), скорректированное значение тока ДПЗ, средний по всем ДПЗ скорректированный ток, средний ток шести ионизационных камер рабочего диапазона (типовой график для ВВЭР-1000)

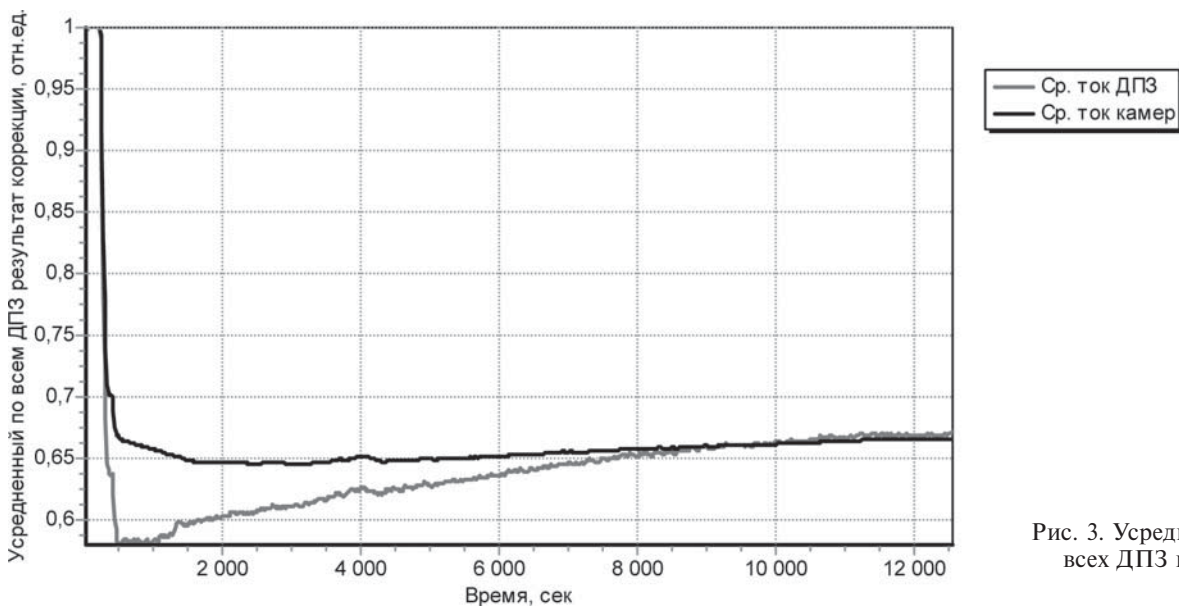


Рис. 3. Усредненные сигналы всех ДПЗ и всех ИК РД

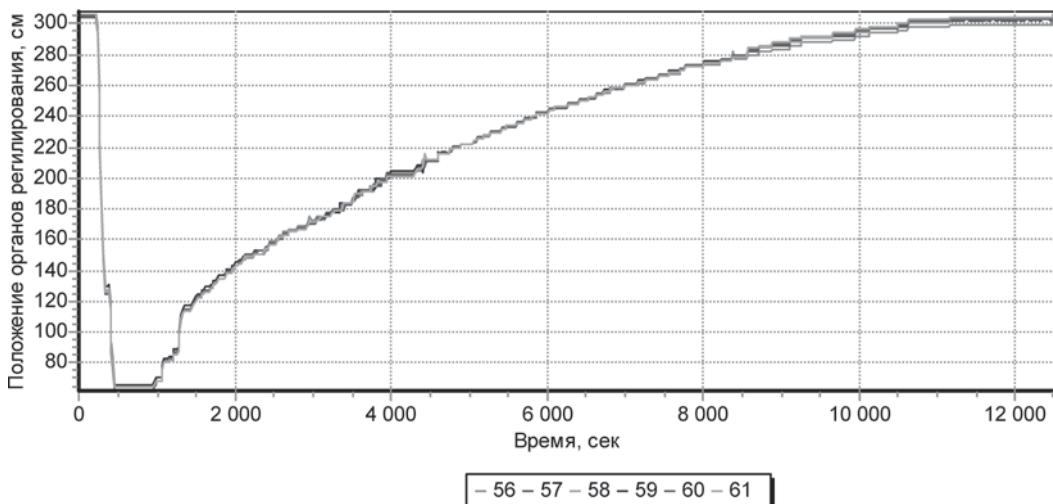


Рис. 4. Перемещение органов регулирования, 10-я группа органов регулирования (находится на 3-й от центра орбите). Типовой график для ВВЭР-1000

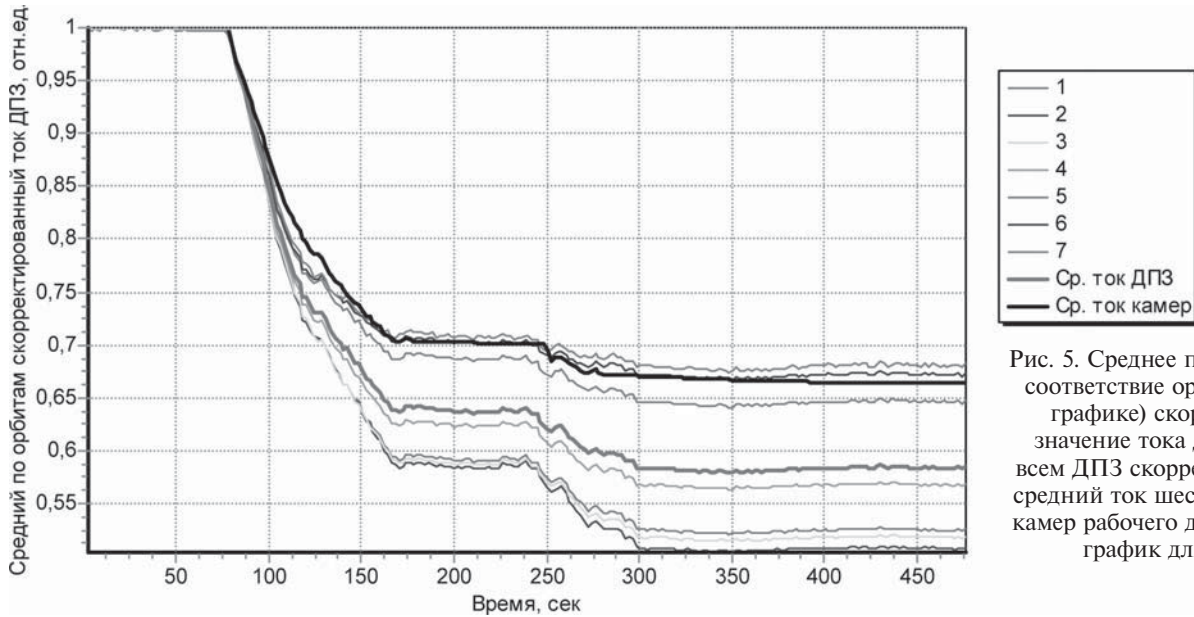


Рис. 5. Среднее по орбитам (тоновое соответствие орбит на рис. 1 и на графике) скорректированное значение тока ДПЗ, среднее по всем ДПЗ скорректированный ток, среднее ток шести ионизационных камер рабочего диапазона. Типовой график для ВВЭР-1000

Рис. 6. Перемещение органов регулирования, 10-я группа органов регулирования (типовой график для ВВЭР-1000)

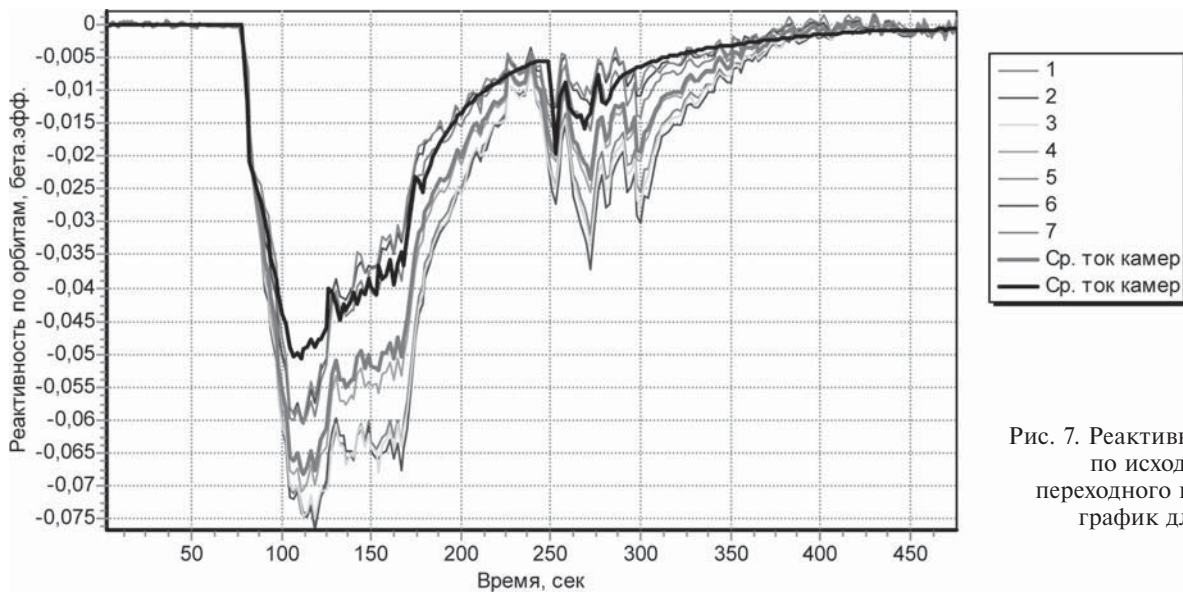
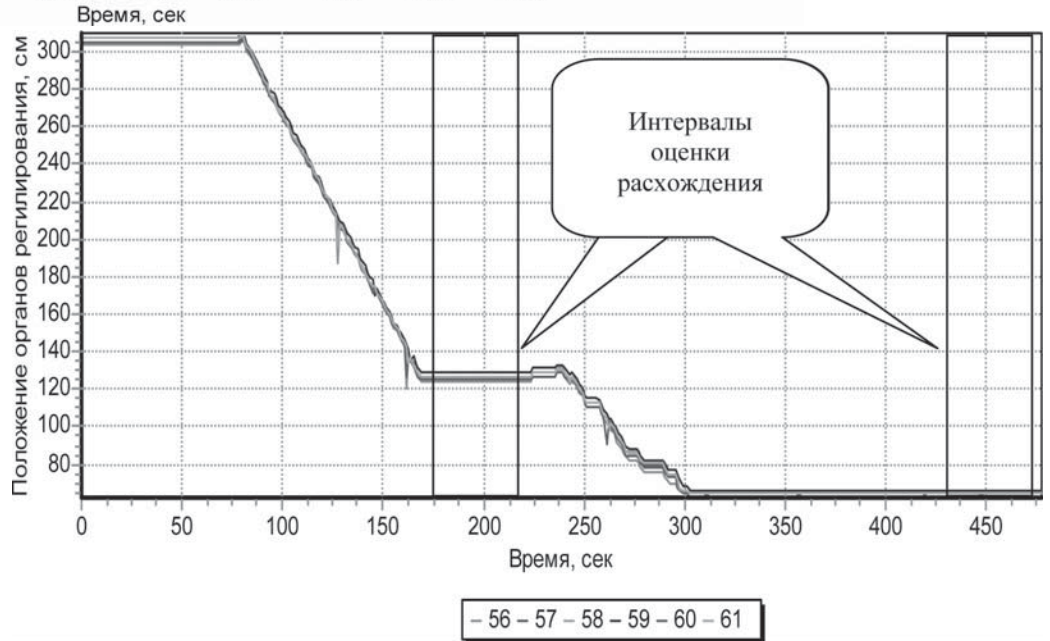


Рис. 7. Реактивности, рассчитанные по исходным данным переходного процесса (типовой график для ВВЭР-1000)

Таблица 1. Сопоставление показаний АКНП и СВРК

№ орбиты	Отличие среднего по орбите скорректированного тока ДПЗ от среднего тока ИК, [%]	Отличие среднего по орбите скорректированного тока ДПЗ от среднего скорректированного тока ДПЗ, [%]	Отличие реактивности по среднему по орбите скорректированному току ДПЗ от реактивности по среднему току ИК, [$\beta_{эфф}$]	Отличие реактивности по среднему по орбите скорректированному току ДПЗ от реактивности по среднему скорректированному току ДПЗ, [$\beta_{эфф}$]
1	-20,9	-10,0	-0,023	-0,012
2	-23,5	-13,0	-0,025	-0,013
3	-22	-11,2	-0,025	-0,013
4	-14,5	-2,7	-0,015	-0,003
5	-2,7	10,7	0	0,011
6	1,2	15,1	0,003	0,015
7	2,4	16,6	0,004	0,015

с коррекцией инерционности, непосредственно вытекает из методики коррекции и приведено в [4]. Результаты обработки конкретных массивов информации представлены на графиках (рис. 2–7) и пояснений не требуют. Наиболее существенные численные значения расхождений по контролируемому параметру приведены в табл. 1.

Из полученных результатов следует, что усредненные данные по ионизационным камерам штатной системы АКНП хорошо согласуются с аналогичными данными для ДПЗ внешних орбит активной зоны и существенно, более чем на 20 %, отличаются от данных по ДПЗ, усредненных по всей активной зоне. Аналогичные данные получены как для ВВЭР-1000, так и для ВВЭР-440.

В заключение отметим, что:

1. Зарегистрированы физические понятные отличия от среднего по активной зоне значения показаний детекторов СВРК, систематизированных по орбитам и по слоям.

2. Относительные изменения средней ППН по показаниям АКНП соответствуют относительным изменениям ППН по показаниям детекторов внешней орбиты СВРК.

3. Данные о средней ППН по АКНП значительно (более чем на 10 %) отличаются от данных СВРК, полученных по всей совокупности детекторов в активной зоне.

4. Отличие показаний групп детекторов от среднего значения ППН по активной зоне не позволяет достоверно оценить эффекты реактивности по показаниям отдельных групп детекторов. По результатам анализа полученных данных наиболее достоверными следует считать усреднен-

ные данные всех внутриреакторных детекторов $\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I_i(t)$,

где N — полное число детекторов в активной зоне. Для получения данных по реактивности еще более высокого уровня достоверности можно использовать относительные значения средней нейтронной мощности, получаемые по программам восстановления 3D нейтронных полей по данным СВРК.

Выводы

В результате проведенных исследований показаны возможности формирования с учётом требований физического разнообразия сигналов по нейтронно-физическим параметрам реакторов ВВЭР при работе на энергетическом уровне мощности.

Выявлены общие для реакторов АЭС с ВВЭР особенности отображения важных для безопасности нейтронно-физических параметров активных зон средствами внутриреакторного и внереакторного контроля.

По архивным записям различных и однотипных переходных процессов для различных АЭС, использующих современные СВРК с повышенным быстродействием, установлено, что несоответствие контролируемых нейтронно-физических параметров между данными СВРК и АКНП может составлять более 10 % по средней плотности потока нейтронов. Ещё сильнее это различие проявляется при определении реактивности. Показано, что данные СВРК имеют более высокий уровень достоверности.

Полученные результаты могут быть рекомендованы для использования при построении систем контроля нейтронно-физических параметров активных зон АЭС с ВВЭР. Особую важность полученные результаты могут иметь при построении систем с учётом принципов физического разнообразия.

Список литературы

1. Средства и управляющие системы, важные для безопасности атомных энергетических станций. Руководство по безопасности № NS-G-1.3. — Вена: МАГАТЭ, 2000.
2. Гусаров А. М. Современное построение аппаратуры контроля нейтронного потока ЗАО «СНИИП-СИСТЕМАТОМ» // Системы ядерной и радиационной безопасности: презент. диск ЗАО «СНИИП-СИСТЕМАТОМ».
3. Елисеев В. В. Работы Северодонецкого НПО «ИМПУЛЬС» по автоматизации АЭС с ВВЭР / В. В. Елисеев, В. А. Ларгин, Г. Ю. Пивоваров, В. И. Ященко // Ядерная и радиационная безопасность. — 2005.
4. Бурьян В. И. Математическая модель родиевых ДПЗ и алгоритмы коррекции их инерционности / В. И. Бурьян, Л. В. Козлова, А. С. Кужиль, В. Ф. Шикалов // Ядерные измерительно-информационные технологии. — 2005. — 1 (13).

Надійшла до редакції 11.06.2010.