

Определение интегральной мощности активной зоны ВВЭР-1000 по показаниям БИК и температурным датчикам СВРК

Выговский С.Б., Семенов А.А., Рябов Н.О., Соловьев Д.А., Сидорова С.И.

Существует серьезная проблема рассогласования между значениями интегральной нейтронной мощности, регистрируемой по показаниям БИК, и реальной тепловой мощности активной зоны, особенно в быстрых переходных режимах. Для решения этой проблемы разработаны специальные системы автоматического контроля энерговыделения в активной зоне АКЭ и АЛЗ. Используемые в данных системах в настоящее время алгоритмы не обладают достаточной точностью воспроизведения интегральной и локальной мощностей. Для устранения этих недостатков предлагается дополнительно использовать показания температурных датчиков СВРК. Это позволит в несколько раз повысить точность определения интегральной и локальных мощностей установки.

Актуальность систем АКЭ и АЛЗ связана с тем, что оперативный контроль над мощностью активной зоны по сигналам боковых ионизационных камер (БИК) не обладает достаточной достоверностью в быстрых переходных режимах (< 20 сек). Дело в том, что показания БИК пропорциональны числу нейтронов деления в ближайших к ним тепловыделяющих сборках (ТВС) и не дают реального представления о полной мощности активной зоны. Возникающая при этом ошибка в определении мощности установки до настоящего времени компенсировалась путем перенормировки показаний БИК по уровню мощности, получаемому из результатов обработки данных, взятых из системы внутриреакторного контроля (СВРК). Однако такой подход не обладает необходимой оперативностью (раз в 20 сек) как раз в тех ситуациях, когда мощность изменяется при быстром изменении положения органов СУЗ (например, разгрузка энергоблока до 40%-70% от номинальной мощности). Указанные обстоятельства сделали необходимым совершенствование алгоритма оценки мощности и привели к созданию системы АКЭ.

Другим важным обстоятельством является необходимость оперативного контроля над максимальной локальной мощностью в активной зоне, что связано с работой РУ на мощности при различных отказах в работе ОР СУЗ. К примеру, при падении отдельного ОР СУЗ происходит заметный радиальный и азимутальный перекося в распределении энерговыделения по объему активной зоны, и локальная мощность может превысить допустимую для нормальной эксплуатации величину и привести к нежелательному перегреву оболочки тепловыделяющего элемента ($>350^{\circ}\text{C}$). Особенно актуальным это становится для современных загрузок топлива, в которых невыгоревшее топливо размещено в центре активной зоны. Использование только показаний БИК для оценки изменения локальной мощности, особенно в центре зоны, невозможно, так как ни одна из БИК не регистрирует этого изменения. Более того, падение одного из органов в периферийной управляющей группе ОР СУЗ может приводить к заметному увеличению локальной мощности в центре активной зоны при регистрации уменьшения суммарной мощности по БИК, что дезориентирует оперативный персонал на станции. Это сделало необходимым создание алгоритма оперативной оценки максимальной локальной мощности в активной зоне, и привело к созданию системы АЛЗ.

Основные функции АКЭ:

1. АКЭ используется для оперативного контроля формы среднего аксиального энергораспределения, его основных характеристик (коэффициента неравномерности k_z и аксиального офсета), мощности реактора и ее азимутального распределения.
2. Значения измеряемых АКЭ характеристик используются для коррекции значения мощности, измеряемой АКНП, для формирования сигналов защиты по превышению допустимых значений локальных параметров, для оценочных расчетов характеристик объемного энергораспределения, для управления энергораспределением в активной зоне реактора.
3. Количество каналов АКЭ соответствует количеству каналов АКНП. В своей работе канал АКЭ использует сигналы детекторов энергодиапазона соответствующего канала АКНП,

значение температуры на входе в реактор ближайшей к каналу циркуляционной петли и положение групп органов регулирования.

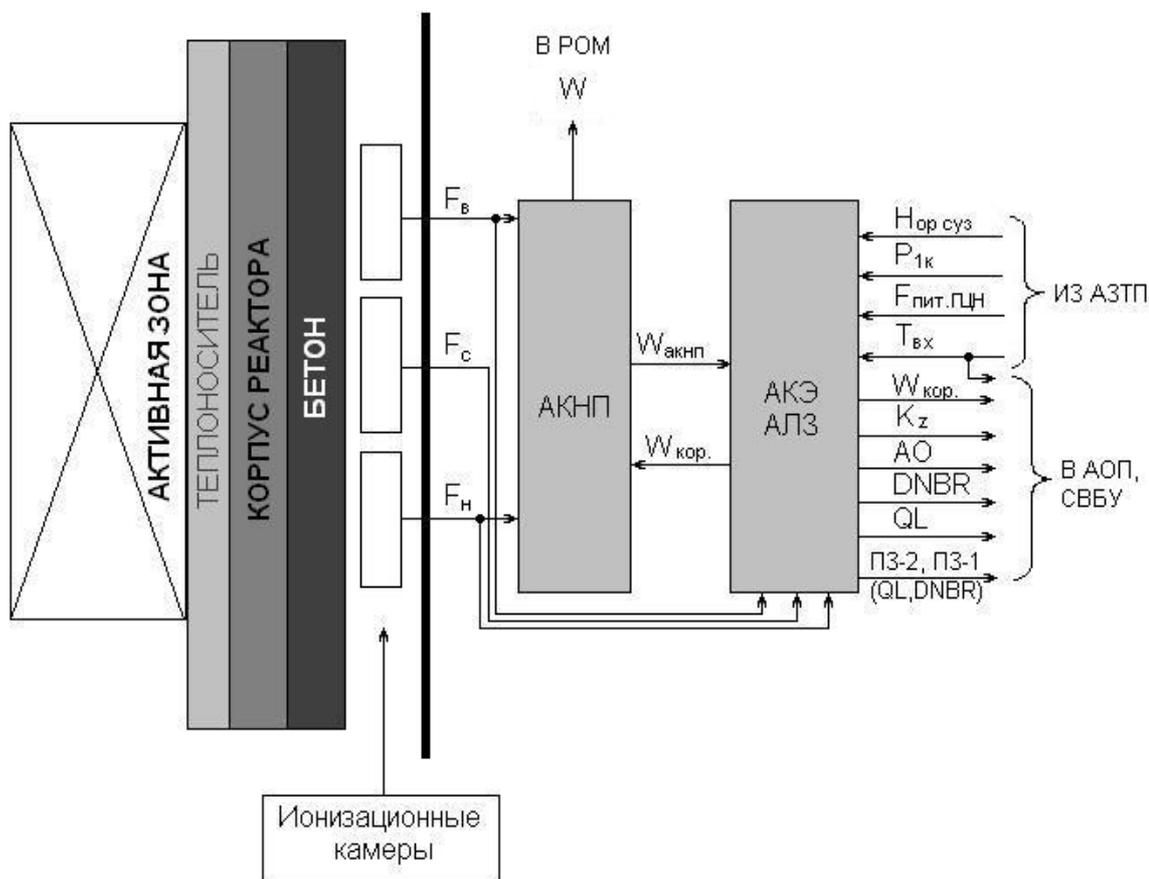
4. Обработка информации в каждом канале производится по единому алгоритму, включающему в себя:

- восстановление высотного распределения плотности потока быстрых нейтронов на внешней поверхности корпуса реактора по показаниям вне реакторных датчиков;
- расчет среднего аксиального энергораспределения с использованием априорных коэффициентов, описывающих связь среднего энергораспределения с энергораспределением в периферийных ТВС;
- расчет аксиального коэффициента неравномерности k_z и аксиального офсета;
- вычисление мощности реактора как интеграла среднего высотного энергораспределения с учетом заранее рассчитанных поправочных коэффициентов, учитывающих изменение утечки нейтронов из реактора за счет изменения температуры теплоносителя в опускном участке и изменение положения групп ОР.

Основные функции АЛЗ:

- формирование сигналов предупредительной защиты ПЗ-1, ПЗ-2 при превышении вычисленного значения QL (отношение допустимой максимальной линейной тепловой нагрузки к действительной максимальной линейной тепловой нагрузке);
- формирование сигналов предупредительной защиты ПЗ-1, ПЗ-2 при превышении вычисленного значения DNBR (запас до кризиса теплообмена).

Структурная схема АКЭ и АЛЗ



Недостатки существующей системы и опыт ее эксплуатации

Система АКЭ и АЛЗ вычисляет мощность реактора и максимальную линейную нагрузку на основании показаний 3-х ионизационных камер, расположенных на разной высоте, положений органов СУЗ и температуры теплоносителя на опускных участках. Дополнительным результатом работы алгоритма является вычисление высотного профиля энергораспределения в активной зоне.

При построении системы АКЭ был сделан ряд предположений.

- высотный профиль энергораспределения одинаков во всех кассетах;
- высотный профиль можно описать в виде линейной комбинации 3х базисных функций, которые могут быть представлены как линейные комбинации $\sin(w x)$, при не очень больших w (до пятой гармоники по высоте);
- все возможные реализации радиального распределения можно интерполировать по положению 3х рабочих групп СУЗ.

Результаты численного моделирования поля энерговыделения с использованием трехмерного кода показали, что эти предположения могут приводить к ошибкам в определении локальной мощности в активной зоне порядка 80%. Опыт эксплуатации системы подтвердил эти выводы.

Коррекция мощности в существующей системе производится в пределах не более $|N_{\text{АКЭ}} - N_{\text{АКНП}}| < 8\%$ от $N_{\text{АКНП}}$. Данное ограничение делает невозможным использовать АКЭ при разгрузке блока до 50% - 40% от номинальной мощности. В этом случае отклонение мощности по АКНП от реальной мощности может достигать величины $> 8\%$, в то время как коррекция очень важна именно для этих случаев для правильной оценки тепловой мощности реактора, чтобы предотвратить попадание турбины в нежелательный тепловой режим. Поэтому актуальным становится обеспечение коррекции мощности по БИК именно тогда, когда разница между значением мощности по АКНП и реальным значением становится выше 8%.

Опыт эксплуатации систем АКЭ и АЛЗ невелик. На 3-ем блоке Калининской АЭС данные системы выключены. Это произошло в результате большого количества вопросов у работников АЭС по её работе к Разработчику, на которые до сих пор не получены ответы, и пока нет уверенности в надежности работы систем АКЭ и АЛЗ.

Предложения по совершенствованию системы

Предлагается в системе АКЭ перейти к комбинированному способу работы алгоритма.

На первом этапе, также как в системе АКЭ, алгоритм в режиме «off-line» получает возможные формы распределения энерговыделения для данного состояния блока, но не только по показаниям ДПЗ, а с дополнительным использованием трехмерной математической модели активной зоны и показаний термопар, установленных на выходе из активной зоны. Это позволит учесть значительные перемещения СУЗ, которые встречаются в практике эксплуатации и плохо описываются инерционными датчиками ДПЗ.

На втором этапе вместо декомпозиции нейтронного поля на произведение высотной и радиальной составляющей, предлагается использовать хорошо апробированные методы построения трехмерного базиса функций, оптимального для представления пространственного энергораспределения в зависимости от положения ОР СУЗ в активной зоне, совместно с методами построения нелинейных регрессионных зависимостей.

Для тестирования предлагаемой модификации системы АКЭ использовался программный комплекс «ПРОСТОР», являющийся ядром математических моделей полномасштабного тренажера 3-го энергоблока Калининской АЭС и тренажера оборудования и систем АСУТП 2-го энергоблока Ростовской АЭС. В результате тестирования было получено, что методическая ошибка такого подхода при расчете локальной мощности имеет максимальную величину около 15%. Причем такая ошибка наблюдается в области расположения СУЗ, а в кассетах с максимальной локальной мощностью в активной зоне она значительно меньше и составляет величину, не превышающую 5%.

Показания БИК позволяют восстановить высотный профиль энерговыделения и

информацию о энерговыделении в двух граничных слоях ТВС. Дополнительное использование показаний реакторных термопар позволит получить информацию о радиальном распределении мощности в активной зоне, и, как наиболее ценную ее часть, недоступную для БИК, информацию о энерговыделении в центральной части активной зоны. Ниже приведена Таблица 1, демонстрирующая необходимость учета показаний реакторных термопар в модели, восстанавливающей мощность активной зоны по показаниям БИК и по показаниям БИК совместно с реакторными термопарами.

Таблица 1 Оценка погрешности воспроизведения интегральной мощности реактора для 1 кампании 3 блока Калининской АЭС

Величина в %	СКО	Среднее отклонение	Максимальное отклонение
Только БИК	0.62	0.62	6.00
БИК + реакторные термопары	0.016	0.019	0.14

В качестве еще одного примера иллюстрирующего эффективность предлагаемой методики был рассмотрен процесс быстрой разгрузки блока 9 группой со 100 % мощности на начало 1-ой кампании 3 блока Калининской АЭС. Результаты обработки процесса приведены в Таблица 2.

Таблица 2 Оценка погрешности воспроизведения мощности реактора при УРБ 9 группой на начало 1-ой кампании 3 блока Калининской АЭС

Величина в %	СКО	Среднее отклонение	Максимальное отклонение
Только БИК	4.2	12.7	50.5
БИК + реакторные термопары	0.23	0.13	2.4

Видно, что погрешность воспроизведения интегральной мощности реактора только по БИК более чем в десять раз выше, чем для алгоритма, использующего дополнительно показания реакторных термопар СВРК.