

УДК 621.039.56:681.323

Система оперативного контроля полей энерговыделения реакторов Белоярской АЭС

КУЛИКОВ Н. Я., СНИТКО Э. И., РАСПУТНИС А. М., СОЛОДОВ В. П.

В настоящее время в связи с широким развитием ядерной энергетики системы контроля активной зоны реактора получают все большее распространение, так как позволяют обеспечить наиболее экономичную и безопасную эксплуатацию ядерно-энергетических установок (ЯЭУ) [1]. Ранее [2, 3] уже описывались системы внутриреакторного контроля реакторов (ВРК) канального типа.

На втором блоке Белоярской АЭС (БАЭС) находится в эксплуатации система ВРК [3], использующая в качестве датчиков эмиссионные датчики прямой зарядки (ДПЗ) [4], а в качестве вторичной аппаратуры для замера и регистрации токов ДПЗ — электронный автоматический потенциометр типа ЭПП-09МЗ с усилителем и коммутатором.

На первом блоке БАЭС для измерения токов ДПЗ использовался микроамперметр Ф116 с коммутатором на тумблерах. Нормально ДПЗ через коммутатор закорочен на общую шину, а в режиме измерения он отсоединяется от земли и коммутируется на вход вторичной аппаратуры для измерения и регистрации. Такая система не обладала оперативностью, необходимой для ЯЭУ, и поэтому была модернизирована с целью создать оперативный контроль полей энерговыделения обоих реакторов БАЭС.

Чтобы обеспечить необходимую оперативность, обработку показаний ДПЗ было решено проводить на информационно-вычислительной системе (ИВС) «Карат» на базе ЭВМ, находящейся в эксплуатации на втором блоке БАЭС [5]. При этом датчики ДПЗ первого и второго блоков были состыкованы с ЭВМ, что позволило проводить всю необходимую обработку и расчеты на ЭВМ в соответствии с заданным алгоритмом. Результаты обработки поступают на цифропечатающее устройство (ЦПУ), а сигналы отклонений — на мнемотабло реакторов первого и второго блоков. Система обеспечивает возможность подключения до 100 датчиков ДПЗ по каждому блоку и выполняет следующие функции:

— регистрацию и выдачу на печать токов всех ДПЗ с учетом тарировочного коэффициента;

— расчет и выдачу на печать среднего тока всех действующих ДПЗ и среднего тока по группам;

— выдачу на печать токов всех ДПЗ в реперном поле, для которого выполнен комплекс теплофизических расчетов на внешней ЭВМ;

— расчет отклонений токов ДПЗ (ΔI_i) от реперных значений по соотношению

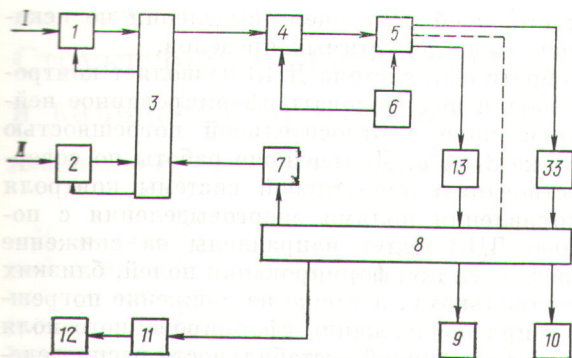
$$\Delta I_i = \left(\frac{I_i}{I_i^0} \frac{\bar{I}^0}{\bar{I}} - 1 \right) 100\%,$$

где I_i — ток i -го ДПЗ, мкА; \bar{I} — средний ток всех действующих ДПЗ, мкА; I_i^0 — реперное значение тока i -го ДПЗ (при нейтронном поле, близком к оптимальному), мкА; \bar{I}^0 — среднее значение тока всех действующих ДПЗ для реперного нейтронного поля, мкА;

— печать ΔI для всех ДПЗ при одновременном сравнении с уставкой («больше» — «меньше»), хранящейся в памяти ЭВМ и при необходимости изменяемой оператором. Отклонения выше уставки печатаются на картограмме красным цветом с соответствующим знаком (плюс или минус);

— выдачу сигналов отклонений (ΔI_i), превышающих уставку, на мнемотабло реактора.

Структурная схема системы приведена на рисунке. Сигналы ДПЗ первого и второго реакторов, объединенные в группы с максимальным числом датчиков (20) в каждой, поступают на входы блоков коммутации и далее через блок связи подаются для усиления на входной блок. В выходном блоке расположены запоминающие ячейки, с выхода которых сигналы поступают на нормирующие преобразователи; унифицированный токовый сигнал 0—5 мА вводится далее в ЭВМ для обработки. После обработки по алгоритму результаты поступают на цифропечатающее устройство и мнемотабло первого (через блок стыковки) и второго реакторов станции. Номера реактора и группы датчиков поступают из ЭВМ на блок управления, который производит необходимые переключения в блоках коммутации и связи. Адресный блок обеспечивает синхронную коммутацию каналов во входном и выходном блоках внутри выбранной группы датчиков. Для конт-



Структурная схема системы оперативного контроля полей энерговыделения реакторов БАЭС:

1, 2 — блоки коммутации; 3 — блок связи; 4, 5 — входной и выходной блоки; 6 — адресный блок; 7 — блок управления; 8 — информационно-вычислительная система «Карат»; 9, 10 — мнемотабло и цифрорпечатающее устройство системы «Карат»; 11 — блок стыковки с мнемотабло реактора первого блока; 12 — мнемотабло реактора первого блока; 13—33 — нормирующие преобразователи; I, II — линии связи от датчиков ДПЗ первого и второго блоков

роля усилительного тракта, общего для всей системы, на его вход подается эталонный сигнал, который после усиления анализируется в ЭВМ.

Программа, расположенная в памяти ЭВМ, состоит из трех частей. Программа сбора информации и контроля ДПЗ ведет сбор информации с ДПЗ и заполняет соответствующие массивы памяти в ЭВМ; она же осуществляет контроль исправности ДПЗ и контроль исправности и погрешности общего усилительного тракта. Программа обработки ведет обработку тока ДПЗ в соответствии с алгоритмом, а также обеспечивает выдачу сигналов отклонений на мнемотабло реакторов первого и второго блоков. Программа печати по запросу оператора печатает на ЦПУ результаты обработки токов ДПЗ.

Исправность ДПЗ проверяется сравнением с нулем и со средним током ДПЗ по реактору. ЭВМ отбраковывает датчики с показаниями меньше 2% и датчики, показания которых отличаются от среднего тока более чем на $\pm 30\%$. Как указывалось в работе [3], большинство ДПЗ в реакторе второго блока (72 шт.) установлены в центральные отверстия пароперегревательных каналов (ППК) и, несмотря на высокую рабочую температуру (до 750°C), оказались надежными в эксплуатации.

Часть ДПЗ (до 20 шт.) установлена в испарительные каналы (ИК) на периферии реактора, где ППК нет, но находится до 50% каналов. Эти ДПЗ оказались менее надежными, так как находились в контуре высокого давления и тре-

бовали специального уплотнения в ИК. Кроме того, они работали в условиях значительных вибраций в опускных трубках, по которым теплоноситель подается для охлаждения твэлов со скоростью 5—10 м/с. Кроме того, ДПЗ в ИК требовали дополнительной тарировки, т. е. привязки к показаниям ДПЗ в ППК. Учитывая все эти трудности, систему ДПЗ второго блока модернизировали, для чего 14 ППК в 1973—1974 гг. были переставлены с края зоны ППК в зону ИК на периферию реактора и в них установлены ДПЗ. Подключение взаимно переставленных ППК и ИК к прежним трубопроводам, по которым подается и отводится теплоноситель, было осуществлено специальными фигурными калачами. Унификация системы ДПЗ, установленных только в ППК, позволила значительно упростить систему контроля полей энерговыделения и увеличить ее надежность. Вопрос о перестановке каналов ППК в зону ИК для первого блока находится в стадии проработки.

Все ДПЗ в реакторе второго блока разбиты на пять групп (до 20 в каждой). Порядок расстановки ДПЗ в реакторе в каждой группе и измерения их токов выбран следующим образом. В первой и третьей группах ДПЗ расставлены по двум взаимно перпендикулярным диаметрам. ДПЗ во второй, четвертой и пятой группах расположены по кольцам в плане реактора с радиусами соответственно 1,9; 2,5 и 3,0 м от центра реактора. Получая средний ток ДПЗ по реактору и по группам, а также максимальное и минимальное значения токов ДПЗ в каждой группе, можно оперативно охарактеризовать неравномерность и симметричность поля энерговыделения по кольцам трех групп (второй, четвертой и пятой) и его выравнивание по двум диаметрам в зоне ППК (первая и третья группы).

В реакторе первого блока ДПЗ разбиты на четыре группы (до 20 в каждой). В трех группах ДПЗ расположены по кольцам в плане реактора с радиусами соответственно 1,8; 2,4 и 3,1 м и в одной группе равномерно в центральной области реактора в испарительных каналах.

Для оперативного измерения абсолютной или относительной мощности реактора и быстрого определения ее изменения можно пользоваться средним током ДПЗ, равномерно расставленных по активной зоне реактора, сумма токов которых характеризует с хорошей точностью суммарную мощность всех топливных каналов (ГК).

Согласно метрологическим характеристикам ДПЗ их нелинейность составляет 0,5—1,0%.

Суммарная мощность ТК на уровнях мощности реактора 5—100% $N_{\text{ном}}$ определяется с погрешностью 1,0—1,5%, если средний ток ДПЗ на номинальной мощности будет оттарирован с необходимой точностью. По опыту эксплуатации второго реактора БАЭС это достигнуто многократным измерением теплового баланса реактора различными теплотехническими методами при одновременном измерении среднего тока ДПЗ. Тогда

$$\Delta N_p = K_A (\bar{I}_2 - \bar{I}_1),$$

где ΔN_p — изменение мощности реактора, МВт; \bar{I}_1, \bar{I}_2 — средние токи ДПЗ в реперном и новом полях, мкА; K_A — тарировочный коэффициент, усредненный на основании многократных измерений номинальной тепловой мощности реактора различными методами, МВт/мкА.

$$K_A = \frac{1}{n} \sum_n \left(\frac{Q_{\text{ном}}}{\bar{I}_{\text{ном}}} \right)_n,$$

где $Q_{\text{ном}}$ — номинальная тепловая мощность реактора, МВт; $\bar{I}_{\text{ном}}$ — средний ток ДПЗ в момент определения номинальной тепловой мощности, мкА; n — число измерений.

Величины N_p , ΔN_p , N_p (% $N_{\text{ном}}$) и $\Delta N\%$ рассчитываются на ЭВМ (по отношению среднего тока ДПЗ реактора в данный момент времени и на номинальной мощности).

До внедрения ДПЗ в практику контроля и управления полями энерговыделения на БАЭС использовались расчетный и «стержневой» методы [6], погрешность которых в настоящее время значительно увеличилась вследствие больших выгораний горючего в ТК и выгораний материала-поглотителя в стержнях регулирования. Поэтому использование ДПЗ в дополнение к этим методам позволило снизить погрешность расчета мощностей всех ТК в реакторе второго блока на 5—6% и несколько увеличить мощность блока.

Если в последние два-три года устойчивая максимальная тепловая мощность второго реактора составляла 480—500 МВт, то в результате комплекса мероприятий она была повышена в апреле 1975 г. до 530 МВт. При этом внедрение оперативной системы ДПЗ имело существенное значение, тем более что после достижения максимальной мощности нейтронное поле в реакторе должно поддерживаться с таким условием, чтобы в процессе выгорания топлива от перегрузки до перегрузки и извлечения регулирую-

щих стержней поле энерговыделения не искажилось выше допустимых пределов.

Оперативная система ДПЗ позволяет контролировать и поддерживать сформированное нейтронное поле с относительной погрешностью не хуже 3—4%. Дальнейшие системы контроля и управления полями энерговыделения с помощью ДПЗ будут направлены на снижение погрешности при формировании полей, близких к оптимальному, а также на снижение погрешности при поддержании сформированного поля с учетом возможной нестабильности распределения нейтронов, обусловленной дальнейшим повышением выгорания топлива и переходом на (ТК) с несколько большим относительным количеством теплоносителя.

В настоящее время ведутся также работы по дальнейшему развитию системы и ее алгоритмов, чтобы выполнить более сложные физические расчеты по определению допустимой и предельной мощности ТК, рассчитать надежность аппарата, выдать рекомендации оператору по перемещению стержней СУЗ в целях поддержания оптимального нейтронного поля. При этом наиболее сложные физические расчеты предполагается проводить на общестанционной ЭВМ, для чего информационно-вычислительная система второго блока [5] будет иметь с ней необходимые связи. Это позволит поддерживать максимальную располагаемую мощность блока с учетом необходимых запасов до предельных энергетических нагрузок во всех ТК. Создание и испытание такой системы позволит также накопить опыт, который может быть использован для разработки автоматизированных систем контроля и управления другими АЭС.

Поступила в Редакцию 13/V 1975 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Емельянов И. Я., Константинов Л. В., Постников В. В. «Атомная энергия», 1971, т. 30, вып. 3, с. 275.
- Емельянов И. Я. и др. In: Proc. IAEA Symp. «Nuclear Power Plant Control and Instrumentation—1973». Prague, 22—26 Jan. 1973, p. 683.
- Дубовский Б. Г. и др. «Атомная энергия», 1974, т. 36, вып. 3, с. 171.
- Бабулевич Е. Н. и др. «Атомная энергия», 1971, т. 31, вып. 5, с. 465.
- Малютин Ю. М., Куликов Н. Я. «Теплоэнергетика», 1972, № 8, с. 35.
- Емельянов И. Я. и др. «Атомная энергия», 1971, т. 30, вып. 5, с. 422.