

Система контроля за распределением энерговыделения в реакторе РБМК

И. Я. ЕМЕЛЬЯНОВ, Л. В. КОНСТАНТИНОВ, В. В. ПОСТНИКОВ, В. К. ДЕНИСОВ,
В. Я. ГУРОВИЧ

УДК 621.039.564

Знание распределения энерговыделения в ядерном реакторе — необходимое условие экономически эффективной и безопасной эксплуатации энергонапряженной ядерной установки. В настоящее время эта задача решается в большинстве случаев с помощью датчиков, дискретно размещенных в активной зоне [1]. Обработка сигналов от датчиков с помощью специальных информационно-вычислительных устройств позволяет достаточно оперативно контролировать запас до критической тепловой нагрузки каждого топливного канала и благодаря этому оптимизировать поля энерговыделения для повышения мощности, теплотехнической надежности реактора, а также средней интегральной энерговыработки загрузки.

Назначение системы контроля за распределением энерговыделения в реакторе РБМК (СКРЭ) — измерения потоков радиоактивных излучений, характеризующих энерговыделение в реакторе.

Первично обработав поступающие от датчиков контроля за распределением энерговыделения сигналы, сравнив их затем с заданными предельными (оптимальными) величинами, СКРЭ выдает оператору рекомендации для формирования поля энерговыделения. Оптимальные уставки для внутриреакторных датчиков рассчитываются на внешней ЭВМ.

Для дополнительной корректировки поля энерговыделения с учетом проводимых на реакторе работ предусмотрена связь СКРЭ с информационно-вычислительной машиной, обеспечивающей периодический расчет энерговыделения каждого топливного канала.

Описание системы

СКРЭ — единый комплекс приборов и устройств, позволяющих оперативно контролировать распределение энерговыделения. Она

включает в себя следующие основные части: датчик контроля энерговыделения по радиусу реактора; датчик контроля энерговыделения по высоте; градуировочный датчик контроля энерговыделения; вспомогательную систему для измерения наведенной активности в стальных тросах и активности извлекаемых из реактора тепловыделяющих сборок (ТВС); вторичную часть системы; систему сигнализации.

Для оценки основных метрологических характеристик СКРЭ, получения некоторых зависимостей величины сигнала датчика от выгорания горючего в ТВС, положения стержней СУЗ и т. д. в реакторе предусмотрена возможность измерения мощности 60 реперных технологических каналов, снабженных датчиками паросодержания, расходомерами и температурными датчиками.

Для контроля за распределением энерговыделения специально предусмотрена установка 153 ТВС с подвесками под градуировочный датчик контроля, куда могут быть помещены миниатюрная камера деления во время физических экспериментов и градуировочный датчик (γ -камера) в период остановок реактора. Данные о распределении нейтронов в первом и остаточного тепловыделения во втором случаях используются для определения основных метрологических характеристик системы и коэффициентов для расчета мощности каналов.

Датчик контроля энерговыделения по радиусу реактора. В основе используемого в СКРЭ метода контроля за распределением энерговыделения в реакторе лежит метод так называемого физического контроля (измерения потоков радиоактивных излучений, связанных с энерговыделением известными соотношениями).

В качестве основного параметра в СКРЭ измеряется плотность нейтронов. Для контроля за

распределением плотности нейтронов по радиусу реактора используется 117 β -эмиссионных нейтронных датчиков, равномерно размещаемых в активной зоне реактора.

Датчик контроля энерговыделения (ДКЭ) устанавливается в центральное отверстие ТВС. Он состоит из трех основных частей: чувствительного элемента из кабеля-датчика, предохранительной гильзы с головкой и линии связи из высокотемпературного кабеля с магнезиальной изоляцией. Кабель-датчик представляет собой высокотемпературный кабель диаметром 3 мм с магнезиальной изоляцией, центральной жилой из серебра и наружной оболочкой из нержавеющей стали. Длина чувствительной части датчика равна высоте активной зоны реактора. Наружный диаметр предохранительной гильзы из нержавеющей стали 6 мм.

Принцип действия ДКЭ заключается в следующем. При облучении серебра (эмиттера) нейтронами образуются радиоактивные изотопы серебра. При их распаде из эмиттера вылетают β -частицы высоких энергий, в результате чего он заряжается положительно. Ток короткого замыкания с эмиттера на коллектор (оболочка кабеля) пропорционален плотности нейтронов.

Измеряемый ток датчиков колеблется в зависимости от их расположения в активной зоне от 3 до 10 мкА.

Датчик заменяется с помощью подъемного крана центрального зала. Прокладка кабельной трассы производится при монтаже реактора. Сам кабель трассы аналогичен кабелю-датчику, но его центральная жила выполнена из нержавеющей стали. При прокладке трасс приняты специальные меры по обеспечению помехоустойчивости.

Датчик контроля энерговыделения по высоте реактора. Для контроля за распределением плотности нейтронов по высоте реактора используется 12 семисекционных β -эмиссионных нейтронных датчиков. Они расположены равномерно в центральной (по радиусу) части реактора вблизи специальных стержней СУЗ, предназначенных для корректировки поля энерговыделения по высоте.

Датчик энерговыделения по высоте представляет собой полую гильзу из алюминиевого сплава диаметром 70 мм и толщиной 2 мм. Внутри гильзы на равном расстоянии друг от друга размещено семь элементарных β -эмиссионных нейтронных датчиков (секций). Центры нижней и верхней секций смещены относительно границ активной зоны к центру на 500 мм. Чувствительный элемент каждой секции выпол-

нен в виде спирали диаметром 62 мм и высотой 115 мм; общая длина кабеля с серебряной жилой в каждом чувствительном элементе 7000 мм. Сигнал от чувствительного элемента с помощью высокотемпературного магнезиального кабеля со стальной центральной жилой выводится к верхней части датчика. Вся конструкция поддерживается специальной центральной трубкой, служащей одновременно для установки в реактор троса для активации.

Сигнал от отдельных секций датчика в зависимости от их расположения в активной зоне может изменяться от 3 до 10 мкА.

При прокладке кабельных линий приняты специальные меры по обеспечению помехоустойчивости.

Вторичная часть системы выполняется в виде отдельных функциональных блоков. По своему назначению и исполнению она может быть разделена на две части — вторичную часть системы контроля за распределением энерговыделения по радиусу реактора и вторичную часть системы контроля за распределением энерговыделения по высоте реактора.

Вторичная часть системы контроля за распределением энерговыделения по радиусу реактора. Приборная часть системы обеспечивает обработку сигналов, поступающих от 117 датчиков. В системе используется принцип последовательного опроса датчиков, что позволяет многократно применять общие узлы и однородно обрабатывать данные для каждой точки контроля и, следовательно, повышает точность и упрощает эксплуатацию системы.

Сигналы от датчиков через обтекающее устройство поступают в нормирующее устройство, где сигнал каждого опрашиваемого датчика делится (нормируется) на суммарный ток всех датчиков, пропорциональный средней мощности реактора. Нормирование обеспечивает постоянную чувствительность системы на всех уровнях мощности, исключает необходимость изменения опорных сигналов (уставок) заданного распределения энерговыделения в зависимости от уровня мощности реактора, значительно снижает влияние на работу системы запаздывания, имеющего место в β -эмиссионных датчиках при переходных процессах.

С выхода нормирующего преобразователя сигнал поступает в устройство обнаружения отклонения, где сопоставляется с опорным сигналом, величина которого устанавливается с помощью датчика опорных сигналов и индиферентных датчиков уставок.

В датчике опорных сигналов предусматривается возможность плавно изменять величину всех опорных сигналов одновременно на $\pm 12\%$, что позволяет оператору судить о степени приближения распределения энерговыделения к заданному (оптимальному) распределению.

При отклонении от заданного распределения на специальном табло включается световая сигнализация, соответствующая отклонению на $+5\%$; $+10\%$ и -10% . При отклонении на $+10\%$ включается также звуковая сигнализация.

Предусмотрены возможность выявления участка активной зоны с наибольшим отклонением в сторону увеличения мощности и автоматическая запись этого отклонения, а также регистрация всех нормированных и суммарного сигналов по требованию оператора.

Для непрерывного контроля возможно измерение пяти нормированных сигналов от любых датчиков непосредственно измерительными приборами, а также подключение любого датчика непосредственно к измерительному прибору.

Для проведения периодических расчетов на информационно-вычислительной машине она непосредственно связана с СКРЭ.

Неисправности, ведущие к сигнализации, соответствующей превышению уровня мощности (появлению сигналов превышения), автоматически контролируются.

Вторичная часть системы контроля за распределением энерговыделения по высоте реактора. В системе используется принцип последовательного обегания секций датчика с нормировкой на суммарный сигнал всех секций контролируемого датчика. Отклонения нормированного таким образом сигнала секции датчика от заданного (оптимального) значения фиксируются на световом табло. При отклонении более чем на $+5\%$ загорается красная лампочка, при отклонении более чем на -5% — зеленая лампочка. В случае отклонения более чем на $+10\%$ красная лампочка мигает. Для непрерывного контроля предусмотрено подключение семи секций любого датчика к измерительным показывающим приборам. По требованию оператора записываются показания всех секций датчиков.

Для использования полученных данных в дальнейших оптимизирующих расчетах система связана с информационно-вычислительной машиной.

Неисправности контролируются и сигнализируются.

Вспомогательная система контроля энерговыделения

Назначение вспомогательной системы — периодические измерения поля энерговыделения по радиусу и высоте реактора. Полученные в этих измерениях данные используются для нахождения основных метрологических характеристик, определяющих систему в целом. Вспомогательная система состоит из устройства контроля за распределением энерговыделения по радиусу реактора, основанного на измерениях γ -активности внутри ТВС остановленного реактора с помощью γ -камер, и устройства для тарировки датчиков контроля энерговыделения и измерения активности ТВС.

Устройство контроля за распределением энерговыделения по радиусу реактора. В связи с тем что γ -активность ТВС остановленного реактора пропорциональна их мощности перед остановкой, результаты измерений активности в ТВС, расположенных равномерно по активной зоне реактора, с учетом времени, прошедшего от момента остановки до времени измерения, и некоторых других специфических поправок дают сведения о распределении энерговыделения по радиусу реактора.

Измерения проводятся с помощью γ -камер, устанавливаемых в 153 специально предусмотренные центральные отверстия ТВС и представляющих собой ионизационные камеры с двумя цилиндрическими электродами. Длина чувствительной части равна высоте активной зоны реактора. Наружный диаметр γ -камеры 6 мм. Установка и извлечение γ -камер производится с помощью крана центрального зала.

Для упрощения алгоритма расчета измерения рекомендуется проводить через 6—10 ч после остановки реактора.

Устройство для тарировки датчиков контроля энерговыделения и измерения активности ТВС предназначено для измерения распределения плотности нейтронов по высоте ТВС во время работы реактора и активности осколков деления в извлеченных из реактора ТВС. В первом случае с помощью специальной коаксиальной γ -камеры с коллектором определяется наведенная γ -активность специального стального троса, который протягивается через центральное отверстие γ -камеры и опускается в центральное отверстие датчика контроля энерговыделения по высоте реактора. С помощью этой же камеры измеряется наведенная активность ТВС, пропускаемых через центральное отверстие каме-

ры. Результаты используются для взаимной градуировки секций датчика и получения дополнительных данных для определения основных метрологических характеристик системы.

Алгоритмы расчета уставок и поля энерговыделения по показаниям датчиков

В описанной системе контроля предусматривается сравнение показаний датчиков с заданными уставками. Считается, что равенство величины уставок измеряемому сигналу соответствует оптимальному распределению поля энерговыделения. При расчете таких уставок в качестве критериев берутся непревышение мощности в любой ТВС некоторой предельной величины и максимально возможная интегральная мощность реактора. При расчете уставок используется метод линейного программирования.

Распределение энерговыделения по всем ТВС рассчитывается с помощью расчетно-экспериментальной методики, базирующейся на одновременном использовании результатов физического расчета и данных дискретных точек контроля.

Расчетно-экспериментальная методика [2] основана на определении для каждого датчика величины $V(r)$ — соотношения сигнала датчика и значения аналогичной величины, полученной из физического расчета нейтронных полей или полей энерговыделения. Относительное распределение мощности ТВС $W(r)$ определяется в этом случае как произведение распределения энерговыделения, полученного из физического расчета, и распределения $V(r)$, проинтерполированного для всей активной зоны. Распределение $V(r)$ определяется с помощью метода статистической интерполяции, который основан на теории случайных функций и дает по сравнению с другими наилучшие результаты [3].

Рассмотренная методика апробирована применительно к реактору Белоярской АЭС им. И. В. Курчатова.

Поступила в Редакцию 2/II 1973 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. И. Я. Емельянов. «Атомная энергия», 30, 275 (1971).
2. W. Leggett. Trans. Amer. Nucl. Soc., 9, 484 (1966).
3. И. Я. Емельянов и др. «Атомная энергия», 30, 423 (1971).

Вниманию читателей!

Центральный научно-исследовательский институт информации и технико-экономических исследований по атомной науке и технике подготовил к размножению переводы докладов, представленных зарубежными учеными на IV Женевской конференции по мирному использованию атомной энергии, 1971 г.

Объем одного доклада 1—1,5 уч.-изд. листа, стоимость 1,5—2 руб. за 1 уч.-изд. лист.

Организациям, принимавшим участие в переводе, копии докладов высылаются бесплатно.

Заявки следует направлять по адресу: Москва, Г-146, аб. ящ. 584.

Перечень готовых переводов см. на стр. 406, 419 и 424.