

УДК 621.039.519

Эксперименты по регулированию распределения мощности на реакторе ИРТ-2000

ФИЛИПЧУК Е. В., ПОТАПЕНКО П. Т., КРЮКОВ А. П., ТРОФИМОВ А. П., КОСИЛОВ А. Н., НЕБОЯН В. Т., ТИМОХИН Е. С.

В работах [1, 2] изложена методика анализа и расчета систем автоматического регулирования распределения мощности в активной зоне ядерного реактора.

В настоящей статье приведены результаты экспериментальных исследований в 1973—1974 гг. нескольких структур подобных систем на исследовательском реакторе ИРТ-2000 МИФИ. В работе предпринята успешная попытка применения датчиков прямой зарядки [3] в системах регулирования нейтронного поля.

Правомерность исследования особенностей пространственного регулирования на исследовательском реакторе со сравнительно небольшой активной зоной следует из того, что реактор ИРТ-2000 имеет достаточно выраженные пространственные эффекты: перекося мощности, регистрируемый датчиками ДПЗ по половинам реактора, при перемещении стержней ручного регулирования в противоположные стороны достигает более 30% при эффективности одного стержня по реактивности около 1%.

В техническом отношении задача регулирования распределения мощности на малых исследовательских реакторах является более сложной, чем на больших энергетических реакторах вследствие большей связи между отдельными зонами.

На рис. 1 показаны картограмма активной зоны ИРТ-2000 и экспериментальная система. В штатной системе автоматического регулирования мощности реактора регулирующим органом является стальной стержень АР, размещенный в центральном экспериментальном канале, а датчиком — ионизационная камера КНК-53, находящаяся в тепловой колонне. В качестве исполнительных органов локальных регуляторов использовались борные стержни ручного регулирования ЛР-1 и ЛР-2 со штатными приводами, а вторые стержни ручного регулирования РР-1 и РР-2 использовались для внесения возмущений по реактивности.

В каждой половине реактора устанавливались симметрично по две сборки с датчиками марки ДПЗ-11П. Сборка представляла собой дюралевую трубу длиной 6 м и внешним диаметром 16 мм, к нижней части которой с помощью эпоксидной смолы была приклеена тонкая трубка диаметром $6 \times 0,5$ мм и длиной 1 м. Датчики ДПЗ-11П с длиной чувствительной части 1 м помещались (по 3 шт.) в каждую сборку так, чтобы чувствительная часть оказалась внутри тонкой трубки. Жесткость всей конструкции позволила без затруднений установить датчики в пространстве между соседними кассетами, имеющими скосы. Верхняя часть сборки закреплялась цанговым зажимом на крышке реактора. На мощности 2000 кВт ток каждого ДПЗ составлял 1,5 мкА. Сигналы датчиков, обслуживающих данную зону (половину реактора), суммировались и подавались на регулятор.

В локальных системах применялись серийные регуляторы температуры ВРТ-2. Поскольку ДПЗ является высокоомным датчиком, для согласования регулятора и детектора последний нагружался на сопротивление 500 Ом, напряжение с которого подавалось на вход регулятора ВРТ-2.

Сигналы с двухборок ДПЗ в каждой половине реактора суммировались и подавались на вход регулятора ВРТ-2. Для обеспечения приемлемых показателей качества был выбран ПД-закон регулирования с постоянной времени

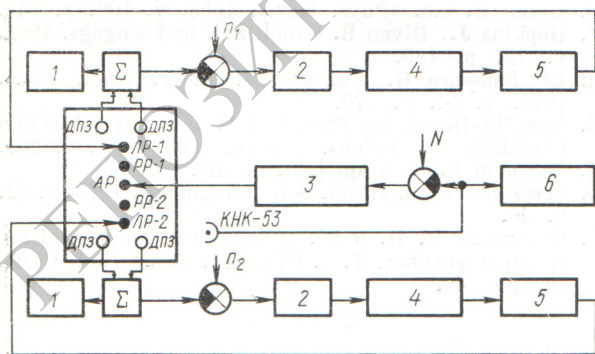


Рис. 1. Схема экспериментальной системы регулирования реактора ИРТ-2000:

1 — самописец Н-37; 2 — ВРТ-2; 3 — штатная система АР; 4 — усилитель мощности; 5 — привод; 6 — самописец ЭППВ-64

дифференцирования 20—30 с. Скорректированный сигнал после усилителя мощности поступал на привод локального регулятора. При испытании базовой структуры исследовалась работа локальных регуляторов в режиме линейного и релейного регулирования. В первом случае в качестве усилителя мощности использовался электромашинный усилитель ЭМУ-3А, а во втором — сигнал с выхода ВРТ-2 подавался на поляризованное реле, управляющее пусковой схемой привода. Отдельное рассмотрение в программе испытаний релейного варианта системы объясняется существующей практикой использования для стержней РР, а в последнее время и для стержней АР приводов постоянной скорости.

Для регистрации переходных процессов интегральной мощности использовался штатный самописец ЭППВ-64, а для мощностей зон (токов ДПЗ) — самописцы Н-37.

Экспериментально была получена переходная характеристика датчика ДПЗ. Для этого при номинальной мощности сборка с ДПЗ быстро перемещалась вверх на несколько сантиметров. Тем самым создавалось ступенчатое воздействие по потоку нейтронов. Запись процесса проводилась на самописце Н-37. Обработка переходной характеристики дает следующую передаточную функцию ДПЗ:

$$W_{\text{ДПЗ}}(S) = K \frac{4S+1}{60S+1} \quad (1)$$

На рис. 2 показаны переходные процессы для релейной системы, выполненной по схеме рис. 1, при извлечении стержня РР-1 с 40 до 25 см и одновременном погружении стержня РР-2 с 22 до 38 см. При этом интегральная мощность оставалась постоянной.

Зонные регуляторы обеспечивали также регулирование интегральной мощности со статической погрешностью 0,5% в подобном же эксперименте, но с отключенным штатным регулятором мощности.

На рис. 3 приведены записи самописцев мощности при управляемом перераспределении мощности реактора путем изменения уставок на задатчиках регуляторов ВРТ-2 в противоположные стороны (зонные регуляторы линейные) для постоянной интегральной мощности, стабилизируемой штатным АР.

Эксперименты с системой, реализованной по схеме рис. 1 с релейными и линейными зонными регуляторами, показали, что быстродействующий регулятор интегральной мощности оказывает сильное стабилизирующее действие

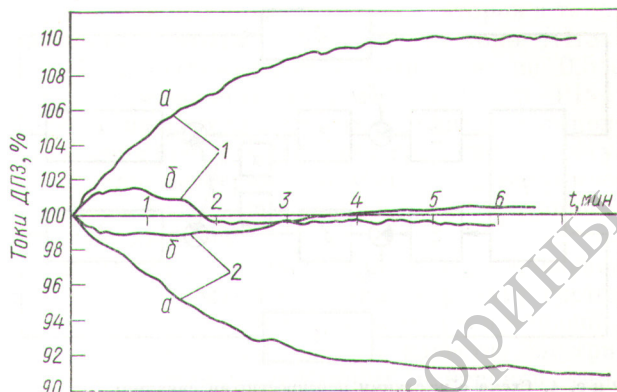


Рис. 2. Изменение токов ДПЗ при раздвигании стержней РР, когда локальные регуляторы отключены (а) и включены (б): 1 и 2 — ДПЗ зон 1 и 2

на систему локальных регуляторов [2]. Так, путем изменения коррекции локальные регуляторы были введены в автоколебательный режим работы. После включения в работу штатного АР автоколебания сразу же прекращались. Это действие можно объяснить с помощью точечной модели нейтронного поля. В соответствии с ней устойчивость системы без штатного АР определяется передаточной функцией эквивалентной одноконтурной системы в разомкнутом состоянии

$$W_{\text{ЭКВ}}(S) \cong W_0(S) \frac{2K_0}{S(60S+1)}, \quad (2)$$

а при включенном быстродействующем И-регуляторе интегральной мощностью

$$W_{\text{ЭКВ}} \cong W_0 \left[\frac{K_0}{S} + \frac{2K_0}{S(60S+1)} \right] = 3W_0K_0 \frac{20S+1}{S(60S+1)}, \quad (3)$$

где W_0 — передаточная функция «точечного» реактора; K_0 — коэффициенты усиления всех

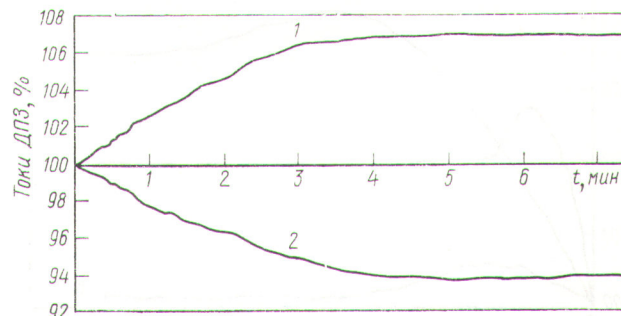
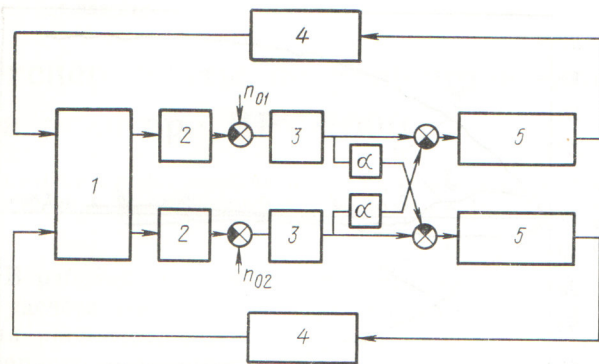


Рис. 3. Управляемое перераспределение мощности линейными зонными регуляторами:

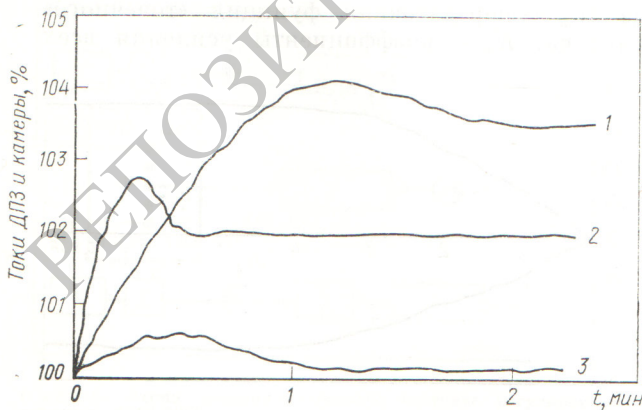
1 и 2 — ДПЗ зон 1 и 2



Р и с. 4. Схема с жесткими перекрестными связями:
1 — реактор; 2 — ДПЗ; 3 — ВРТ-2; 4 — привод; 5 — усилитель с коррекцией

трех регуляторов, принятые для простоты одинаковыми; датчик ДПЗ упрощенно описывается аperiodическим звеном с постоянной времени 60 с. Как видно из соотношения (3), действие малоинерционного АР эквивалентно действию дифференцирующего корректирующего устройства.

Система со структурой рис. 1 проста и надежна, так как зонные регуляторы аппаратно не связаны между собой. Выход из строя любого из них не ухудшает условий работы остальных регуляторов. При выходе из строя АР заданную мощность поддерживают локальные регуляторы. Для работы этой системы требуется жесткая связь между уставкой интегральной мощности N и уставками локальных регуляторов n_1 и n_2 . Например, подъем мощности реактора должен проводиться с помощью увеличения уставки N и одновременного пропорционального изменения уставок n_1 и n_2 .



Р и с. 5. Управляемое увеличение мощности в зоне 1:
1 — ДПЗ зоны 1; 2 — ток ИК; 3 — ДПЗ зоны 2

Схема, представленная на рис. 4, при определенном значении коэффициентов перекрестных связей α эквивалентна системе с обратной моделью в контуре регулирования [1]. Матрица перекрестных связей между регуляторами

$$P = \begin{vmatrix} 1 - \alpha & \\ & 1 \end{vmatrix}. \quad (4)$$

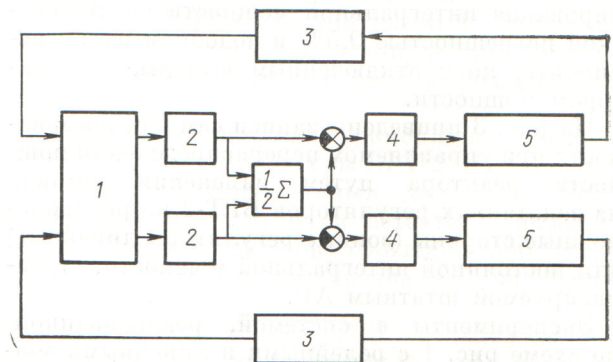
Передаточная функция эквивалентной одноконтурной системы при отключенном штатном АР

$$W_{\text{эkv}}(S) = 2K_0(1 - \alpha)W_0(S)W_{\text{ДПЗ}}(S). \quad (5)$$

На рис. 5 представлены переходные процессы в линейной системе с жесткими перекрестными связями ($\alpha = 0,7$) при отключенном штатном АР в ответ на изменение уставки одного локального регулятора.

В схеме на рис. 6 есть лишь один задатчик мощности в штатном АР. Локальные же регуляторы работают в режиме синхронизации мощностей отдельных зон, т. е. имеют «плавающую» уставку в виде среднего сигнала мощностей зон, снимаемого с сумматора [4]. Отдельные задатчики у локальных регуляторов в этом случае можно рассматривать как корректоры поля, с помощью которых устанавливается требуемая форма распределения нейтронов, неизменная при любых изменениях интегральной мощности задатчиком штатного АР. Нетрудно видеть, что при отключении регулятора интегральной мощности система с «плавающей» уставкой не обеспечивает регулирования мощности.

Зарегистрированы переходные процессы для системы с релейными локальными регуляторами в ответ на изменение уставки на штатном АР. При зоне нечувствительности реле 1% в этом процессе стержни локальных регулято-



Р и с. 6. Схема с плавающей уставкой:
1 — реактор; 2 — ДПЗ; 3 — привод; 4 — ВРТ-2; 5 — усилитель мощности

ров остались неподвижными, т. е. перевод на новую мощность обеспечивался центральным стержнем штатного АР без включения стержней локальных регуляторов и без изменения соотношения мощностей зон реактора.

Важно заметить, что длительности переходных процессов изменения интегральной мощности и мощностей зон практически совпадают. Разные длительности соответствующих процессов, представленных на рисунках, объясняются инерционностью ДПЗ.

Как и структура с жесткими связями, система с «плавающей» уставкой обладает меньшей надежностью в результате структурной взаимосвязи локальных регуляторов. Действительно, выход из строя любого датчика, участвующего в формировании сигнала средней мощности, приведет к значительному изменению величины уставки и, как следствие, к выходу из строя всей системы локальных регуляторов. Однако этот недостаток может быть преодолен использованием соответствующих схем защиты и высоконадежных датчиков.

Различные структуры систем регулирования, испытанные на реакторе ИРТ-2000, устойчиво работали, обеспечивали автоматическую уста-

новку стержней локальных регуляторов в такое положение, чтобы поддерживать токи ДПЗ-1 и ДПЗ-2 постоянными с точностью до 0,5% при перемещениях стержней РР-1 и РР-2. Система из двух локальных регуляторов выполняла одновременно функции трех систем: регулирования интегральной мощности, регулирования распределения мощности и синхронизации стержней АР.

Таким образом, экспериментально показана работоспособность нескольких структур систем автоматического регулирования распределения мощности, использующих в качестве внутризонных датчиков детекторы нейтронов типа ДПЗ.

Поступила в Редакцию 8/VIII 1974 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Потапенко П. Т. «Атомная энергия», 1969, т. 27, вып. 2, с. 189.
2. Филинчук Е. В. и др. «Атомная энергия», 1973, т. 35, вып. 5, с. 317.
3. Мительман М. Г. и др. Метрология нейтронного излучения на реакторах и ускорителях. Т. 1. М., Изд-во стандартов, 1972, с. 115.
4. Furet J., Delmas F. Instrumentation for Nuclear Power Plant Control. Vienna, IAEA, 1970.