

что в 1,57 раза превосходит коэффициент сопротивления сборки ТВС типа ВВР-М2 [2].

Тепловые расчеты, основанные на экспериментальных результатах, подтверждают возможность реконструкции реактора ВВР-М с повышением его мощности до 30 МВт при использовании новых ТВС и увеличении мощности теплообменников и градирни, а также показывают возможность постановки новых ТВС в активную зону реактора наряду с ТВС типа ВВР-М2.

Работоспособность новых, в особенности тонкостенных, твэлов определяется в первую очередь герметичностью оболочки. Для твэлов ВВР-М2 вклад поверхностного загрязнения в активность теплоносителя пренебрежимо мал (~3%), что соответствует эквивалентному содержанию  $^{235}\text{U}$  на поверхности  $(3 \pm 1) 10^{-10}$  г/см<sup>2</sup> [3]. Рост обогащения  $^{235}\text{U}$  в новых твэлах в 2,5 раза и увеличение поверхности в 1,77 раза повышает вклад поверхностного загрязнения в четыре раза по сравнению с твэлами ВВР-М2. Эквивалентное содержание  $^{235}\text{U}$  на поверхности новых твэлов было определено по скорости поступления осколков в теплоноситель петлевого канала из твэлов с нулевым выгоранием и составило  $(7 \pm 2) 10^{-10}$  г/см<sup>2</sup>.

Основной вклад в осколочную активность теплоносителя дает ухудшение герметичности твэлов в ходе выгорания. Опытной эксплуатации были подвергнуты три партии твэлов, изготовленных в разное время. Твэлы ВВР-М3 и ВВР-М4 эксплуатировались в активной зоне реактора ВВР-М наряду с твэлами ВВР-М2 при мощности реактора 16 МВт. Всего в зону загружалось 19 ТВС.

Анализ данных систематического контроля герметичности твэлов в активной зоне реактора за весь период эксплуатации новых твэлов показал, что при загрузке в активную зону сборок ВВР-М3 и ВВР-М4 в количестве 8,7% полного числа сборок осколочная активность теплоносителя не увеличивалась, а сохранялась на обычном уровне ( $10^{-6}$  Ки/л по  $^{85m}\text{Kr}$ ,  $^{87}\text{Kr}$ ,  $^{88}\text{Kr}$ ,  $^{135}\text{Xe}$ ,  $^{138}\text{Xe}$ ) в диапазоне выгорания топлива в новых твэлах

от 0 до 70%. Определив негерметичность  $\beta$  как отношение скорости утечки осколков к скорости их образования, можно оценить ее верхние пределы для новых твэлов, учитывая скорость поступления осколков в теплоноситель реактора в момент нахождения максимального количества новых твэлов в активной зоне и ошибок измерения этой скорости ( $2\sigma$ ).

По изотопам йода при негерметичности только одной сборки и одинаковой негерметичности всех сборок  $\beta = 40 \cdot 10^{-7}$  и  $2 \cdot 10^{-7}$  соответственно. На четырех сборках было прослежено изменение негерметичности в ходе выгорания путем периодического извлечения их из активной зоны и испытания в петлевом канале. Результаты позволили убедиться в том, что негерметичность новых твэлов находится на том же уровне, что и твэлов ВВР-М2.

Опытная эксплуатация твэлов ВВР-М3 и ВВР-М4 в реакторе подтвердила их высокую работоспособность вплоть до максимально достигнутого выгорания 78%, что соответствует плотности делений в объеме топливной композиции  $1,45 \cdot 10^{21}$  см<sup>-3</sup>. Успешные реакторные испытания создают реальную основу для модернизации реактора ВВР-М с использованием новых твэлов и повышения его мощности до 30 МВт.

Авторы благодарят Д. М. Каминкера за постоянную поддержку, а также Ю. П. Семенова и Б. С. Разова за большую помощь в проведении этой работы.

Поступило в Редакцию 20/VI 1975 г.

В окончательной редакции 29/III 1976 г.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Каминкер Д. М., Коноплев К. А. III Женевск. конф., 1964, докл. № 325.
2. Кирсанов Г. А. и др. «Атомная энергия», 1975, т. 39, вып. 5, с. 320.
3. Баданина Н. Г., Коноплев К. А., Сайков Ю. П. «Атомная энергия», 1972, т. 32, вып. 4, с. 316.

УДК 621.039.562:621.039.512.45

## Анализ релейных систем зонного регулирования реактора

Филипчук Е. В., Небойн В. Т., Потапенко П. Т.

В системах автоматического регулирования распределения мощности в активной зоне могут быть использованы преимущественно сервоприводы постоянной скорости. Регулирование скорости обычно затруднено тем обстоятельством, что при перемещении стержня вверх привод работает в принципиально другом режиме, чем при движении стержня вниз. Например, все стержни реактора РБМК имеют привод постоянной скорости. Таким образом, техническая реализация регулирования приводит к созданию многомерных релейных систем.

В настоящей статье излагается инженерная методика расчета таких систем по заданным показателям качества для реакторов с устойчивым распределением мощности. Система состоит из  $n$  идентичных релейных регуляторов, равномерно расположенных в области активной зоны с выравненным распределением мощности (в зоне управления). Датчики и регулирующие стержни локальных регуляторов размещаются в окрестностях узлов квадратной или треугольной решетки.

В соответствии с адиабатическим приближением [1] связь вектора отклонений нейтронного потока от заданных значений (уставок)  $\mathbf{n} = (n_1, n_2, \dots, n_m)^T$ , регистрируемого датчиками, с вектором внешних воздействий, вносимых стержнями,  $\Delta \mathbf{k} = (\Delta k_1, \Delta k_2, \dots, \Delta k_m)^T$  устанавливается уравнением

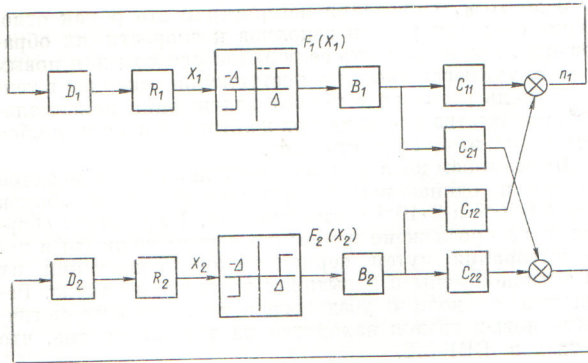
$$\mathbf{n} = H(p) \Delta \mathbf{k}, \quad (1)$$

где  $H(p)$  — передаточная матрица реактора:

$$H(p) = W_0(p) A. \quad (2)$$

Передаточная функция точечного реактора  $W_0(p)$  и статическая матрица  $A$  определяются экспериментально или расчетным путем.

Анализ системы в режиме стабилизации распределения мощности существенно упрощается с учетом ограниченного взаимодействия релейных локальных регуляторов. В соответствии с этим предполагается, что локальные возмущения по реактивности, создаваемые,



Эквивалентная расчетная схема системы

например, при перегрузке и при вводе в активную зону различных инструментов, обрабатываются только ближайшими к месту возмущения локальными регуляторами. Тогда для квадратной решетки регуляторов расчетное число взаимодействующих регуляторов составляет 5, для треугольной — 7.

Это допущение справедливо по следующим причинам. Из условий ядерной безопасности число одновременно перемещаемых стержней регулирования ограничено соответствующими блокировками. Деформация нейтронного поля от локально внесенного возмущения по реактивности затухает по мере удаления от места возмущения. Вследствие наличия зоны нечувствительности удаленные от места возмущения локальные регуляторы не участвуют в регулировании. Таким образом, задача синтеза всей системы сводится к расчету малого числа взаимодействующих регуляторов с центральной симметрией.

Пусть индекс 1 принят для центрального регулятора. Тогда с учетом симметрии и выравненности нейтронного поля в зоне управления из уравнения (1) следует:

$$\mathbf{n} = C(p) \Delta \mathbf{k},$$

$$\text{где } \mathbf{n} = (n_1, n_2)^T; \Delta \mathbf{k} = (\Delta k_1, \Delta k_2)^T;$$

$$C(p) = \begin{pmatrix} C_{11}(p) & C_{12}(p) \\ C_{21}(p) & C_{22}(p) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12}(m-1) \\ a_{21} & a_{22} + 2a_{23} \end{pmatrix} W_0(p). \quad (3)$$

На рисунке показана эквивалентная структурная схема системы регулирования, вытекающая из соотношений (3), где  $D_{1,2}(p)$ ;  $R_{1,2}(p)$ ;  $B_{1,2}(p)$  — передаточные функции датчика, регулятора и привода со стержнем. В тех случаях, когда элементы матрицы линейной части системы обладают свойством фильтра, можно провести гармоническую линеаризацию нелинейных элементов  $F_1$  и  $F_2$  для переходных колебаний [2]. В результате характеристическое уравнение системы запишется так:

$$1 + D_1(p) R_1(p) \left\{ B_1(p) C_{11}(p) q(A_1) + \right.$$

$$\left. + B_2(p) q(A_2) D_2(p) R_2(p) \times \left[ \frac{C_{22}(p)}{D_1(p) R_1(p)} + \right. \right. \\ \left. \left. + q(A_1) B_1(p) (C_{11}(p) C_{22}(p) - C_{12}(p) C_{21}(p)) \right] \right\} = 0, \quad (4)$$

где  $q(A_1)$  и  $q(A_2)$  — эквивалентные коэффициенты передачи нелинейных элементов.

Затухающие «синусоидальные» колебания соответствуют комплексным корням характеристического уравнения. Поэтому для определения показателя затухания  $\xi(A)$  и частоты  $\omega(A)$  подставим в это уравнение  $p = \xi + j\omega$ . Соотношение, связывающее амплитуды колебаний в центральном и периферийном каналах  $A_1$  и  $A_2$ , получается из уравнения гармонически линеаризованной системы с учетом малого изменения во времени значений  $\xi$  и  $\omega$ :

$$A_2 = A_1 \left| \frac{D_2(p) R_2(p) C_{22}(p)}{D_1(p) R_1(p) C_{12}(p)} + \right. \\ \left. + D_2(p) R_2(p) B_1(p) \frac{C_{22}(p) C_{11}(p) - C_{12}(p) C_{21}(p)}{C_{12}(p)} q(A_1) \right|. \quad (5)$$

Уравнения (4) и (5) полностью определяют показатели качества  $\xi = \xi(A)$  и  $\omega = \omega(A)$  как функции амплитуды. Из этих уравнений могут быть получены диаграммы качества, весьма полезные при синтезе описываемых систем.

Методика синтеза достаточно универсальна. В частности, она применима к системе регулирования, содержащей регулятор интегральной мощности и локальные регуляторы, расположенные симметрично по окружности одного радиуса.

Нетрудно видеть, что полная схема расположения регуляторов подобна ранее рассмотренной схеме взаимодействующих регуляторов. Поэтому расчет подобных структурных схем изложенным методом может быть проведен практически для любых ее разновидностей. Правомерность принятых допущений и методики в целом подтверждена результатами аналогового моделирования. Если фильтрующие свойства системы ограничены только звеном интегрирования, то результат синтеза можно рассматривать как первое приближение, которое может быть скорректировано, например, цифровым моделированием.

Поступило в Редакцию 23/VI 1975 г.  
В окончательной редакции 16/I 1976 г.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Филипчук Е. В., Потапенко П. Т., Косилов А. Н. «Атомная энергия», 1973, т. 35, вып. 5, с. 317.
2. Попов Е. П. Прикладная теория процессов управления в нелинейных системах. М., «Наука», 1973.