

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Т

1. Поплавский В. М. и др. «Теплоэнергетика», 1966, т. 6, с. 70.
2. Лейпунский А. И. и др. «Атомная энергия», 1967, т. 22, вып. 1, с. 13.
3. Багдасаров Ю. Е. и др. Технические проблемы реакторов на быстрых нейтронах. М., Атомиздат, 1969.
4. Лукаевич Б. И. и др. In: Proc. Study Group Meeting on Steam Generators for LMFBRS. Bensberg, 14—17 Oct. 1974, p. 239.
5. Поплавский В. М. и др. «Атомная энергия», 1974, т. 30, вып. 2, с. 191.

6. Мазанов А. С. и др. [4], с. 129.
7. Козлов Ф. И. и др. In: Proc. US/USSR Seminar on the Development of Sodium — Cooled Fast Breeder Reactor Steam Generators. Los-Angeles, 2—4 Dec. 1974, p. 367.
8. Поплавский В. М. и др. В кн: Состояние и перспективы работ по созданию АЭС с реакторами на быстрых нейтронах. Т. II. Обнинск, изд. ФЭИ, 1975, с. 518.
9. Петухов В. В. и др. [7], с. 540.
10. Титов В. Ф. и др. [8], т. I, с. 608.
11. Титов В. Ф. и др. [7], с. 243.
12. Поплавский В. М. и др. [7], с. 488.

УДК 621.039.515

Точность регулирования нейтронного поля ядерного реактора

ПЛЕХАНОВ Л. П.

Одним из путей улучшения экономических показателей энергетических реакторов является повышение точности пространственного регулирования нейтронного поля. Решение этой задачи достигается созданием систем регулирования поля, имеющих несколько датчиков и регуляторов. Проблемам построения таких систем посвящен ряд работ [1—5], в которых рассматриваются вопросы проектирования, устойчивости систем, теоретического и экспериментального исследования их поведения.

Однако некоторые важные вопросы в этой области еще недостаточно разработаны. Одним из них является зависимость статической точности регулирования от числа и расположения датчиков и регулирующих органов (РО), от погрешности датчиков, зон нечувствительности регуляторов и др.

В настоящей статье выясняются закономерности, определяющие статическую точность регулирования нейтронного поля.

Постановка задачи. Пусть отклонение поля $\Delta\Phi(r)$ от номинального распределения описывается в стационарном состоянии и с учетом внутренних обратных связей линейной краевой задачей:

$$\begin{aligned} L(\Delta\Phi) &= f(\Delta\alpha); \\ B[\Delta\Phi(r)] &= 0, \quad r \in \Gamma, \end{aligned} \quad (1)$$

где Γ — граница активной зоны; L и B — линейные операторы; f — оператор; $\Delta\alpha(r)$ — изменение коэффициента размножения нейтронов (возмущение).

Предполагается, что возмущение ограничено одним из двух неравенств с известными пра-

выми частями:

$$|f[\Delta\alpha(r)]| \leq F(r); \quad (2a)$$

$$\int \{f[\Delta\alpha(r)]\}^2 dV(r) \leq A^2. \quad (2б)$$

Здесь и дальше все интегралы взяты по объему активной зоны.

Система регулирования задается следующими данными. В точках r_i активной зоны расположены N_d датчиков ($i = 1, 2, \dots, N_d$), имеющих погрешность δ_i . Сигнал i -го датчика после сравнения с номинальным значением подается на k -й регулятор с весовым коэффициентом c_{ki} . Число регуляторов равно N_p . Регулятор с номером k управляет одним РО (например, стержнем), расположенным в точке ξ_k ($k = 1, 2, \dots, N_p$), и имеет погрешность регулирования (или зону нечувствительности) Δ_k .

Предполагается, что система регулирования устойчива и форма РО в геометрии задачи (1) меняется мало. Требуется оценить установившуюся погрешность регулирования $\Delta\Phi(r)$ в любой точке r активной зоны в зависимости от погрешностей регуляторов Δ_k , погрешностей датчиков δ_i и возмущения $\Delta\alpha$.

Исходные уравнения. Будем считать, что однородная задача, соответствующая формуле (1), не имеет нетривиального решения. Это справедливо для большинства реакторов, работающих в энергетическом режиме (о противоположном случае см. примечание в конце статьи). Искомую погрешность регулирования можно

представить в следующем виде:

$$\Delta\Phi(r) = \sum_{k=1}^{N_p} G(r, \xi_k) f(\Delta\alpha_k) + \int G(r, \xi) f(\Delta\alpha(\xi)) dV(\xi), \quad (3)$$

где $G(r, \xi)$ — функция Грина задачи (1); $\Delta\alpha_k$ — изменение коэффициента размножения нейтронов k -м РО. Уравнение для регуляторов

$$\sum_{i=1}^{N_d} c_{hi} [\Delta\Phi(r_i) + x_i] = y_h, \quad (4)$$

где x_i и y_h — неконтролируемые сигналы i -го датчика и h -го регулятора, значения которых не превышают соответствующих погрешностей:

$$|x_i| \leq \delta_i; \quad |y_h| \leq \Delta_h. \quad (5)$$

Введем обозначения: C — матрица коэффициентов c_{hi} ; Δp — вектор воздействий РО с элементами $f(\Delta\alpha_k)$; G — статическая матрица передачи объекта, элементы которой $G(r_i, \xi_k)$ есть изменение поля в точке расположения i -го датчика при единичном воздействии k -го РО; $g(\xi)$ — вектор-функция с элементами $G(r_i, \xi)$ есть изменение поля в точках r_i при воздействии единичного возмущения в точке ξ ; $d(r)$ — вектор-функция $G(r, \xi_k)$, элементы которой показывают изменение поля в точке r от единичного воздействия k -го РО, причем предполагается, что матрицу G и функции $d(r)$ и $g(\xi)$ можно измерить экспериментально; x — вектор сигналов x_i ; y — вектор сигналов y_h .

В этих обозначениях для определения Δp уравнение регуляторов можно записать в виде

$$CG\Delta p + \int Cg(\xi) f[\Delta\alpha(\xi)] dV(\xi) + Cx = y. \quad (6)$$

Требование к структуре системы. Для однозначной разрешимости уравнения (6) относительно Δp необходимо и достаточно, чтобы определитель матрицы CG был отличен от нуля. В противном случае, когда $\det(CG) = 0$, каждое воздействие Δp_h будет зависеть от одной или нескольких произвольных величин. В реальной системе (например, построенной по структуре рис. 1) это выразится в том, что во время работы РО (стержни) будут расходиться, создавая большую неравномерность нейтронного поля. Действительно, если в системе на рис. 1 два противоположных стержня сместить на некоторое расстояние вверх, а два других — на то же расстояние вниз, то система не вернет их в прежнее положение. Систему, обладающую таким свойством, нельзя считать удовле-

творительной, поэтому требование

$$\det(CG) \neq 0 \quad (7)$$

является необходимым при выборе структуры системы, расположения датчиков и РО. В дальнейшем будем считать требование (7) выполненным.

Оценка точности регулирования. Выражая Δp из (6) и подставляя в (3), получаем выражение для погрешности регулирования:

$$\Delta\Phi(r) = d'(r)(CG)^{-1}y - d'(r)(CG)^{-1}Cx + \int f(\Delta\alpha(\xi)) [G(r, \xi) - R(r, \xi)] dV(\xi), \quad (8)$$

где штрих означает транспонирование. Функцию $R(r, \xi) = d'(r)(CG)^{-1}Cg(\xi)$ назовем ядром регуляторов, она показывает, какое парциальное поле в точке r активной зоны дает система регулирования в ответ на единичное возмущение в точке ξ .

Первое слагаемое погрешности регулирования (8) обусловлено погрешностями (зонами нечувствительности) регуляторов, второе — погрешностью датчиков, третье — действием возмущений. Так как они независимы, рассмотрим их отдельно, обозначив соответственно $\Delta\Phi_p$, $\Delta\Phi_d$, $\Delta\Phi_v$. Обозначим элементы вектор-функции $d'(r)(CG)^{-1}$ как $q_h(r)$. Тогда из (8) и (5) можно получить:

$$|\Delta\Phi_p(r)| \leq \sum_{h=1}^{N_p} |q_h(r)| \Delta_h; \quad (9)$$

$$|\Delta\Phi_d(r)| \leq \sum_{i=1}^{N_d} \left| \sum_{h=1}^{N_p} q_h(r) c_{hi} \right| \delta_i. \quad (10)$$

Для практики более удобным может оказаться расчет соответствующих средних квадратических погрешностей регулирования $\sigma_p(r)$ и $\sigma_d(r)$. В предположении, что x_i и y_h — неза-

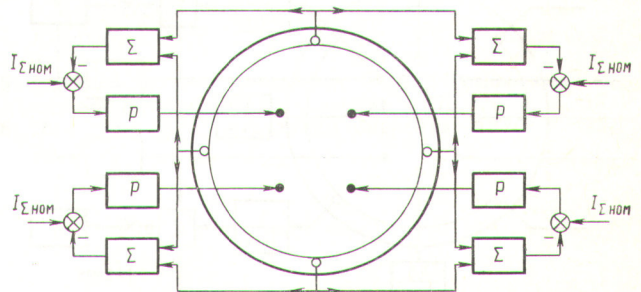
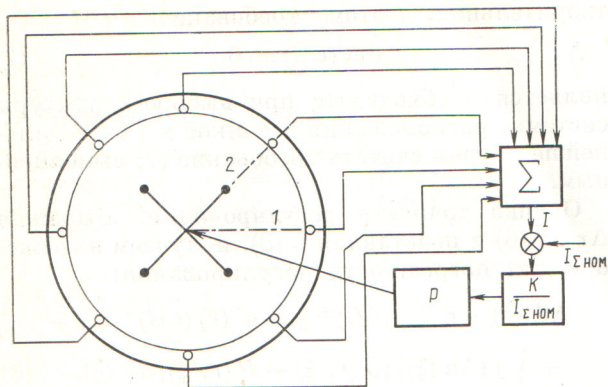


Рис. 1. Структура системы регулирования, не обеспечивающая однозначного положения РО (здесь и на рис. 2 и 3 ○ — датчики; ● — РО; P — регулятор)



Р и с. 2. Система интегрального регулирования (здесь и на рис. 3 K — коэффициент усиления)

висимые случайные сигналы с дисперсиями a_i и b_k соответственно, из (8) следует:

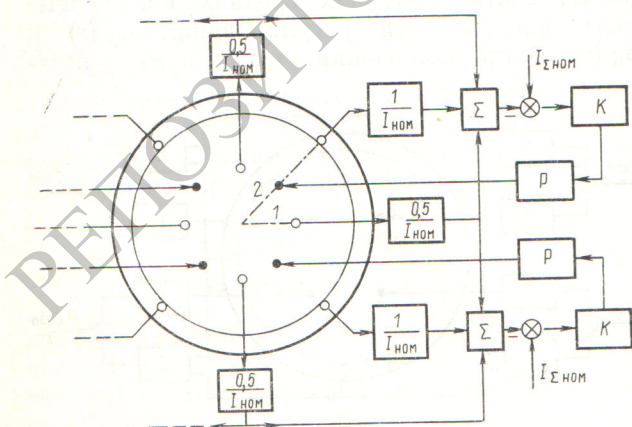
$$\sigma_p^2(r) = \sum_{k=1}^{N_p} q_k^2(r) b_k; \quad (11)$$

$$\sigma_d^2(r) = \sum_{i=1}^{N_d} \left(\sum_{k=1}^{N_p} q_k(r) c_{ki} \right)^2 a_i. \quad (12)$$

Для погрешности регулирования из-за действия возмущений справедливы оценки, полученные из (2) и (8) с использованием неравенства Коши — Буяковского:

$$|\Delta\Phi_B(r)| \leq \int F(\xi) |G(r, \xi) - R(r, \xi)| dV(\xi), \quad (13a)$$

$$|\Delta\Phi_B(r)| \leq A \left\{ \int [G(r, \xi) - R(r, \xi)]^2 dV(\xi) \right\}^{1/2}. \quad (13b)$$



Р и с. 3. Система зонного регулирования

Правые части соотношений (9) — (13) представляют собой распределенные оценки соответствующих погрешностей, выраженные через известные параметры задачи.

Все погрешности регулирования зависят от расположения датчиков, РО и коэффициентов взаимосвязей c_{ki} . Эти зависимости весьма сложны, что дает возможность сделать только некоторые общие выводы. Погрешность регулирования из-за зон нечувствительности регуляторов (9) и (11) уменьшается при увеличении всех коэффициентов c_{ki} , остальные погрешности не имеют такого свойства.

Для уменьшения погрешности регулирования $\Delta\Phi_B(r)$, возникающей из-за действия возмущений, следует стремиться к тому, чтобы ядро регулятора $R(r, \xi)$ было по возможности ближе к функции Грина задачи $G(r, \xi)$. Из разложения функции Грина $G(r, \xi) =$

$$= \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\Psi_k(r)\bar{\Psi}_k(\xi)}{\lambda_k}, \quad \text{где } \Psi_k(r) \text{ и } \bar{\Psi}_k(\xi) \text{ — соб-}$$

ственные функции (гармоники) соответственно задачи (4) и ее сопряженной, видно, что с помощью регуляторов необходимо компенсировать прежде всего гармоники возмущений, соответствующие наименьшим по модулю собственным числам λ_k . Однако при этом следует иметь в виду, что сама система регулирования будет вносить дополнительные искажения поля на оставшихся некомпенсированными гармониках.

Расчет полученных оценок позволит целенаправленно принимать меры для уменьшения суммарной погрешности регулирования нейтронного поля, сравнивать различные варианты расположения датчиков и РО, структур регуляторов и т. п. Приведем результаты расчета оценок погрешностей регулирования для двух систем, показанных на рис. 2 и 3. Первая реализует принцип «интегрального регулирования», вторая — «зонного регулирования» [4].

Объект регулирования — цилиндрический реактор, имеющий активную зону радиусом 6 м, отражатель толщиной 1 м и зону обогащения толщиной 1 м. Мощная обратная связь составляет $-0,5\beta/100\%$, где β — эффективная доля запаздывающих нейтронов.

Математическая модель объекта — одногрупповое диффузионное уравнение, отражатель учтен эффективной добавкой 0,65 м. Погрешность датчиков, находящихся в отражателе, была принята равной 1%, внутриреакторных датчиков 2%, зоны нечувствительности регуляторов 1%. Величина A в ограничении (26)

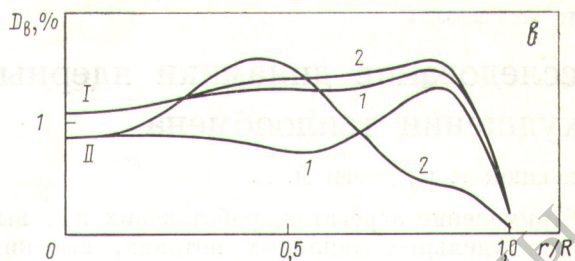
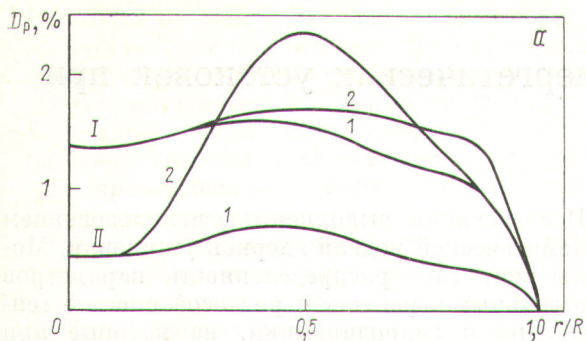
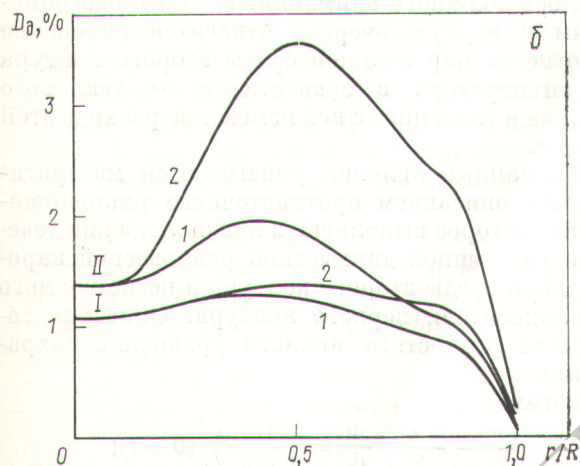


Рис. 4. Погрешности регулирования из-за погрешностей (зон нечувствительности) регуляторов (а), погрешностей датчиков (б) и действия возмущений (в) для систем интегрального (I) и зонного (II) регулирования вдоль радиусов 1 и 2 (см. рис. 2 и 3)



ными локальными искажениями поля вблизи стержней.

Примечание. В случае, когда однородная задача (1) имеет отличное от нуля решение $\Phi^0(r)$, в уравнение (3) необходимо ввести слагаемое $\gamma\Phi^0(r)$ и под $G(r, \xi)$ понимать модифицированную функцию Грина, ортогональную к $\Phi^0(r)$. Для определения числа γ к системе (3) и (4) добавляется уравнение критичности возмущенного состояния

$$\sum_{k=1}^{N_p} \Phi^0(\xi_k) f(\Delta\alpha_k) + \int \Phi^0(\xi) f[\Delta\alpha(\xi)] dV(\xi) = 0.$$

При этом структурное требование (7) остается в силе, а оценки (9) — (13) легко уточняются.

Поступила в Редакцию 23.XI.77

была взята равной 0,01. На рис. 4 D_p , D_d и D_v обозначают соответственно правые части неравенств (9), (10) и (136) в процентах от номинального значения поля в центре активной зоны.

Анализ графиков показывает, что по сравнению с интегральной системой зонное регулирование обеспечивает в целом меньшие погрешности регулирования поля, обусловленные погрешностями регуляторов и действием возмущений. Погрешность регулирования, обусловленная погрешностями датчиков, для зонной системы больше, чем для интегральной, что объясняется меньшей точностью взятых внутриреакторных датчиков. Кроме того, система зонного регулирования характеризуется замет-

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Емельянов И. Я. и др. «Атомная энергия», 1974, т. 37, вып. 2, с. 118.
2. Усынин Г. Б., Чирков В. К. Там же, 1975, т. 37, вып. 2, с. 123.
3. Селиверстов Б. Н., Рудов Н. П., Воскресенский Ф. Ф. Там же, 1975, т. 38, вып. 5, с. 329.
4. Емельянов И. Я. и др. Там же, 1976, т. 41, вып. 2, с. 81.
5. Косилов А. Н., Потапенко П. Т., Тимохин Е. С. «Атомная техника за рубежом», 1975, № 7, с. 17.
6. Плеханов Л. П. «Атомная энергия», 1977, т. 42, вып. 4, с. 268.