

реактора 5 К, в то время как без регулятора составляет соответственно 115 и 25 К.

Высокая эффективность описанного способа останова реактора, продемонстрированная в расчетно-экспериментальных исследованиях, позволяет рекомендовать его для внедрения на быстрых энергетических реакторах, что обеспечивает повышение надежности и безопасности эксплуатации ядерных энергетических установок. Однако из-за различного типа оборудования и разных возможностей регулирования скорости вращения циркуляционных насосов на энергетических реакторах этот вопрос наиболее успешно может быть

решен на стадии их проектирования с целью обеспечить необходимый диапазон регулирования расхода и найти источник с достаточным запасом кинетической энергии. Для этого, например, может быть использован турбогенератор.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Казачковский О. Д. и др. «Атомная энергия», 1973, т. 34, вып. 5, с. 341.
2. Афанасьев В. А. и др. В кн.: Вопросы атомной науки и техники. Сер. Динамика ЯЭУ. Вып. 4 (41). М., изд. ЦНИИатоминформ, 1977, с. 51.

Поступила в Редакцию 15.05.78
В окончательной редакции 23.04.79

УДК 621.039.562

Синтез зонно-асимметричных систем автоматического регулирования энергораспределением реактора

ЕМЕЛЬЯНОВ И. Я., ПОДЛАЗОВ Л. Н., АЛЕКСАКОВ А. Н., ПАНИН В. М.

Поддержание заданного пространственного энергораспределения в энергетических реакторах больших размеров является актуальной проблемой в силу присущей им склонности к самопроизвольным нестационарным деформациям [1]. В связи с этим перед специалистами, разрабатывающими системы управления большими реакторами, стоит множество задач, и одна из важнейших — оптимальный выбор числа и месторасположения регулирующих стержней и датчиков, включенных в систему автоматического регулирования (САР).

Традиционный подход с использованием локальных систем регулирования приводит к необходимости иметь столько локальных регуляторов, сколько требуется подавить неустойчивых гармоник [2]. Однако в работах [3, 4] была показана принципиальная возможность стабилизации поля нейтронов, неустойчивого на определенном числе гармоник, меньшим числом регуляторов.

Перспектива повышения стабилизирующих свойств САР при меньшем числе управляющих воздействий явилась стимулом проведения работ [5—7], в которых рассматриваются различные аспекты регулирования одномерного реактора асимметричными системами регулирования. В частности, в работе [5] показано, что при синтезе асимметричных систем наряду со стабильностью необходимо учитывать качество регулирования, и с этой точки зрения наиболее перспективным представляется сочетание зонного принципа построения САР с принципом асимметрии. В настоящей статье рассмотрены некоторые вопросы синтеза зонно-асимметричной системы регулирования радиально-азимутального энергораспределения.

Постановка задачи. Для описания распределения нейтронов используется линеаризованное уравнение диффузионного приближения в цилиндри-

ческой системе координат в предположении, что рассматриваются медленные процессы, при которых возможно пренебрежение запаздывающими нейтронами. Все изменения значений считаются усредненными по оси с весом, пропорциональным квадрату потока нейтронов.

При сделанных предположениях уравнения динамики реактора с учетом одной мощностной обратной связи записываются в виде:

$$\begin{cases} \Delta\varphi + \kappa_0^2\varphi + (k_{o,c} + k_p)\Phi_0 = 0; & (1) \\ \varphi|_{r=1} = 0; & (2) \\ \partial k_{o,c}/\partial t = \alpha\varphi - k_{o,c}, & (3) \end{cases}$$

где k_p — член, описывающий регулирующее воздействие.

За единицу времени принимается постоянная времени обратной связи. Стационарное распределение нейтронного потока Φ_0 удовлетворяет уравнению

$$\Delta\Phi_0 + \kappa_0^2\Phi_0 = 0 \quad (4)$$

с граничным условием $\Phi_0|_{r=1} = 0$,

$$\text{где } \kappa_0^2 = \begin{cases} 0 & \text{при } r < R_1; \\ \text{const} > 0 & \text{при } R_1 < r \leq 1 \end{cases}$$

(здесь R_1 — радиус выравненного энергораспределения).

Решение уравнения (4) имеет вид [6]

$$\Phi_0 = \begin{cases} 1 & \text{при } r < R_1; \\ A [J_0(\kappa_0 r) Y_0(\kappa_0) - Y_0(\kappa_0 r) J_0(\kappa_0)] & \text{при } R_1 \leq r \leq 1, \end{cases}$$

где $A = [J_0(\kappa_0 R_1) Y_0(\kappa_0) - Y_0(\kappa_0 R_1) J_0(\kappa_0)]^{-1}$.

Рассмотрим случай, когда САР построена на основе регуляторов, работающих в пропорциональном (статическом) режиме, и запишем урав-

нение для k_p в виде

$$k_p = - \sum_{i=1}^M A_i \delta(r-r_i, \theta-\theta_i) \sum_{j=1}^{N_i} \varphi \Big|_{\substack{r=r_{ij} \\ \theta=\theta_{ij}}}, \quad (5)$$

где M — число регулирующих стержней; $A_i > 0$ — коэффициент передачи i -го стержня; r_i, θ_i — координаты i -го стержня; N_i — число датчиков, соответствующих i -му стержню; r_{ij}, θ_{ij} — координаты j -го датчика, соответствующего i -му стержню; $\delta(r, \theta)$ — двумерная δ -функция.

После преобразования Лапласа запишем уравнения (1), (2) с учетом (3), (5) в виде

$$\begin{cases} \Delta \bar{\varphi} + \alpha_0^2 \bar{\varphi} + \frac{\alpha \Phi_0}{s+1} \bar{\varphi} - \\ - \Phi_0 \sum_{i=1}^M A_i \delta(r-r_i, \theta-\theta_i) \sum_{j=1}^{N_i} \bar{\varphi} \Big|_{\substack{r=r_{ij} \\ \theta=\theta_{ij}}} = 0; \\ \bar{\varphi} \Big|_{r=1} = 0, \end{cases} \quad (6)$$

$$(7)$$

где $L[\varphi(t, r, \theta)] = \bar{\varphi}(s, r, \theta)$.

Для приближенного решения краевой задачи (6), (7) можно применить метод Галеркина [8]. Уравнение (6) перепишем в виде $F[\bar{\varphi}(s, r, \theta)] = 0$, где F — линейный оператор. За n -е приближение к решению краевой задачи примем функцию

$$\bar{\varphi}_n(s, r, \theta) = \sum_{i=0}^{n-1} b_i(s) \psi_i(r, \theta),$$

где $\psi_i(r, \theta), i=0, 1, 2, \dots$ — собственные функции самосопряженной краевой задачи

$$\begin{cases} \Delta \psi = -\lambda \psi; \\ \psi \Big|_{r=1} = 0. \end{cases}$$

Коэффициенты $b_k (k=0, 1, 2, \dots)$ определяются из условия ортогональности $F(\bar{\varphi}_n)$ к функциям ψ_k в области $\Omega = (0 \leq r \leq 1, 0 \leq \theta \leq 2\pi)$:

$$\int_0^{2\pi} \int_0^1 F(\bar{\varphi}_n) \psi_k r dr d\theta = 0, \quad k=0, 1, 2, \dots, n-1. \quad (8)$$

Уравнения (8) представляют собой линейную однородную алгебраическую систему относительно коэффициентов b_i :

$$\sum_{i=0}^{n-1} B_{ki} b_i = 0, \quad k=0, 1, 2, \dots, n-1,$$

где $B_{ki} = \int_0^{2\pi} \int_0^1 F(\psi_i) \psi_k r dr d\theta$.

Приравняв нулю детерминант этой системы, получаем приближенное характеристическое уравнение

$$|B_{ki}| = 0. \quad (9)$$

Как показал численный анализ, приемлемая точность в определении корней характеристического уравнения системы (1) — (3) достигается при учете 17 членов в разложении нейтронного потока по пространственным гармоникам, т.е. при $\max k = \max i = 16$ в уравнении (9). Исследуя корни уравнения (9), можно получить достаточно полную информацию о качественном влиянии параметров САР на устойчивость стационарного режима реактора.

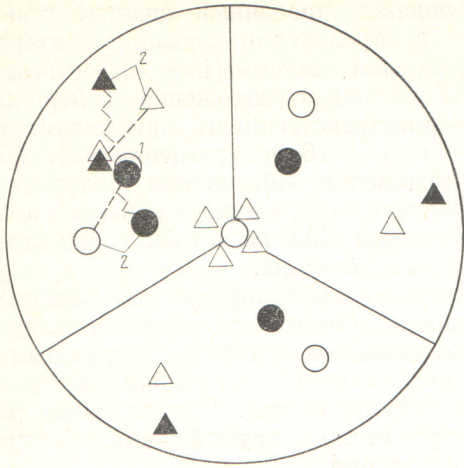
При решении задач оптимизации возникает вопрос о выборе критерия оптимальности. В настоящем исследовании принята следующая схема поиска оптимального размещения средств измерения и регулирования. Ищется такое размещение, которое минимизирует функцию J , определяемую из уравнения

$$J = \max_i \operatorname{Re}(s_i), \quad i=1, 2, \dots, n,$$

где S_i — корни уравнения (9). Для автоматического поиска $\min J$ использовали метод локальных вариаций [9], реализованный на ЭВМ. Затем проведено исследование качества переходных процессов в системе с полученным расположением. К основным критериям качества в этом случае относится время затухания переходного процесса и точность поддержания средней мощности. Если качество регулирования удовлетворяет необходимым требованиям, то считается, что полученная система регулирования является оптимальной, в противном случае необходимо увеличить число регуляторов.

Три регулятора. При рассмотрении САР, построенной на основе трех регуляторов, считалось, что одному стержню соответствует один датчик. Известно [2], что САР с тремя локальными регуляторами способна стабилизировать реактор, неустойчивый без системы регулирования не более чем на трех гармониках.

В работах [4—7] показано, что для одномерного реактора стабилизирующие свойства САР существенно зависят от взаимного расположения датчиков и стержней. Естественно поэтому предположить, что подобное свойство присуще и рассматриваемой системе регулирования. Считая, что в каждой локальной зоне расположение стержней и датчиков имеет центральную симметрию, в качестве варьируемых параметров удобно выбрать координаты стержня r_1, θ_1 и датчика r_{11}, θ_{11} . Например, рассмотрим реактор с радиусом выравненного энергораспределения $R_1 = 0,7$. Примем коэффициент передачи $A_i = 30, i = 1, 2, 3$ и $\alpha = 20$. При данном α реактор без системы регулирования неустойчив на пяти гармониках. Исследуем, как меняются корни уравнения (9) в зависимости от $r_1, r_{11}, \theta_1, \theta_{11}$. Вследствие симметрии независимыми параметрами являются $r_1, r_{11}, \theta_{11} - \theta_1$.



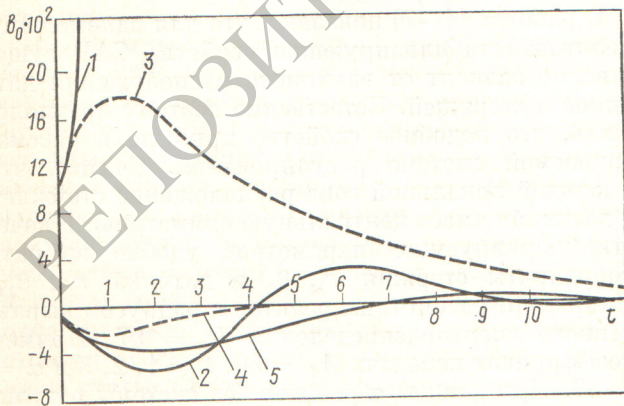
Р и с. 1. Поиск оптимального размещения средств измерения и регулирования методом локальных вариаций: ●, ▲ — три регулятора; ○, △ — четыре регулятора; ●, ○ — стержень; ▲, △ — датчик; 1 и 2 — начальная и конечная точки поиска соответственно

За начальное размещение выберем локальную систему регулирования:

$$r_1 = r_{11} = 0,6; \theta_{11} - \theta_1 = 0. \quad (10)$$

Решение уравнения (9) при данных параметрах дает три корня с положительной действительной частью. Разнесение датчиков и стержней по азимуту, т. е. изменение $\theta_{11} - \theta_1$, приводит к стабилизирующему эффекту: при $0,8 \leq \theta_{11} - \theta_1 \leq 1,25$ САР с тремя регулируемыми стержнями стабилизирует реактор, неустойчивый без системы регулирования на пяти гармониках.

Метод локальных вариаций позволяет минимизировать целевую функцию J . Последовательность поиска изображена на рис. 1. Заметим, что азимутальные траектории датчиков и стержней услов-



Р и с. 2. Изменение амплитуды нулевой гармоники при $\alpha = 20$ (—) и $\alpha = 6$ (---): 1, 3 — локальная САР с тремя регуляторами; 2, 4 — зонно-асимметричная САР с тремя регуляторами; 5 — зонно-асимметричная САР с четырьмя регуляторами

ны, так как независимым параметром является разность азимутальных углов $\theta_{11} - \theta_1$. Конечной точке поиска соответствует зонно-асимметричная система регулирования с параметрами $r_1 \approx 0,4$; $r_{11} \approx 0,9$; $\theta_{11} - \theta_1 \approx 0,8$.

Устойчивость системы регулирования является важной, но не единственной ее характеристикой. С практической точки зрения необходимо также рассматривать вопрос о качестве переходных процессов и о поддержании средней мощности в процессе регулирования. Проверку качества полученной зонно-асимметричной САР будем проводить в сравнении с локальной системой регулирования (10). Первоначально проиллюстрируем стабилизирующие свойства исследуемых вариантов взаимного расположения стержней и датчиков. Для этого рассмотрим реактор, неустойчивый без системы регулирования на пяти гармониках ($\alpha = 20$). Примем $A_i = 30$, $i = 1, 2, 3$ и введем возмущение по обратной связи вида

$$\Delta K_{o.c} = \sum_{i=0}^{n-1} \psi_i(r, \theta). \quad (11)$$

Характер поведения амплитуд гармоник хорошо выражен в изменении амплитуды нулевой гармоники. Для локальной системы регулирования (10) b_0 экспоненциально возрастает (кривая 1 на рис. 2). Это связано с тем, что данная система не контролирует неустойчивость на пяти гармониках. Зонно-асимметричная система стабилизирует рассматриваемую неустойчивость. При этом изменение амплитуды имеет вид затухающих колебаний (кривая 2 на рис. 2). Представляет интерес рассмотреть поведение амплитуды нулевой гармоники и в том случае, когда система регулирования (10) стабилизирует неустойчивый реактор ($\alpha = 6$). Из рис. 2 видно, что максимальное отклонение и время переходного процесса для зонно-асимметричной САР существенно меньше, чем для локальной системы регулирования.

При регулировании важно, чтобы полная мощность реактора поддерживалась с заданной точностью. В исследуемом случае вклад в полную мощность вносят лишь радиальные гармоники:

$$\int_0^{2\pi} \int_0^1 \varphi r dr d\theta = 2\pi \left(b_0 \int_0^1 \psi_0 r dr + b_5 \int_0^1 \psi_5 r dr + b_{14} \int_0^1 \psi_{14} r dr + \dots \right).$$

Характер поведения полной мощности для случая, изображенного на рис. 2, близок к изменению b_0 , т. е. зонно-асимметричная система регулирования поддерживает общую мощность с существенно большей точностью. Проведенный анализ показывает, что качество переходных процессов при регулировании реактора зонно-асимметричной системой регулирования, оптимизированной по

критерию $\min J$, намного лучше по сравнению с теми же характеристиками для случая локальной системы (10).

Четыре регулятора. Как и в предыдущем исследовании, будем считать, что одному стержню соответствует один датчик. При равномерном распределении стержней и датчиков по азимуту не удастся найти зонно-асимметричную систему регулирования, которая стабилизировала бы вторую азимутальную гармонику вида

$$R_{02} \cos 2\theta \text{ или } R_{02} \sin 2\theta. \quad (12)$$

Невозможность стабилизации этой гармоники объясняется тем, что в принципе допустима любая комбинация гармоник (12), и среди них всегда может быть такая, при которой отклонение параметров в точках расположения датчиков будет равняться нулю. Вместе с тем ранее построенная зонно-асимметричная САР с тремя регуляторами стабилизирует азимутальную гармонику (12), т. е. три регулятора, равномерно размещенных по азимуту в активной зоне, обладают лучшими стабилизирующими свойствами, чем четыре регулятора в тех же условиях. Естественно поэтому из четырех регуляторов один поставить в центр реактора, а остальные равномерно разместить по активной зоне. Локальная САР, построенная по этому принципу, не стабилизирует реактор, неустойчивый без системы регулирования более чем на трех гармониках. Введение асимметрии в размещение периферийных регулирующих и измерительных органов позволяет построить систему, стабилизирующую шесть неустойчивых гармоник. Метод локальных вариаций дает последовательность поиска (см. рис. 1). В этом случае к центральному стержню подключаются четыре датчика. Как указывалось выше, изменения θ_{11} и θ_1 условны. Конечная точка имеет такие координаты: $r_1 \approx 0,65$; $r_{11} \approx 0,7$; $\theta_{11} - \theta_1 \approx 1,4$; $r_{2i} \approx 0$, где r_{2i} — радиальная координата датчиков, подключенных к центральному стержню.

Изменение амплитуды нулевой гармоники при $\alpha = 20$, $A_i = 30$, $i = 1, 2, 3, 4$ и возмущении (11) изображено на рис. 2. (кривая 3). Переходный процесс по качеству не уступает процессу, показанному на рис. 2 (кривая 2). Причем максимальное по модулю отклонение амплитуды нулевой гармоники для САР с четырьмя регуляторами меньше, чем для САР с тремя регуляторами. Отметим следующую особенность, которая вытекает из приведенного исследования: при построении асимметричных систем регулирования со стержнем в центре активной зоны рекомендуется на периферии располагать нечетное число регуляторов. В заключение заметим, что хотя в данном исследовании рассмотрено подключение к

одному стержню одного датчика, все качественные результаты настоящей работы и методика поиска оптимальной структуры справедливы и при подключении к стержню большего числа датчиков.

Выводы. При синтезе САР двумерного реактора использование сочетания принципов зонности и асимметрии, заключающееся в разбиении реактора на зоны и пространственном разнесении средств измерения и регулирования в каждой зоне, улучшает характеристики системы регулирования. При этом для полного использования всех благоприятных свойств такой системы необходима оптимизация взаимного размещения стержней и датчиков в выделенных зонах.

Разработанная методика автоматического поиска оптимальной конфигурации взаимного расположения стержней с помощью ЭВМ обеспечивает удовлетворительные эксплуатационные свойства найденных САР с точки зрения как стабилизации, так и качества переходных процессов.

Построенная на этой основе зонно-асимметричная САР с тремя регуляторами способна стабилизировать реактор, неустойчивый без системы регулирования на пяти гармониках. При этом обеспечивается удовлетворительное качество переходных процессов по времени регулирования и поддержанию полной мощности.

При построении асимметричных САР с центральным стержнем необходимо на периферии располагать нечетное число стержней, что значительно повышает стабилизирующие свойства системы регулирования.

Разработанный подход может быть использован также и при синтезе систем регулирования энергораспределением по объему реактора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Емельянов И. Я., Гаврилов П. А., Селиверстов Б. Н. Управление и безопасность ядерных энергетических реакторов. М., Атомиздат, 1975.
2. Хитчок А. Устойчивость ядерных реакторов. М., Госатомиздат, 1963.
3. Wiberg D. «Nucl. Sci. Engng», 1967, v. 27, p. 600.
4. Постников И. С., Сабаев Е. Ф. «Атомная энергия», 1969, т. 26, вып. 1, с. 56.
5. Емельянов И. Я. и др. «Атомная энергия», 1979, т. 46, вып. 2, с. 82.
6. Афанасьев А. М., Торлин Б. З. В кн.: Вопросы атомной науки и техники. Сер. Динамика ядерных энергетических установок. Вып. 1 (7). М., изд. ЦНИИАтоминформ, 1975, с. 65.
7. Афанасьев А. М., Торлин Б. З. «Атомная энергия», 1977, т. 43, вып. 4, с. 243.
8. Горяченко В. Д. Методы исследования устойчивости ядерных реакторов. М., Атомиздат, 1977.
9. Сеа Ж. Оптимизация. Теория и алгоритмы. М., «Мир», 1973.

Поступила в Редакцию 08.01.79