

ние в значениях k_W уменьшилось с 26,3 до 5,7%; σ_2 уменьшилось с 0,259 до 0,081 МВт, а $\sigma_{\text{макс}}$ — с 32,0 до 16,1%. Таким образом, корректировка значений E_{ij} в рамках существующей расчетной модели существенно улучшает результаты физического расчета РБМК.

Для подтверждения правильности сделанных предположений о E_{ij} выполнен расчет того же блока Курской АЭС на 6 марта 1979 г. с учетом коррекции E_{ij} , проведенной по состоянию реактора на 3 ноября 1978 г. В результате расхождение в k_W уменьшилось с 22,1 до 8,0%, σ_2 с 0,284 до 0,148 МВт, а $\sigma_{\text{макс}}$ с 33,1 до 23,7% (полученные значения эффективности корректировки зависят от выбора ε_2 на предыдущем этапе). Следует заметить, что между корректировками прошло ~ 4 мес. Для более коротких интервалов результаты корректировки выглядят эффективнее.

Для уменьшения существующих расхождений между результатами расчетов и показаниями системы СКАЛА проведена дополнительная корректировка расчета, связанная с устранением неточностей определения положения стержней h_K . Предполагалось, что у стержней регулирования существует люфт, равный $\Delta h_K = \pm 0,2$ м. Истинное положение $\bar{h}_K$ стержней выбиралось таким образом, чтобы сумма значений k_T^p у прилегающих к стержню ТВС стремилась к соответствующей сумме значений k_T^a . Значение k_W (см. таблицу) практически не изменилось при уточнении глубины погружения стержней $\bar{h}_K$. Наблюдаются небольшие ($\sim 1\%$) уменьшения σ_2 и $\sigma_{\text{макс}}$.

Для устранения возможных неопределенностей в загрузке поглотителя в стержнях регулирования проведена корректировка ядерных концентраций ^{10}B ρ_B . Новые значения ρ_B выбираются из условия, аналогичного описанному выше. При этом σ_2 (см. таблицу) уменьшилась до 0,045 МВт, а $\sigma_{\text{макс}}$ — до 10,8%.

Если анализ расхождений k_T (при коррекции h_K или ρ_B) проводить не по суммам значений k_T

у прилегающих к стержню ТВС, а по значению k_T в той ТВС данной полячейки, в которой расположен датчик, то результаты расчетов улучшаются: $\sigma_2 = 0,038$ МВт, $\sigma_{\text{макс}} = 5,2\%$. Это можно объяснить особенностями алгоритма восстановления поля энерговыделения, используемого в системе централизованного контроля РБМК (в программе ПРИЗМА). Восстановление поля энерговыделения в ПРИЗМЕ проводится по показаниям датчиков, расчетным значениям поля энерговыделения и некоторым интерполяционным коэффициентам, полученным из метода статистической интерполяции [4]. Поэтому коррекция значений k_T в ТВС с датчиками позволяет улучшить совпадение полей энерговыделения не только в этих ТВС, но и в ТВС без датчиков.

Введение таким образом скорректированного расчета W_{ij} в систему дискретного контроля поля энерговыделения в РБМК позволит уменьшить погрешности в определении поля энерговыделения по совокупности расчетных и экспериментальных данных и повысить достоверность определения теплотехнической надежности активной зоны реактора. Пользуясь результатами этой корректировки, можно существенно улучшить точность расчета в последующее после корректировки время. Отметим, что на проведение трех последовательных корректировок (E_{ij} , h_K и ρ_B) затрачивается около 20 мин счетного времени на ЭВМ ЕС-1033.

Авторы благодарят В. П. Борщева за помощь в освоении программы физического расчета РБМК.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Емельянов И. Я. и др. Атомная энергия, 1976, т. 40, вып. 2, с. 127.
2. Емельянов И. Я. и др. Там же, 1973, т. 34, вып. 2, с. 75.
3. Емельянов И. Я., Постников В. В., Юркин Г. В. Там же, 1976, т. 44, вып. 5, с. 299.
4. Доллежал Н. А., Емельянов И. Я. Канальный ядерный энергетический реактор. М., Атомиздат, 1980, с. 114.

Поступила в Редакцию 11.12.79

УДК 621.039.515

Гармоническое регулирование мощности энергетического реактора

ПОТАПЕНКО П. Т.

Для анализа реактора как объекта управления эффективно применяется метод гармоник [1–5]. В настоящей статье предлагаются системы регулирования гармоник.

Передаточные функции гармоник. Гармониками кратко называют ортонормированные собственные функции $f_i(\mathbf{r})$, удовлетворяющие уравнению

$$\nabla^2 f_j + B^2 f_j + \alpha_j^2 f_j = 0 \quad (1)$$

и нулевым граничным условиям в пределах объема реактора V . В уравнении (1) α_j^2 — собственные числа; $B^2 = (K - 1)/M^2$ — материальный пара-

метр реактора в стационарном состоянии; K — коэффициент размножения; M^2 — площадь миграции нейтронов.

При регулировании вследствие малости отклонений от стационарного режима допустимо пользоваться линеаризованными уравнениями

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} = \frac{k\varphi}{\tau} + \frac{K-1}{\tau} \varphi + \frac{M^2}{\tau} \nabla^2 \varphi - \sum_{i=1}^6 \frac{\partial c_i}{\partial t}; \quad (2)$$

$$\partial c_i / \partial t = \beta_i \varphi / \tau - \lambda_i c_i, \quad i = 1, 2, \dots, 6. \quad (3)$$

Здесь Φ — стационарное распределение нейтронов; φ и k — соответствующие отклонения от Φ и K ; τ — время жизни нейтронов.

Нулевая (фундаментальная) гармоника f_0 с точностью до амплитудного множителя $\tilde{\Phi}$ совпадает со стационарным распределением Φ (при этом $\alpha_0^2 = 0$):

$$\Phi(\mathbf{r}) = \tilde{\Phi} f_0(\mathbf{r}). \quad (4)$$

Разложим переменные в ряды по гармоникам:

$$\varphi(\mathbf{r}, t) = \sum_{j=0}^{\infty} \varphi_j(t) f_j(\mathbf{r}); \quad (5)$$

$$k f_0 = \sum_{j=0}^{\infty} k_j(t) f_j(\mathbf{r}), \quad (6)$$

где амплитудные коэффициенты разложения входного сигнала

$$k_j(t) = \int_V k(\mathbf{r}, t) f_0(\mathbf{r}) f_j(\mathbf{r}) d\mathbf{r} \quad (7)$$

и выходного сигнала

$$\varphi_j(t) = \int_V \varphi(\mathbf{r}, t) f_j(\mathbf{r}) d\mathbf{r}. \quad (8)$$

Для реакторов наиболее весомы и важны несколько первых гармоник (см. таблицу).

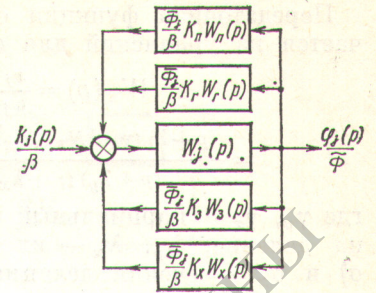
Передающая функция гармоник связывает входные и выходные сигналы. Она определяется [5] из уравнений (1)–(8) в виде

$$W_j(p) = \frac{\varphi_j(p)/\tilde{\Phi}}{k_j(p)/\beta} = \frac{\beta}{\tau p \left[1 + \sum_{i=1}^6 \frac{\beta_i}{\tau(p + \lambda_i)} \right] + \alpha_j^2 M^2} \quad (9)$$

или с учетом одной эффективной группы запаздывающих нейтронов:

$$W_j(p) = \frac{\varphi_j(p)/\tilde{\Phi}}{k_j(p)/\beta} = K_j \frac{T_0 p + 1}{(T_j p + 1)(T'_j p + 1)}; \quad (10)$$

Рис. 1. Структурная схема обратных связей для j -гармоники



$$K_j = \beta / \alpha_j^2 M^2; \quad T_0 = 1/\lambda; \quad T_j = T_0(1 + K_j); \quad T'_j = \tau / (\beta + \alpha_j^2 M^2). \quad (11)$$

Для РБМК $\alpha_{010} M^2 \approx \beta$; для ВВЭР-1000 $\alpha_{001} M^2 \approx 1,5 \beta$. В равенствах (10), (11) учтено, что $\tau \lambda \ll \alpha_j^2 M^2$.

Обратные связи и устойчивость распределения нейтронов. В качестве передаточных функций объекта управления для гармонических регуляторов используются передаточные функции соответствующих гармоник с учетом обратных связей по температуре топлива и замедлителя, эффекту отравления и паросодержанию для кипящих реакторов (рис. 1). На схеме W_x, W_a, W_r, W_n — передаточные функции, связывающие отклонения от стационарных значений соответственно концентрации ксенона x , температуры замедлителя и топлива, паросодержания с вызвавшими их отклонениями φ распределения нейтронов; K_x, K_a, K_r, K_n — коэффициенты реактивности, связывающие на данном уровне мощности отклонения k с вызвавшими их отклонениями перечисленных параметров;

$$\bar{\Phi}_j = \int_V \Phi(\mathbf{r}) f_j^2(\mathbf{r}) d\mathbf{r} \quad (12)$$

— значение, близкое к среднему по реактору значению плотности нейтронного потока.

Терминология гармонического регулирования

Название гармоники, обозначение	Размерность сигналов, необходимое количество регуляторов	Входной сигнал объекта	Выходной сигнал объекта
Фундаментальная f_{000}	1 (скаляр)	Реактивность $\rho = \int_V k f_{000}^2 d\mathbf{r}$	Мощность $N = \int_V \tilde{\Phi} f_{000} d\mathbf{r}$
Первая азимутальная f_{010}	2 (вектор)	$w = w_x + w_y = \int_V k f_{000} f_{010} d\mathbf{r}$	$\mathcal{W} = \mathcal{W}_x + \mathcal{W}_y = \int_V \varphi f_{010} d\mathbf{r}$
Первая высотная f_{001}	1 (скаляр)	$w = \int_V k f_{000} f_{001} d\mathbf{r}$	$\mathcal{W} = \int_V \varphi f_{001} d\mathbf{r}$
Вторая азимутальная f_{020}	2 (вектор)	$q = q_x + q_y = \int_V k f_{000} f_{020} d\mathbf{r}$	$Q = Q_x + Q_y = \int_V \varphi f_{020} d\mathbf{r}$

Передаточная функция отравления W_x получается из уравнений для отравления [1,2]

$$W_x(p) = \frac{x_j(p)}{\Phi_j(p)} = \frac{(p+\lambda)(\gamma_x \sigma_j^5 N_5 - \sigma_x \bar{X}_j) + \gamma_y \sigma_j^5 N_5}{(p+\lambda_y)(p+\lambda_x + \sigma_x \bar{\Phi}_j)}, \quad (13)$$

где γ_y, γ_x — парциальный выход иода и ксенона на деление; λ_y, λ_x — их постоянные распада; σ_j^5 и σ_x — сечения деления ^{235}U и поглощения ксенона; N_5 — концентрация ^{235}U ;

$$\bar{X}_j = \int_V \frac{(\gamma_x + \gamma_y) \Phi(r) \sigma_j^5 N_5}{\sigma_x \Phi(r) + \lambda_x} f_j^2 dr. \quad (14)$$

Для РБМК обычно паровой и температурный эффекты топлива учитывают общей передаточной функцией как суммарный быстрый мощностной эффект реактивности:

$$W_0(p) = \frac{k(p)}{\Phi(p)} = \frac{K_0}{T_0 p + 1}. \quad (15)$$

Из анализа системы на рис. 1 следуют условия устойчивости [3] и необходимые для проектирования гармонических регуляторов передаточные функции объекта. Так, в РБМК все субгармоники по быстрым процессам устойчивы, а положительный коэффициент реактивности по температуре графита приводит к неустойчивости. Тогда из схемы рис. 1 можно получить выражение для периода экспоненциального развития субгармоник, обусловленного аperiodической мощностной обратной связью по замедлителю с коэффициентом K_3 и постоянной времени T_3 (рис. 2):

$$T_j \approx \frac{T_3 (\alpha_j^2 M^2 - K_0 \bar{\Phi}_j)}{(K_0 + K_3) \bar{\Phi}_j - \alpha_j^2 M^2}. \quad (16)$$

Пороговая величина быстрого мощностного коэффициента реактивности, когда первая азимутальная гармоника находится на границе устойчивости даже без учета эффектов реактивности замедлителя и отравления, составляет

$$K_0 \bar{\Phi}_{010} = \alpha_{010}^2 M^2, \quad (17)$$

передаточная функция

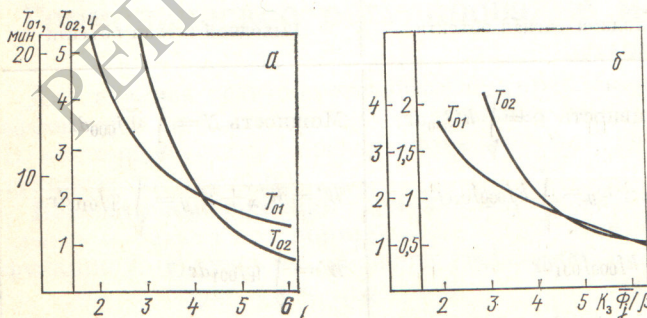


Рис. 2. Периоды развития первой T_{01} и второй T_{02} азимутальных гармоник для РБМК при $K_M \bar{\Phi}_j = 0,5 \beta$ (а) и $K_M \bar{\Phi}_j = \beta$ (б)

$$W_{010}(p) = \frac{\mathcal{W}(p)/\bar{\Phi}}{w(p)/\beta} = \frac{T_0 p + 1}{2 T_0 p \left(\frac{\tau}{2\beta} p + 1 \right)}, \quad (18)$$

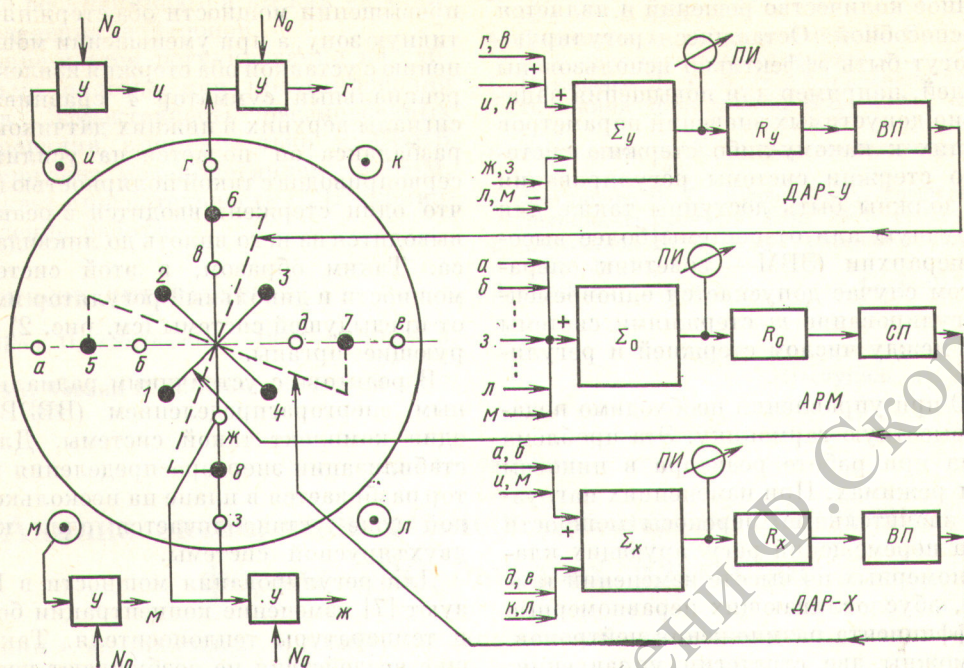
а $T_{010} \approx \sqrt{2 T_0 T_3 \beta / k_3 \bar{\Phi}_j}$. В этом случае с учетом эффекта графита T_{010} составляет несколько минут. При этом реактор может находиться в стационарном состоянии, если не только ρ , но и w (см. таблицу) равны нулю (скомпенсированы).

При анализе условий возникновения ксеноновых колебаний в ВВЭР-1000 эффекты реактивности топлива и замедлителя можно считать безынерционными. Тогда из рис. 1 и формул (11) и (13) получаем условие устойчивости:

$$\alpha_j^2 M^2 \geq (K_0 + K_3) \bar{\Phi}_j + \frac{K_x \bar{\Phi}_j (\sigma_x \bar{X}_j - \gamma_x \sigma_j^5 N_5)}{\lambda_y + \lambda_x + \sigma_x \bar{\Phi}_j}, \quad (19)$$

известное как критерий Рэндала — Джона [1]. При этом, как показано в работе [2], условия устойчивости субгармоник существенно зависят от положения стержней автоматического регулятора мощности (АРМ).

Системы регулирования гармоник. Традиционный АРМ является системой регулирования фундаментальной (нулевой) гармоники. Предлагаемая [6] система (рис. 3) является естественным распространением идеи гармонического регулирования на первую азимутальную гармонику, определяющую динамику распределения нейтронов РБМК с АРМ [4]. В этом случае наряду с АРМ с регулирующим органом в виде связки стержней 1—4, перемещаемых синхронизированными приводами (СП), предусматриваются так называемые дипольные автоматические регуляторы (ДАР), у которых регулирующими органами служат связки (диполи) стержней 6 и 8 для ДАР-У и 5 и 7 для ДАР-Х (см. рис. 3). Стержни диполя в номинальном положении погружены в реактор наполовину, а при работе перемещаются навстречу друг другу с одинаковой скоростью в зависимости от величины и знака дипольной ошибки. Система имеет задатчик, вырабатывающий опорный сигнал — установку N_0 для каждого из внутриреакторных (а, б, ..., з) и вне реакторных (и, к, л, м) датчиков, сигналы которых подаются на вход сумматоров Σ . Каждый датчик имеет усилитель сигнала ошибки, на входе которого сигнал датчика сравнивается с уставкой. Сумматор Σ_0 АРМ суммирует все разбалансы. Дифференциальные сумматоры Σ_y и Σ_x ДАР, сравнивая мощности половин реактора, разделенных осями Х — Х и У — У, вычисляют составляющие $\mathcal{W}_y$ и $\mathcal{W}_x$ (см. таблицу). Подключение к выходам Σ_y и Σ_x активных фильтров с передаточными функциями W_{010}^{-1} [см. уравнение (10)] обеспечивает на их выходе вычисление составляющих w_y и w_x . При проектировании объекта регулирования для дипольных регуляторов описы-



Р и с. 3. Система регулирования радиально-азимутального распределения нейтронов: 1—8 — регулирующие стержни; $\odot$, $\ominus$ — внутриреакторные и вне реакторные датчики; Y — усилители ошибки; N_0 — сигнал задатчика мощности; — сумматоры; ПИ — пультывные индикаторы; R — регуляторы; СП и ВП — синхронизированные и встречно-синхронизированные приводы

вается передаточной функцией $W_{010}(p)$ [см., например, формулу (18)], а для АРМ — передаточной функцией $W_{000}(p)$. Все три системы рассматриваются как независимые, поскольку при работе ДАР практически не вносятся реактивность, а АРМ не оказывает воздействия на первую азимутальную гармонику. Современные реакторы имеют цифровой ввод в ЭВМ положения стержней. Поэтому алгоритмы согласной синхронизации стержней АРМ и встречной синхронизации стержней ДАР целесообразно реализовать на ЭВМ.

При использовании в ДАР вместо стержней каналов с жидким или газообразным поглотителем нейтронов такие каналы одного диполя соединяют линией с реверсивным насосом, перекачивающим жидкий или газообразный поглотитель из одного канала в другой или обратно в зависимости от полярности W .

В описываемой системе для управления восемью стержнями используются три гармонических регулятора с нейтронными датчиками и пять регуляторов положения стержней (два регулятора положения стержней ДАР и три регулятора, синхронизирующих положение трех стержней АРМ с четвертым). Общее число независимых регуляторов (уравнений) должно быть меньше или равно числу стержней. Чем больше из этого числа приходится на долю регуляторов гармоник, тем выше

точность регулирования распределения нейтронного поля.

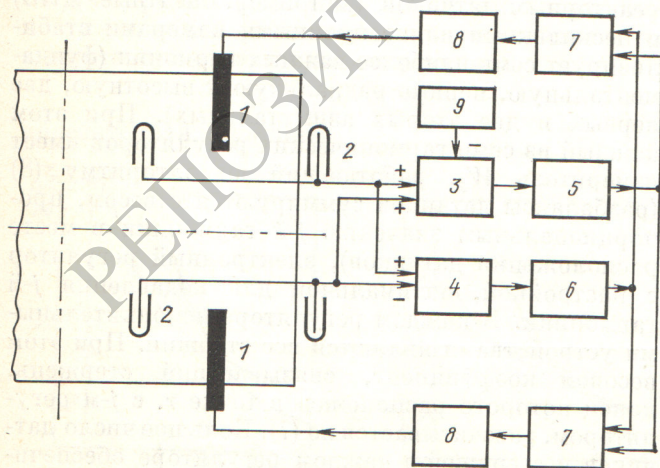
Регулирующие органы и датчики при гармоническом регулировании размещаются равномерно по реактору. Так, система с семью стержнями (1 — в центре, 3 — на верхнем и 3 на нижнем «этажах» поочередно), с двумя этажами внутриреакторных датчиков (например, штатные ДПЗ) и несколькими ионизационными камерами стабилизирует семь наиболее важных гармоник (фундаментальную, первые радиальную и высотную, две первых и две вторых азимутальных). При этом каждый из семи гармонических регуляторов имеет измеритель W_j , работающий по алгоритму (8) (разбалансы датчиков суммируются с весом, пропорциональным значению j -й гармоники в месте расположения датчиков), электронный регулятор с настройкой, оптимальной для подавления j -й гармоники. В каждом регуляторе исполнительными устройствами являются все стержни. При этом весовой коэффициент, связывающий стержень, конец которого расположен в точке r , с j -м регулятором, рассчитывается по (7). Большое число датчиков и стержней в каждом регуляторе обеспечивает высокую эффективность использования, элементное резервирование и надежность системы.

Система с общим числом регуляторов (уравнений), меньшим числа регулирующих органов,

имеет бесконечное количество решений и является вполне работоспособной. Оставшиеся регулирующие органы могут быть эффективно использованы для других целей, например для повышения запасов до предельно допустимых значений параметров ТВС, ближайших к какому-либо стержню системы. Для этого стержни системы регулирования одновременно должны быть доступны также для управления вручную или от системы более высокого уровня иерархии (ЭВМ — советчик оператора) [6]. В этом случае допускается одновременное ручное регулирование m стержнями системы (m — разность между числом стержней и регуляторов).

В ВВЭР-1000 при управлении необходимо подавать первую высотную гармонику. Эта проблема особенно важна при работе реактора в пиковом и полупиковом режимах. При изменениях нагрузки возможны значительные перекосы мощности по высоте из-за перемещений регулирующих кластеров и неравномерных по высоте изменений температуры воды, обусловливающих неравномерные изменения коэффициента размножения нейтронов. При этом возможны две стратегии управления: 1) осуществлять изменение мощности так, чтобы не возбуждать первой высотной гармоники; 2) возмущения по первой высотной гармонике, вносимые АРМ при изменении мощности, подавлять, например, дипольными (высотными) регуляторами. Первая стратегия приемлема лишь при устойчивом высотном энергораспределении.

Регулятор работает следующим образом (рис. 4). При наличии сигнала разбаланса между уставкой мощности от задатчика 9 и сигналом мощности от всех датчиков 2 усилитель ошибки 5 подает сигнал на усилители мощности сервоприводов 8. Полярность и коммутация этого сигнала таковы, что при



Р и с. 4. Система трехмерного регулирования энергораспределения: 1 — стержни; 2 — датчики; 3, 4 — сумматоры; 5, 6 — регуляторы; 7 — усилители мощности; 8 — сервоприводы; 9 — задатчик

превышении мощности оба стержня вводятся в активную зону, а при уменьшении мощности по сравнению с уставкой оба стержня извлекаются. Дифференциальный сумматор 4 сравнивает суммарные сигналы верхних и нижних датчиков. При наличии разбаланса он подается на усилители мощности сервоприводов с такой полярностью и коммутацией, что один стержень вводится в реактор, а другой выводится из него вплоть до ликвидации разбаланса. Таким образом, в этой системе регулятор мощности и дипольный регулятор имеют в отличие от предыдущей системы (см. рис. 2) общие регулирующие органы.

В реакторе с устойчивым радиально-азимутальным энергораспределением (ВВЭР) достаточен один комплект такой системы. Для трехмерной стабилизации энергораспределения в РБМК реактор разбивается в плане на несколько зон, и в каждой зоне устанавливается один комплект этой двухъярусной системы.

Для регулирования мощности в ВВЭР используют [7] изменение концентрации борной кислоты и температуры теплоносителя. Такие управляющие воздействия не возбуждают первой высотной гармоники. Однако из-за недостаточного быстрого действия этих средств в переходных режимах приходится также перемещать и кластеры, принимая меры к подавлению первой высотной гармоники. К этим мерам относится оснащение реакторов двухъярусными ионизационными камерами, приборами для измерения первой высотной гармоники, к которым подключены фильтры Калмана, измеряющие сигналы обратных связей по реактивности, обусловленных отравлением [7]. Такое оборудование позволяет оптимально по быстрдействию подавлять возмущения по первой высотной гармонике с учетом реальных ограничений, с использованием, например, принципа максимума Понтрягина [7].

Изложенный выше метод обеспечивает более высокую точность и надежность регулирования распределения нейтронов (или энергораспределения), чем метод, описанный в работах [8, 9]. Последний можно назвать полугармоническим: в нем датчиками регуляторов являются измерители гармоник, а регулирующие органы являются локальными, индивидуальными, а не распределенными, общими для всех регуляторов. Выход из строя одного органа в гармоническом регуляторе, в отличие от полугармонического регулятора, не приводит к его отказу.

При включенной системе регулирования, содержащей АРМ и два ДАР, период развития деформаций энергораспределения для РБМК составляет ~ 1 ч и обусловлен неустойчивой второй азимутальной гармоникой (см. рис. 2). Как показала практика эксплуатации РБМК [4], столь медленно развивающиеся деформации не вызывают у оператора никаких затруднений при управ-

лении и даже не воспринимаются им как неустойчивость распределения нейтронов.

Распространение систем регулирования на субгармоники весьма полезно при проектировании СУЗ реакторов. Эффективность рассмотренных систем регулирования применительно к РБМК и ВВЭР подтверждена моделированием на ЭВМ.

Автор выражает признательность Е. В. Филиппу за обсуждение работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Randall D., Jhon D. «Nucleonics», 1958, v. 16, N 3, p. 82.
2. Афанасьев А. М., Торлин Б. З. Атомная энергия, 1977, т. 43, вып. 4, с. 243.

3. Будников В. И. и др. Атомная энергия, 1978, т. 45, вып. 5, с. 331.
4. Доллежал Н. А., Емельянов И. Я. Канальный ядерный энергетический реактор. М., Атомиздат, 1980.
5. Потапенко П. Т. В кн.: Управление ядерными энергетическими установками. Вып. 4. М., Атомиздат, 1970, с. 5.
6. Емельянов И. Я. и др. Атомная энергия, 1978, т. 44, вып. 6, с. 483.
7. Потапенко П. Т., Дунаев В. Г., Тимохин Е. С. Атомная техника за рубежом, 1979, № 5, с. 3.
8. Емельянов И. Я. и др. Атомная техника за рубежом, 1978, № 10, с. 3.
9. Stark K. Automatica, 1976, v. 12, p. 613.

Поступила в Редакцию 14.03.80

УДК 621.039.534.23

Анализ экспериментальных данных об изменении формы ТВС быстрых реакторов

ПРОШКИН А. А., ЛИХАЧЕВ Ю. И., ТУЗОВ А. Н., ЗАБУДЬКО Л. М., ВОНДАРЕНКО В. В., КАРАУЛОВ В. Н.

Изучение отдельных свойств конструкционных и делящихся материалов и общих закономерностей поведения ТВС быстрых реакторов может происходить по двум направлениям.

1. Постановка внутриреакторных экспериментов по исследованию необходимых свойств материалов на опытных образцах (так называемые «чистые» эксперименты). Это направление обеспечивает наиболее глубокое изучение различных физических процессов и механизмов явлений в материалах, но связано со значительными экспериментальными трудностями при достижении флюенса более 10^{23} нейтр./см² и выгорания свыше 5% тяжелых атомов. Кроме того, этот путь не позволяет, как правило, проследить взаимное влияние многих факторов, действующих в реальных конструкциях ТВС.

2. Обработка результатов радиационных испытаний экспериментальных ТВС, а также данных об изменении формы штатных ТВС быстрых энергетических реакторов. Этот подход основывается на использовании аппарата математической статистики для высокоэффективной обработки результатов массовых наблюдений, например методом максимального правдоподобия, методом моментов и т. п.

Оба направления, разумеется, не являются взаимоисключающими, а дополняют друг друга.

Обработка экспериментальных данных по работоспособности твэлов. Методика интерпретации экспериментов основана на известном статистическом методе максимального правдоподобия [1]. Сущность метода состоит в подборе исходных параметров, минимизирующих расхождение экспе-

риментальных и расчетных полей; при этом максимизируется эффективность такой интерпретации с учетом случайного компонента.

Результаты наблюдений U_k представляют собой сумму расчетного компонента $f_k(\rho)$ (который предполагается известным с точностью до неизвестных параметров) и случайного компонента n_k . Вся совокупность наблюдений разбита на k групп ($k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm K$); наблюдения в пределах k -й группы нумеруются индексом i ($i = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, I_k$). При этом принимается, что случайные векторы n_k модели экспериментального материала распределены нормально. Так как функциональные зависимости $f_k(\rho)$ предполагаются известными, задача состоит в нахождении по экспериментальным данным U_k параметров ρ_s ($s = 1, 2, \dots, S$). На практике обычно максимизируют логарифм функции правдоподобия:

$$\ln L(\rho) = \lambda(\rho) = -\frac{1}{2} \sum_{k=-K}^K \{ [U_k - f_k(\rho)] R_k^{-1} \times \\ \times [U_k - f_k(\rho)] + \ln |R_k| + (2I_k + 1) \ln 2\pi \}, \quad (1)$$

где R_k — матрица вторых моментов распределения вероятностей вектора n_k ; $|R_k|$ — определитель этой матрицы; R_k^{-1} — обратная матрица вторых моментов; $[U_k - f_k(\rho)]$, $[U_k - f_k(\rho)]$ — вектор-строка, вектор-столбец значений случайного компонента модели соответственно. При s -оцениваемых параметрах определение «истинных» оценок