

СТАТЬИ

УДК 658.5

АВТОМАТИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТАНТ И САМОАТТЕСТАЦИЯ АЛГОРИТМОВ СПЕЦИАЛЬНОГО МАТЕМАТИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ СИСТЕМЫ СКАЛА-микро РБМК-1000 В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ

*Александров С.И., Дмитренко В.В., Постников В.В., Свириденков А.Н., Юркин Г.В., Якунин И.С.
(НИКИЭТ им. Н.А. Доллежалея)*

Повышение точности контроля распределения энерговыделения, как известно [1], приводит к увеличению коэффициентов запаса до пределов безопасной эксплуатации активной зоны РБМК-1000 по кризису теплообмена и линейной мощности твэлов, снижению истинного и измеряемого коэффициента радиальной неравномерности энерговыделения и в отдельных случаях является необходимым условием выхода реактора на номинальную мощность после длительного останова, например, после капитального ремонта [2]. Кроме того, оно создает дополнительные возможности для оптимизации радиального распределения энерговыделения. Повышение точности контроля достигается, в основном, за счет индивидуальной градуировки внутриреакторных детекторов, а также уточнения констант и зависимостей, используемых в программах специального математического обеспечения. Градуировка обычно осуществляется на основе периодического сканирования активной зоны калибровочными гафниевыми детекторами Дт-6 [1] и (или) калибровки образцов-свидетелей для каждого внутриреакторного детектора на ИРТ-2000 (МИФИ), вводимой в последнее время в практику эксплуатации.

Важной функцией системы СКАЛА-микро является оценка погрешности контроля энерговыделения каждой ТВС, непосредственно влияющей на коэффициент запаса до предела безопасной эксплуатации. Периодическая метрологическая аттестация алгоритма оценки проводится на основе результатов сканирования с использованием критерия Фишера. Наряду с этим на РБМК-1000 введены автоматическая оптимизация части констант специального математического обеспечения и самоаттестация погрешности восстановления распределения

энерговыделения посредством математической обработки данных о реальном состоянии активной зоны, также повышающие точность контроля.

В настоящей статье сравниваются результаты оптимизации констант, получаемые на основе сканирования и путем обработки информации о текущих параметрах активной зоны РБМК-1000.

В первом случае определяется отношение мощности W_i^n i -й ТВС, рассчитанной по программе «Призма-М» системы СКАЛА-микро, к мощности W_i^{ck} , полученной при сканировании ТВС гафниевым детектором Дт-6. Затем рассчитываются отношения K_i мощностей W_i^n и W_i^{ck} , среднее отношение $\bar{K}$ и выбранным методом оптимизации определяются параметры, обеспечивающие минимум дисперсии:

$$D_{ck} = \frac{1}{N_{ck} - 1} \frac{1}{\bar{K}^2} \left[\sum_{i=1}^{N_{ck}} (K_i - \bar{K})^2 \right] \rightarrow \min, \quad (1)$$

где N_{ck} — число сканируемых ТВС.

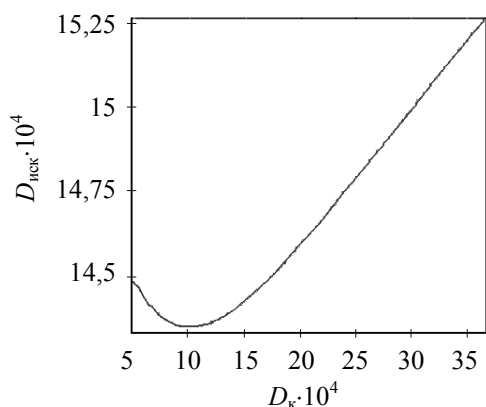
Во втором случае рассчитывается отношение K_i^* мощности i -й ТВС с внутриреакторным детектором, восстановленной по программе «Призма-М» при исключении из расчета сигнала этого детектора, к мощности, вычисленной непосредственно по его сигналу. Далее рассчитываются коэффициенты K_i^* с поочередным исключением из процедуры восстановления по программе «Призма-М» мощностей всех ТВС с внутриреакторными детекторами N_d , средние коэффициенты $\bar{K}_i^*$ и затем согласно уравнению

(1) искомые параметры с заменой K_i , $N_{\text{ск}}$ и $D_{\text{ск}}$ соответственно на K_i^* , N_d и $D_{\text{иск}}$.

В тестовых расчетах число оптимизируемых параметров достигало семи, однако окончательно для автоматизированной оптимизации в системе СКАЛА-микро были выбраны пять параметров, существенно влияющих на дисперсию при сканировании $D_{\text{ск}}$, а также последовательном исключении $D_{\text{иск}}$ и претерпевающих заметные изменения в процессе эксплуатации, особенно при изменениях соотношения загрузки в реактор ТВС различных типов — дисперсия погрешности калибровки внутриреакторных детекторов D_k , номинальные градуировочные коэффициенты $K_{24}^{\text{ном}}$ и $K_{26}^{\text{ном}}$ для ТВС обогащением 2,4 и 2,6%, коэффициенты чувствительности линий связи внутриреакторных детекторов аксиального контроля и самих внутриреакторных детекторов $C_{\gamma}^{\text{лс}}$ и $C_{\gamma}^{\text{д}}$ к γ -излучению. Следует отметить, что согласно расчетному моделированию программа «Призма-М» обеспечивает минимальную погрешность восстановления при истинном значении дисперсии калибровки D_k (рис. 1).

В исследованиях при выборе метода оптимизации для решения задачи (1) рассматривали метод наименьших квадратов с линеаризацией в последовательных итерациях, методы покоординатного спуска, ортонормальных направлений (или метод Розенброка), деформируемого многогранника (или метод Нелдера и Мида) [3]. Метод наименьших квадратов хотя и снижал дисперсию при сканировании и последовательном исключении, но уступал в этом отношении остальным, по-видимому, из-за попадания в локальные минимумы целевой функции.

Сопоставление результатов, полученных



Р и с. 1. Характерная зависимость дисперсии при исключении калибровки внутриреакторных детекторов

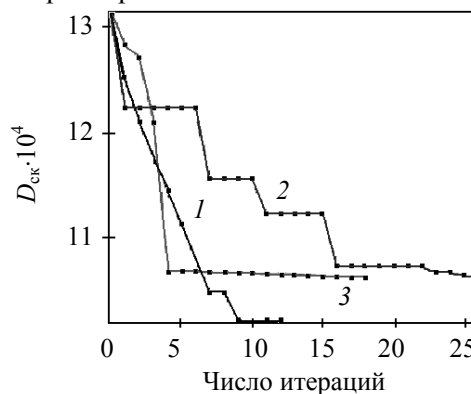
методами покоординатного спуска, деформируемого многогранника, ортонормальных направлений, приводится в табл. 1 и на рис. 2 по данным сканирования на 1-м энергоблоке Ленинградской АЭС с 21 по 24 октября 2004 г.

Т а б л и ц а 1. Характеристики разных методов

Характеристика	Метод		
	покоординатного спуска	ортонормальных направлений	деформируемого многогранника
Затраченное время, с	33	48	40
Число итераций	12	18	26
Число вычислений $D_{\text{ск}}$	62	91	75
Значение $\sqrt{D_{\text{ск}}}$, %	3,19	3,25	3,26

Как видно на рис. 2, при вычислениях методом ортонормальных направлений целевая функция быстро достигает своего минимума, большую часть расчетов занимает останов процесса вычислений, что связано с отсутствием надежного критерия останова расчетов в точке минимума. В методе деформируемого многогранника целевая функция может не изменять своих значений на протяжении нескольких итераций, кроме того, существенное влияние на скорость сходимости оказывают размеры и ориентация начального многогранника. Метод покоординатного спуска дает достаточно хорошую скорость сходимости.

По результатам сравнения для оптимизации был выбран метод покоординатного спуска (см. табл. 1). Следует отметить хорошее согласие результатов оптимизации на основе сканирования и путем обработки информации о текущих параметрах активной зоны РБМК-1000



Р и с. 2. Поведение целевой функции в процессе итераций методами покоординатного спуска (1), деформируемого многогранника (2), ортонормальных направлений (3)

(табл. 2).

Т а б л и ц а 2. Оптимальные константы программы «Призма-М», полученные минимизацией дисперсии при сканировании и исключении с помощью метода покоординатного спуска

Параметр	Целевая функция		Исходное значение
	$D_{\text{ск}} \rightarrow \min$	$D_{\text{иск}} \rightarrow \min$	
$K_{24}^{\text{ном}}$, МВт/мкА	1,034	1,027	1
$K_{26}^{\text{ном}}$, МВт/мкА	0,965	0,973	1
$\sqrt{D_{\text{ск}}}$, %	2,24	2,57	4,47
$C_{\gamma}^{\text{лс}}$	0,03	0,035	0,02
$C_{\gamma}^{\text{д}}$	0,055	0,07	0,05

Программа оптимизации параметров с минимизацией дисперсии ($D_{\text{иск}} \rightarrow \min$) в качестве целевой функции при поочередном исключении детекторов была введена в состав штатного комплекса программы «Призма-М» на 1-й очереди Ленинградской АЭС для автоматической коррекции параметров. Несмотря на то, что расчетная минимизация дисперсии при исключении по сравнению с минимизацией дисперсии при сканировании занимает примерно в 300 раз больше времени, в комплексе «Призма-М» константы корректируются 1 раз в смену, что не влияет на время расчетов по основной программе.

Возможность проведения вычислений по методике поочередного исключения из расчетов сигналов внутриреакторных детекторов позволяет осуществлять самоаттестацию программного комплекса «Призма-М», которая основана на подходе, аналогичном используемому при периодической метрологической аттестации, но не требующем дополнительных измерений. Для самоаттестации такой важной функции программного комплекса «Призма-М», как дисперсия $\delta_{\text{в}}^2$ погрешности восстановления распределения энерговыделения по активной зоне, проводится проверка гипотезы о том, что $\delta_{\text{в}}^2$ и экспериментальная дисперсия

$$\delta_{\text{з}}^2 = \begin{cases} D_{\text{иск}} - D_{\text{к}}, & \text{если проводится самоаттестация;} \\ D_{\text{ск}}, & \text{если проводится периодическая} \\ & \text{метрологическая аттестация,} \end{cases}$$

где дисперсии $D_{\text{иск}}$, $D_{\text{к}}$ определяются после завершения оптимизации, являются независимыми оценками дисперсии одного распределения.

Согласно критерию Фишера различие между выборочными дисперсиями $\delta_{\text{в}}^2$ и $\delta_{\text{з}}^2$ не являются значимыми [4], если

$$\delta_{\text{з}}^2 / \delta_{\text{в}}^2 < F_p(f_{\text{з}}, f_{\text{в}}) \text{ при } \delta_{\text{з}}^2 > \delta_{\text{в}}^2; \quad (2)$$

$$\delta_{\text{в}}^2 / \delta_{\text{з}}^2 < F_p(f_{\text{в}}, f_{\text{з}}) \text{ при } \delta_{\text{в}}^2 > \delta_{\text{з}}^2, \quad (3)$$

где $F_p(f_{\text{з}}, f_{\text{в}})$, $F_p(f_{\text{в}}, f_{\text{з}})$ — табличное распределение Фишера для уровня значимости $p = 0,05$, при котором выполняется условие (2) или (3); $f_{\text{з}}$ — число степеней свободы при определении дисперсии $\delta_{\text{з}}^2$ и равное $N_{\text{иск}} - 1$ или $N_{\text{ск}} - 1$; $f_{\text{в}} = 20$ — число степеней свободы при определении дисперсии $\delta_{\text{в}}^2$, оцененное в расчетном моделировании.

Данные табл. 3 показывают, что аттестация по результатам сканирования и методом последовательного исключения внутриреакторных детекторов дает близкие результаты, а различия экспериментальной и расчетной дисперсий $\delta_{\text{з}}^2$ и $\delta_{\text{в}}^2$ не являются значимыми с вероятностью 0,95. Вместе с тем различия носят систематический характер, по-видимому, из-за методических погрешностей расчета дисперсии $\delta_{\text{в}}^2$ в программном комплексе «Призма-М» и должны быть устранены введением поправки в расчет.

Т а б л и ц а 3. Результаты аттестации расчетов дисперсии восстановления в программном комплексе «Призма-М» 1-го энергоблока Ленинградской АЭС с использованием критерия Фишера до и после введения новых градуировочных коэффициентов $K_{\text{гр}}$ внутриреакторных детекторов

Состояние	$\delta_{\text{з}}^2 \cdot 10^4$	$\delta_{\text{в}}^2 \cdot 10^4$	$\delta_{\text{з}}^2 / \delta_{\text{в}}^2$	$F_p(f_{\text{з}}, f_{\text{в}})$
До введения новых $K_{\text{гр}}$	30	21,4	1,4	1,935
После введения 24.10.04 новых $K_{\text{гр}}$:				
метод сканирования	9,23	7,39	1,25	2,04
метод исключения внутриреакторных детекторов	10,2	9,72	1,05	1,89
то же 7.11.05	25,14	13,31	1,89	1,89

В заключение можно констатировать, что рассматриваемая в настоящей статье процедура оптимизации констант и самоаттестации алгоритмов специального математического обеспечения в вычислительной системе энергетического реактора позволяет повысить точность расчета коэффициентов запаса до пределов безопасной эксплуатации за счет уменьшения погрешности восстановления полей энерговыделения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Филиппчук Е.В., Потапенко П.Т., Постников В.В. Управление нейтронным полем ядерного реактора. М.: Энергоатомиздат, 1981.
2. Власов В.А., Зайцев М.П., Ильина Л.И. и др. Погрешность определения коэффициента неравномерности распределенных параметров в активной зоне реактора. — Атомная энергия, 1988, т. 65, вып. 5, с. 315—318.
3. Химмельблау Д. Прикладное нелинейное программирование. М.: Мир, 1975.
4. Янко Я. Математическо-статистические таблицы. М.: Госстатиздат, 1961.

Поступила в Редакцию 16.04.07

УДК 621.039.5

ВЛИЯНИЕ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ МИКРОКОНСТАНТ НА СЖИГАНИЕ ТРАНСПЛУТОНИЕВЫХ АКТИНОИДОВ В ЖИДКОСОЛЕВЫХ РЕАКТОРАХ

Мясников А.А. (РНЦ «Курчатовский ин-т»)

Среди отходов ядерной энергетики наибольшую проблему представляют нептуний и долгоживущие трансплутониевые актиноиды. Для ее решения в последнее время прорабатывается возможность их сжигания в специализированных реакторах, включая реакторы на расплавленных солях. Преимущество последних перед твердотопливными, заключающееся в отсутствии рефабрикации ТВЭЛОВ, в данном случае играет важную роль в связи с высокой токсичностью трансплутониевых актиноидов.

В реакторах-сжигателях в отличие от традиционных на урановом или уран-плутониевом топливе дополнительную остроту приобретает погрешность микроконстант. Это объясняется значительной загрузкой трансплутониевых актиноидов, микроконстанты которых изучены недостаточно. Это же относится и к жидкосольевым реакторам. Поэтому при проектировании реакторов такого типа важно располагать оценкой влияния погрешности микроконстант на нейтронно-физические характеристики. Следует отметить, что существенную роль могут играть и другие, оставшиеся за рамками работы неопределенности, связанные, например, с составом загружаемого топлива, растворимостью топлива и его отдельных компонентов в соли и др.

В настоящей статье излагается методика определения влияния погрешности микроконстант на скорость сжигания нептуния и трансплутониевых актиноидов в жидкосольевом реакторе,

что является одним из принципиальных эксплуатационных показателей. Предполагается, что, помимо нептуния и трансплутониевых актиноидов, в состав топлива для поддержания заданной размножающей способности вводится плутоний. В методическом отношении его выбор непринципиален, с той же целью может использоваться, например, и обогащенный уран. На примере гомогенного реактора с солью NaF—ZrF_4 [1], который представляет одну из возможных компоновок, проводится количественная оценка погрешности сжигания нептуния и трансплутониевых актиноидов.

Рассмотрим реактор в равновесном состоянии, работающий на постоянной мощности с непрерывной подпиткой топливом. В этом случае скорость сжигания нептуния и трансплутониевых актиноидов равняется их количеству, вводимому в реактор в единицу времени. Таким образом, погрешность сжигания Np , Am , Cm и других трансплутониевых элементов равна неопределенности их доли в составе подпитки.

Воспользуемся следующей моделью реактора. Пусть $\mathbf{N}(t')$ — вектор, характеризующий ввод актиноидов в момент времени t' (скорость подпитки). Состав соли в момент времени t , формируемый всеми загруженными ранее партиями топлива за период $t' \in (0, t)$, выражается в виде