

Алгоритм экстремального регулирования энергораспределения в энергетическом реакторе

ЕМЕЛЬЯНОВ И. Я., ПОСТНИКОВ В. В., ЮРКИН Г. В.

При разработке и эксплуатации энергетических реакторов больших мощностей необходимо оснащать их автоматизированными системами регулирования энергораспределения (ЭР) в активной зоне, базирующимися на ЦВМ.

Для экстремального регулирования ЭР, т. е. для регулирования ЭР с отысканием оптимальных значений целевой функции, применялись программы, основанные на реализации различных «классических» оптимизационных схем [1—3]: теория Винера, динамического программирования, принципа максимума Понтрягина и др. Однако эти методы сложны в аппаратном отношении (требуют большой памяти и времени ЦВМ), рассчитаны на однократное определение экстремума и, кроме того, могут приводить к погрешностям вследствие неадекватности процесса в реакторе и его модели, используемой в алгоритмах регулирования [4].

Так, например, для расчета одного цикла регулирования в экспериментах на реакторе НВВР необходимо 5 мин времени ЦВМ, 7К оперативной и 240К дисковой памяти (К-1024 машинных слов). Различие между реальным процессом и его линейной моделью устранялось введением большого числа искусственных переменных [2].

Решение задачи с применением модели реактора улучшенным методом динамического программирования [3] потребовало объема оперативной памяти ~40 тыс. слов, 130 тыс. слов на магнитном барабане и ~500 с машинного времени (ЦВМ типа НИАС 5020Е), причем для обычного метода динамического программирования, по мнению авторов, требовалось бы машинного времени в 10^4 раз больше [3]. Поэтому вопрос о выборе наиболее приемлемого метода регулирования ЭР окончательно не решен. Для этого необходим, с одной стороны, практический опыт и достаточное число экспериментов, с другой — сравнение различных методов на определенном классе задач.

Важнейшими характеристиками алгоритмов являются их сложность, скорость сходимости, устойчивость к помехам, время счета и т. п. Трудности реализации общих оптимизационных схем, связанные с обработкой информации большого объема и размерности, привели к появлению различного рода итерационных эвристических процедур, основанных на шаговом (импульсном) поиске оптимума и способных находить экстремум целевой функции с одновременным уточнением параметров алгоритма [4]. Эвристическая сторона шаговых поисковых методов исследовалась в [5], однако применительно к задачам оптимального регулирования ЭР рассматривалась редко.

В связи с этим целесообразно рассмотреть экстремальное регулирование ЭР с помощью шагового поиска экстремума с совмещением пробных и рабочих шагов и в сочетании с рядом эвристических приемов самонастройки параметров. Эвристические и логические приемы самонастройки, напоминающие процедуру, реализуемую оператором за пультом управления, минимизируют затраты машинного времени на решение задачи.

Постановка задачи и описание алгоритма ее решения

Задача экстремального регулирования как метода автоматической оптимизации [6] заключается в минимизации или максимизации некоторой целевой функции, значение которой зависит от управляемых и неуправляемых параметров объекта.

В качестве целевой функции можно выбрать коэффициент неравномерности ЭР по радиусу реактора:

$$K_r = \max [W(r, \rho) / SW_0(r)]; \quad (1)$$

$$S = \frac{\int W(r, \rho) dv}{\int W(r) dv}$$

где $W(r, \rho)$ — фактическое ЭР, зависящее от положения РС; $W_0(r)$ — заданное ЭР.

Каждая составляющая вектора ρ имеет вид

$$\rho_j = \gamma_j \rho_{1j}, \quad (2)$$

причем

$$0 \leq \rho_j \leq 1, \quad (3)$$

где ρ_{1j} — единичный вектор погружения j -го РС с амплитудой, равной единичному (технически минимально реализуемому) перемещению РС, составляющему долю S полной эффективности стержня; γ_j — число единичных перемещений РС, соответствующее данному положению.

Будем считать, что шаговый поиск экстремума может быть реализован системой регулирования реактора в режимах

$$n = \text{const}, \quad \alpha_j = \text{const}; \quad (4)$$

$$n = \text{var}, \quad \alpha_j = \text{const}; \quad (5)$$

$$n = \text{const}, \quad \alpha_j = \text{var}; \quad (6)$$

$$n = \text{var}, \quad \alpha_j = \text{var}, \quad (7)$$

где n — число одновременно перемещаемых РС; α_j — число единичных перемещений j -го РС, реализуемое в шаге регулирования.

Введем также ограничение на отклонение реактивности $\delta\rho$ в каждом шаге, связанное с переме-

щением РС:

$$\delta\rho = \left| \sum_{j=1}^n \Delta\rho_j \right| \leq \varepsilon, \quad (8)$$

где $\Delta\rho_j = \alpha_j C$.

Наконец, укажем, что задачей регулирования является достижение

$$\min \{ \max [W(\mathbf{r}, \rho) / SW_0(\mathbf{r})] \}. \quad (9)$$

Одновременно с целевой функцией (1) в процессе шагового поиска экстремума рассмотрим параметр σ , отражающий качество выравнивания $K_r(\mathbf{r})$:

$$\sigma^2(\rho) = \frac{1}{V} \int_V \left[\frac{W(\mathbf{r}, \rho)}{SW_0(\mathbf{r})} - 1 \right]^2 dV. \quad (10)$$

Рассмотрим один из возможных способов решения задачи для режима системы регулирования (5), использующий методологию шагового поиска экстремума [4]. В этом случае задача сводится к отысканию направления перемещения стержней ρ_{1j} и интенсивности регулирования ЭР, обеспечивающего в каждом шаге уменьшение целевой функции (1).

Введем параметр β , характеризующий интенсивность регулирования ЭР, т. е. отражающий n и $\Delta\rho_j$:

$$\beta = \sum_{j=1}^n \alpha_j \quad (11)$$

Разобьем активную зону на I условных областей, в центре каждой из которых расположен j -й РС. Итерационная процедура решения сводится к следующему.

1. В k -м состоянии реактора, предшествующем $(k+1)$ -му перемещению РС, в каждой j -й зоне находится ячейка реактора с максимальным отношением фактического и заданного ЭР:

$$K_j^{(k)\text{ макс}} = \frac{W_j^{(k)}}{SW_{0j}}. \quad (12)$$

2. В k -м состоянии определяется текущий разбаланс реактивности $\Delta\rho^{(k)}$, измеряемый по отклонению положения стержней автоматического регулятора и обусловленный как $\delta\rho$, так и другими процессами, например выгоранием, отравлением и т. п.

3. В $n_{\text{макс}}^{(k)}$ зонах с максимальными значениями $K_j^{(k)\text{ макс}}$ и $\rho_j < 1 - \alpha C$, а также в $n_{\text{мин}}^{(k)}$ зонах с минимальными $K_j^{(k)\text{ макс}}$ и $\rho_j > \alpha C$ осуществляется погружение и извлечение каждого РС на одинаковое число единичных шагов (α). При этом $n_{\text{мин}}^{(k)}$ и $n_{\text{макс}}^{(k)}$ удовлетворяют соотношениям:

$$n_{\text{макс}}^{(k)} - n_{\text{мин}}^{(k)} = \text{entier} \left(\frac{\Delta\rho^{(k)}}{\alpha C} \right); \quad (13)$$

$$n_{\text{макс}}^{(k)} + n_{\text{мин}}^{(k)} = n^{(k)} = \frac{\beta^{(k)}}{\alpha}; \quad (14)$$

$$1 < \beta^{(k)} < \beta_{\text{уст}}^{(k)}, \quad (15)$$

где $\beta_{\text{уст}}^{(k)}$ — максимальное значение $\beta^{(k)}$, при котором обеспечивается сходимость процесса по (8) и (9), а α выбирается из условия $\varepsilon < \alpha C$.

В случае, когда по данному алгоритму регулируется как ЭР, так и мощность реактора N_p , в качестве $\Delta\rho^{(k)}$ в (13) следует использовать $\frac{\Delta N_p}{N} \beta_{\text{эф}}$, где $\beta_{\text{эф}}$ — эффективная доля запаздывающих нейтронов, а ΔN_p — разбаланс фактической и заданной мощностей.

Естественно, что значения $n_{\text{макс}}^{(k)}$ и $n_{\text{мин}}^{(k)}$ должны зависеть от $\beta^{(k)}$, выбираемых в диапазоне (15) исходя из условий безопасности, требуемой скорости сходимости процесса регулирования, подлежащих обработке максимальных значений $\Delta\rho^{(k)}$ и т. п.

4. Итерации продолжаются до тех пор, пока выражение (9) не достигнет минимального для данного состояния реактора значения.

Численная реализация на ЦВМ

На базе изложенного алгоритма применительно к ЦВМ типа БЭСМ-6 разработана программа, по которой проводили исследования режимов регулирования ЭР для различных реальных состояний реактора РБМК-1000 ЛАЭС [7].

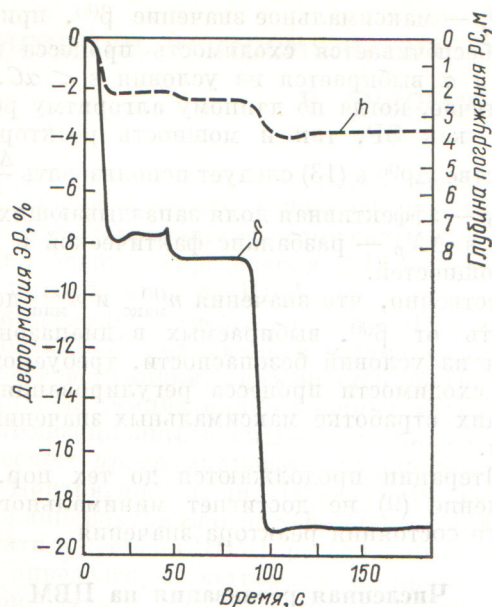
При этом в качестве оператора идентификации ЭР в активной зоне использовали результаты двумерного физического расчета статических состояний реактора [8]. Следует отметить, что эксперименты по изучению пространственно-временных характеристик реактора РБМК-1000 первого блока ЛАЭС в период энергетического пуска позволили исследовать реакцию ЭР на внесение локальных возмущений.

Характер переходных процессов в отдельной точке активной зоны иллюстрируется данными рис. 1, на котором представлено изменение ЭР в опыте по перемещению отдельного РС.

Анализ экспериментальных исследований пространственно-временных характеристик ЭР реактора РБМК-1000 показывает, что статическое ЭР устанавливается практически сразу после каждого перемещения (см. рис. 1). На временных интервалах не менее минуты, которые в дальнейшем будем называть «адиабатическими интервалами», ЭР изменится не более чем на 3–5%.

В программе использованы режимы (4) и (5) при одношаговом перемещении РС ($\alpha = 1$) с варьированием числа n одновременно перемещаемых РС от 2 до 40, причём во всех случаях принималось $C = 1/12$. Заметим, что на практике минимальные перемещения РС в несколько раз меньше, что позволит улучшить выравнивание ЭР рассматриваемым методом.

При колебании реактивности реактора, связанной с перемещением РС, корректируется реактивность, однако в расчетах этого не потребовалось,



Р и с. 1. Деформация ЭР в ячейке 30—56 (—) при постоянной средней мощности реактора РБМК-1000 ЛАЭС и положение РС в ячейке 24—57 (---)

так как во всех итерациях выполнялось равенство $n_{\max}^{(k)} = n_{\min}^{(k)}$.

Поскольку качество регулирования ЭР оценивалось по коэффициенту неравномерности (1), $W_0(r)$ задавалось постоянным по всему реактору.

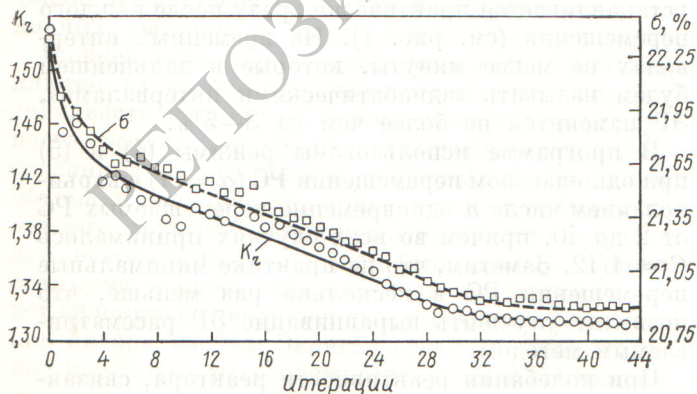
Итерационный процесс (включение РС на перемещение) заканчивался, если

$$|\sigma^{(k-5)} + \sigma^{(k-4)} + \sigma^{(k-3)} - \sigma^{(k-2)} - \sigma^{(k-1)} - \sigma^{(k)}| \leq \delta, \quad (16)$$

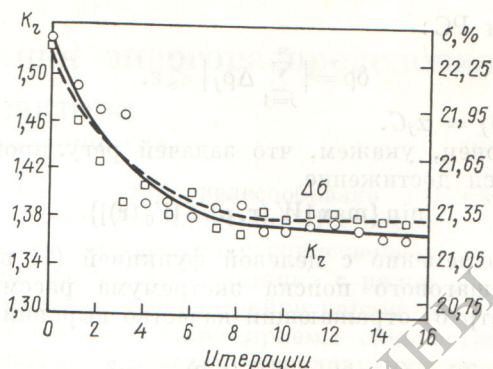
где δ принималось в интервале 0,0010—0,0015.

В реальных условиях на реакторе процесс регулирования должен возобновляться на l -м такте после останова по условию (16), если

$$\sigma \geq \frac{1}{3}(\sigma^{(k-2)} + \sigma^{(k-1)} + \sigma^{(k)}) + \Delta, \quad (17)$$



Р и с. 2. Зависимость K_r (○) и σ (□) от числа итераций регулирования ЭР ($\beta^{(k)} = 4$)



Р и с. 3. Изменение K_r (○) и σ (□) при регулировании ЭР ($\beta^{(k)} = 10$)

где Δ задается исходя из допустимой величины колебаний $\min(K_r)$.

При регулировании мощности реактора по данному алгоритму процесс должен возобновляться также с выходом ΔN_p^{k+l} из заданных пределов.

В данном методе исследовались следующие положения.

1. Оценка характера сходимости итерационного процесса при различных параметрах $\beta^{(k)}$.

2. Определение эффективности регулятора в районе экстремума при ступенчатом изменении параметра $\beta^{(k)}$.

3. Отыскание закона самонастройки $\beta^{(k)}$, минимизирующего затраты времени на поиск при движении системы к оптимальному состоянию.

Для оценки затрат времени на поиск регулирования первоначально проводилось в режиме, наиболее близком к процедуре, осуществляемой оператором ($3 \geq \beta^{(k)} \geq 1$).

Данные одного из таких расчетов для реального состояния реактора РБМК-1000 второго блока ЛАЭС, представленные на рис. 2, показывают, что процесс поиска при постоянном и малом β_k , равном при выбранном $\alpha = 1$ числу РС одновременно перемещаемых в каждом $(k+1)$ -м включении, сходится по σ и K_r примерно по линейному закону относительно k . Однако скорость сходимости невелика, что свидетельствовало о необходимости увеличения регулирующего воздействия $\beta^{(k)}$.

Расчеты по регулированию, один из которых иллюстрируется данными рис. 3, показали, что увеличение числа одновременно перемещаемых РС приводит к ускорению поиска. При этом несколько возрастает амплитуда осцилляций вблизи экстремума, а асимптотические значения K_r и $\sigma^{(k)}$ превышают аналогичные для рис. 2.

Снижение затрат времени на поиск при увеличении числа РС, одновременно перемещаемых в каждой итерации, свидетельствовало о необходимости исследовать характер регулирования в широком диапазоне изменений $\beta^{(k)}$. С этой целью проводилась серия расчетов с переменными значениями $\beta^{(k)}$, задаваемыми по различным эвристическим законам.

(6) привела бы к худшим результатам по $\sigma_{\text{мин}}$, чем (5) ввиду конечности C .

Можно ожидать, что наибольшая эффективность самонастройки регулятора может быть достигнута при одновременном изменении числа и шагов перемещаемых РС.

Алгоритм экстремального регулирования может быть применен и при наличии в системе регулирования модели реактора, что, по-видимому, позволит сократить число перемещений РС при выходе к цели и обеспечить прогнозирование оптимальных ЭР.

Возможность реализации описанного алгоритма для регулирования ЭР с применением и без применения модели реактора, простота и быстродействие в условиях дефицита оперативной памяти позволяет рекомендовать его для разработки эксплуатационных программ для объектовых ЦВМ.

В заключение авторы благодарят В. С. Лаврухина за предоставленный экспериментальный материал по измерениям переходных процессов, проведенных на реакторе РБМК-1000.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lipinski W., Vacroux A. «IEEE Trans.», 1970, v. NS-17, N 1, p. 510.
2. Grumbach R., Blomsnes B. In: Proc. of a Symp. Prague 22—26, IAEA, Vienna, January 1973, p. 303.
3. Oguri K., Ebizuka Y. «J. Nucl. Sci. Techn.», 1975, v. 12, N 7, p. 391.
4. Macdonald J., Koen B. «Nucl. Sci. Engng.», 1975, v. 56, p. 142.
5. Нильсон Н. Искусственный интеллект. М., «Мир», 1973.
6. Казакевич В. В., Родов А. В. Системы автоматической оптимизации. М., «Энергия», 1977.
7. Александров А. П. и др. «Атомная энергия», 1974, т. 37, вып. 2, с. 99.
8. Городков С. С. Препринт ИАЭ-2294. М., 1973.

Поступила в Редакцию 02.02.78

УДК 621.1.013

Некоторые особенности структуры потока при критическом режиме истечения вскипающей воды через цилиндрические каналы

АЛЕШИН В. С.

В последние годы исследованию истечения насыщенной и недогретой воды до температуры насыщения уделяется большое внимание. Это вызвано необходимостью определения расхода при решении ряда инженерных задач и, в частности, при рассмотрении аварийных ситуаций, связанных с течами в контуре теплоносителя АЭС.

Протекающие в канале истечения процессы все еще изучены недостаточно. Предложенные модели потока и описание его структуры противоречивы. Это усложняет разработку методов расчета расхода смеси, скорости истечения и других характеристик рассматриваемых потоков. Получение новых опытных данных, вскрывающих физику процессов в канале истечения, крайне необходимо.

На экспериментальной установке, описание которой было дано ранее*, получены многочисленные эпюры статического давления и температуры потока, измеренные специальным зондом по оси цилиндрического канала с острыми входными кромками при изменении начального давления P_1 на входе в канал от 2,45 до 9,6 МПа, недогрева до температуры насыщения Δt_n от 0 до 60°С и l/d — от 0,5 до 9,55. В упомянутой работе был рассмотрен ряд этих эпюр. Здесь остановимся на более детальном их анализе.

На рис. 1, а приведены эпюры статического давления и температуры при истечении насыщенной

воды через канал диаметром $d = 9,53$ мм, $l/d = 9,55$ и начальном давлении 7,35 МПа. На рис. 1, б показан перегрев воды в канале истечения $\Delta t_n = t - t_s$ (где t — температура потока; t_s — температура насыщения при данном давлении), полученный по этим эпюрам.

Из рис. 1, б следует, что по длине канала (рис. 1, в) имеются три характерных участка начального участка А в районе входной кромки, на котором жидкость находится в перегретом, метастабильном состоянии; средний участок В — стабилизированных параметров, на котором жидкость и пар находятся в состоянии, близком к термодинамическому равновесию; концевой участок С в районе выходной кромки, на котором поток характеризуется значительной неравновесностью.

На начальном участке давление потока начинает снижаться еще до входа в канал истечения и достигает минимума на некотором расстоянии от острой входной кромки, а затем несколько повышается. Этот «провал» давления обусловлен сжатием струи, как и при чисто гидравлических режимах истечения из цилиндрических каналов с острыми входными кромками.

Снижение температуры потока происходит с некоторым запаздыванием, что обуславливает перегрев жидкости до некоторого максимального значения. Наибольший перегрев и изменение эпюры Δt_n по длине канала зависят от начальных параметров жидкости (давления и недогрева Δt_n) и длины канала (l/d). К концу участка перегрев жидкости практически уменьшается до нуля.

* Алешин В. С. и др. «Атомная энергия», 1975, т. 38, вып. 6, с. 375.