

УДК 621.039.512

Алгоритмы оперативного управления энергетическим реактором с помощью ЭВМ

ЕМЕЛЬЯНОВ И. Я., ФИЛИПЧУК Е. В., ПОТАПЕНКО П. Т., ДУНАЕВ В. Г., КУЗНЕЦОВ Н. А.

Как и для любой установки, надежность реактора характеризуется вероятностью его безотказной работы. Надежность отвода тепла из активной зоны реактора — теплотехническая надежность [1] — обеспечивается надлежащей организацией теплового режима активной зоны. Для нормальной работы активной зоны необходимо, чтобы величины, определяющие теплотехническую надежность (лимитирующие параметры), не превышали при эксплуатации реактора критических значений, установленных для каждого параметра.

В противном случае имеет место отказ реактора вследствие выхода из строя (прогораний, расплавления, деформационных разрушений) отдельных элементов — твэлов, каналов и др. Отказ одного из тысяч однотипных элементов означает отказ реактора в целом.

Постановка задачи. Основной путь воздействия на теплотехническую надежность при заданной мощности реактора — управление нейтронным полем и расходами через каналы. Действительно, теплофизические поля лимитирующих параметров, в свою очередь, определяются энергораспределением и расходами. Средствами воздействия на параметры, определяющие теплотехническую надежность, являются органы СУЗ и вентили регулировки расходов, а средствами контроля — либо датчики, непосредственно регистрирующие лимитирующие косвенные параметры, либо, как правило, датчики, регистрирующие косвенные параметры — нейтронный поток и расход теплоносителя через каналы.

Цель управления состоит в достижении максимума теплотехнической надежности при заданной мощности реактора за счет максимально возможного увеличения запасов до критических значений лимитирующих параметров. Так, на реакторе РБМК в настоящее время цель управления формулируется как достижение

максимальных запасов до критических мощностей топливных каналов [1].

Рассмотрим следующие важнейшие факторы, определяющие выбор методов и алгоритмов оперативного управления теплофизическими полями.

1. На энергетических реакторах возможности прямого измерения основных параметров чрезвычайно ограничены.

2. Процессы контроля и управления теплофизическими полями дискретны в пространстве. При этом один регулирующий орган приходится на несколько десятков каналов (касет) с топливом.

3. В хорошо спроектированном реакторе в качестве лимитирующих одновременно выступают несколько параметров (температура твэлов, паросодержание и др.), а по мере совершенствования технологии реактора список этих параметров может существенно изменяться [2].

4. Большая размерность системы управления (тысячи входных сигналов от датчиков и тысячи выходных сигналов — регулирующих воздействий) даже при наличии датчиков лимитирующих параметров не позволяет вести оперативное управление всеми параметрами вследствие ограниченных возможностей ЭВМ по объему памяти и быстродействию.

5. Нейтронное поле в реакторе — первичное, а другие поля (температурные, паросодержания и т. п.) — вторичные, производные поля. Нейтронный поток — выходной параметр реактора как объекта управления. С учетом приведенных факторов оперативное управление конкретизируется как управление нейтронным полем в активной зоне.

При разработке системы управления реактором в такой постановке необходимо решить ряд связанных между собой вопросов. Это, во-первых, проектирование информационно-вы-

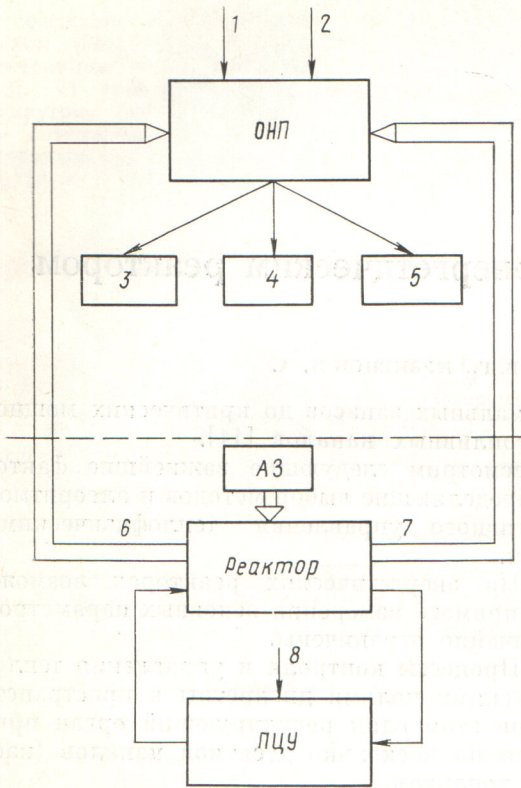


Рис. 1. Иерархическая структура системы управления энергетическим реактором с помощью ЭВМ:

1 — технологические ограничения; 2 — запросы оператора; 3 — оптимальное нейтронное поле; 4 — положение органов СУЗ; 5 — уставки на зонные регуляторы; 6 — состояние управляющих органов; 7 — показания детекторов; 8 — уставки регуляторов; ОНП — оптимизация нейтронного поля; АЗ — аварийная защита; ПЦУ — прямое цифровое управление

числительной системы для обработки показаний датчиков теплофизических параметров и расчет предельно допустимых сигналов датчиков. При этом устанавливаются фактические критерии оптимальности распределения нейтронов по активной зоне [3]. Другая весьма важная проблема — проблема стабилизации — заключается в выборе и обосновании структуры системы управления нейтронным полем реактора как объекта с распределенными параметрами, обеспечивающей регулирование нейтронного поля с заданными показателями качества.

С учетом временных характеристик, действующих на систему возмущений, динамики процессов и важности решаемых задач с точки зрения обеспечения ядерной безопасности задачи, решаемые системой управления реактором, можно условно разделить на «быстрые» и «медленные». К первой группе относятся управле-

ние общей мощностью и стабилизация нейтронного поля для реакторов с неустойчивым распределением. Для них период прерывания должен быть порядка 0,5 с [4]. Управление профилем нейтронного поля — одна из наиболее важных функций во второй группе и технологически приемлемое время цикла для нее 5—10 мин. Исходя из этого, можно предложить следующую двухуровневую иерархическую структуру системы управления нейтронным полем реактора с помощью ЭВМ (рис. 1).

Нижним уровнем иерархии является прямое цифровое (зонное) регулирование нейтронного поля. На следующем уровне иерархии находится система регулирования профиля нейтронного поля. Подобное функциональное разделение — иерархия целей — может сопровождаться и аппаратным разделением, при этом для прямого цифрового управления используются специализированные цифровые регуляторы (мини-ЭВМ). Аварийная защита автономна от ЭВМ.

Следует особо подчеркнуть, что стабилизация нейтронного поля зонными регуляторами позволяет облегчить условия работы ЭВМ, вычисляющей оптимальное положение органов СУЗ [5]. Без зонных регуляторов вследствие нестабильности нейтронного поля к ЭВМ предъявляются технически трудно выполнимые требования по динамическим характеристикам (период прерывания и время расчета положений органов СУЗ).

Решение сформулированной задачи оперативного управления энергетическим реактором обеспечит стабилизацию оптимальной формы нейтронного поля, вычисленной по программе оптимизации [11].

Введем векторы действительных Φ и базовых (эталонных) значений сигналов детекторов нейтронов. Вектор ошибок управления определим, как $\delta\Phi = \Phi^0 - \Phi$.

Тогда проблема сводится к минимизации при постоянстве общей мощности компонент вектора $\delta\Phi$ или к получению такого нейтронного поля, которое бы повторяло с минимальной ошибкой заданный оптимальный профиль.

Если оптимальным нейтронным полем является выравненное распределение (макрополе), то задача управления может быть конкретизирована также как минимизация отклонений нейтронного потока в каждой дискретной области контроля от среднего значения. Выравнивание поля лимитирующих параметров при такой постановке осуществляется с помощью профилирования расходов.

Регулировка расходов через канал выгодна в смысле лучшего использования теплоносителя. Однако это — трудоемкая и опасная для реактора ручная операция (возможно ошибочное снижение расхода ниже допустимого уровня) и поэтому неприемлема для оперативного управления.

Таким образом, в общем виде цель управления состоит в минимизации функционала вида $f(\Phi) = \|\Phi^0 - \Phi\|$, где Φ^0 — оптимальное (в определенном смысле) поле. При этом количественная оценка качества управления — критерий управления — определяется нормой вектора ошибок управления.

Конкретный выбор критерия определяется возможностью синтезировать достаточно простой и эффективный алгоритм управления.

Для небольших изменений положений органов СУЗ — управляющих воздействий — реакция нейтронного поля описывается линейным приближением вида $\delta\Phi = A\delta u$. Элементы матрицы A могут быть определены, например, экспериментально по реакции датчиков на единичное (в единицах реактивности) перемещение органов СУЗ при включенных зонных регуляторах [6].

Тогда исходная задача оптимального управления сводится к поиску наилучшего (в смысле выбранной нормы) приближения $\Phi^0 - \Phi = A\delta u$.

Алгоритмы управления. Если в качестве меры приближения к оптимальному нейтронному полю (критерию управления) выбрана норма $L_\infty : f(\Phi) = \max_i |\Phi^0 - \Phi|$, то с учетом

уравнения связи задача сводится к минимизации функции только управляющих переменных: минимизировать

$$f(u) = \max_i |(A_i, \delta u) - \delta\Phi_i \quad (1)$$

при обобщенных ограничениях

$$P\delta u \leq v; \quad \alpha_j \leq \delta u \leq \beta_j, \quad j = 1, \dots, r,$$

учитывающих постоянство мощности реактора, значения лимитирующих параметров и ограниченную реактивность, вносимую органами СУЗ.

Задача математического программирования с кусочно-линейной целевой функцией (1) может быть сведена к стандартной задаче линейного программирования минимизировать y при следующих ограничениях:

$$y + (A_i, \delta u - \delta\Phi_i) \geq 0; \quad y - [(A_i, \delta u) - \delta\Phi_i] \geq 0, \\ i = 1, \dots, n; \quad P\delta u \leq v; \quad \alpha \leq \delta u \leq \beta; \quad y \geq 0.$$

Выбор в качестве меры приближения к оптимальному полю евклидовой нормы вектора

ошибок $f(\Phi) = (\Phi^0 - \Phi)^T (\Phi^0 - \Phi)$ приводит к задаче квадратичного программирования: минимизировать

$$f(u) = d^T \delta u + 1/2 \delta u^T R \delta u, \quad (2) \\ d^T = -2\delta\Phi^T A; \quad R = 2A^T A,$$

при ограничениях $P\delta u \leq v; \quad \alpha \leq \delta u \leq \beta$.

В работе [7] показано, что решение задач линейного и квадратичного программирования в общем случае приводит к задаче так называемого положительно полуопределенного программирования в следующем каноническом виде: даны действительный вектор q и действительная матрица M , размерностью $l \times l$; найти векторы w и z , удовлетворяющие ограничениям

$$w = q + Mz; \quad w \geq 0, \quad z \geq 0, \quad z^T w = 0.$$

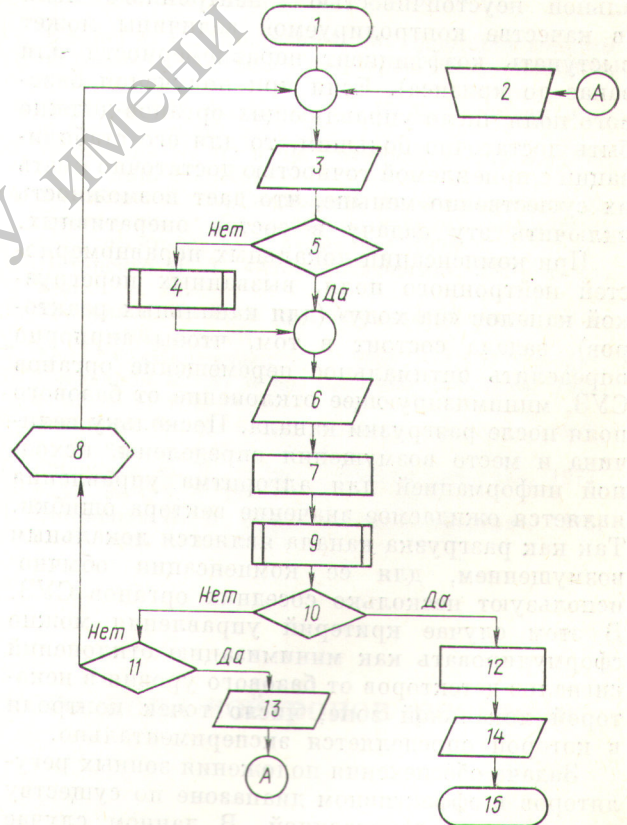


Рис. 2. Структурная схема алгоритма вычисления оптимального положения органов СУЗ:

1 — начало; 2 — ввод ограничений, запросы оператора; 3 — ввод контролируемых параметров; 4 — вычисление (адаптация) матрицы A ; 5 — совпадают ли действительные и ожидаемые результаты; 6 — ввод матрицы A ; 7 — формализация задачи; 8 — модификация программы (увеличение размерности); 9 — решение методом вращений; 10 — есть ли решение; 11 — считалась ли задача увеличенной размерности; 12 — вычисление управляющих воздействий; 13—14 — печать сообщений оператору; 15 — конец

Таким образом, для численного решения задачи оптимального управления нейтронным полем реактора может быть эффективно применен метод вращений [7], позволяющий с помощью единой вычислительной процедуры решать линейную и квадратичную задачи. На рис. 2 представлена структурная схема описанного алгоритма вычисления оптимального положения органов СУЗ реактора с помощью ЭВМ.

Рассмотрим теперь, как конкретизируется алгоритм управления при решении типовых задач управления реактором [8].

При стабилизации базового поля программа расчета положения управляющих органов СУЗ инициируется системой контроля по превышению сигналов детекторов нейтронов некоторого заданного уровня, вызванному, например, радикальной неустойчивостью нейтронного поля (в качестве контролируемой величины может выступать коэффициент неравномерности или запас до кризиса). Если при получении базового поля число управляющих органов должно быть достаточно большим, то для его стабилизации с приемлемой точностью достаточно иметь их существенно меньше, что дает возможность включить эту задачу в состав оперативных.

При компенсации локальных неравномерностей нейтронного поля, вызванных перегрузкой каналов «на ходу» (для канальных реакторов), задача состоит в том, чтобы априорно определить оптимальное перемещение органов СУЗ, минимизирующее отклонение от базового поля после разгрузки канала. Поскольку величина и место возмущения определены, исходной информацией для алгоритма управления является ожидаемое значение вектора ошибки. Так как разгрузка канала является локальным возмущением, для ее компенсации обычно используют несколько соседних органов СУЗ. В этом случае критерий управления можно сформулировать как минимизацию отклонений сигналов детекторов от базового уровня в некоторой локальной зоне, число точек контроля в которой определяется экспериментально.

Задача обеспечения положения зонных регуляторов в эффективном диапазоне по существу аналогична рассмотренной. В данном случае исходной информацией для алгоритма управления является требуемое перемещение зонного регулятора k , выраженное в единицах реактивности.

Цель состоит в вычислении оптимального управления при следующем интегральном ограничении:

$$\sum_{j=1}^r \delta u_j = -k.$$

Таким образом, при перемещении компенсирующих органов СУЗ автоматический регулятор для сохранения баланса реактивности переместит зонный регулятор на величину k .

С вычислительной точки зрения все рассмотренные задачи однотипны, разница заключается лишь в формировании исходной информации. Однако на практике учет конкретных особенностей каждой из задач позволяет экономить время и память ЭВМ, необходимые для вычисления оптимального управления.

Расчеты, выполненные для типовых задач, показали хорошую работоспособность алгоритма управления как для квадратичного, так и для минимаксного критерия. С учетом ограниченных возможностей по объему памяти, быстродействию и загруженности ЭВМ другими задачами предпочтение для оперативного управления следует отдать более экономичному алгоритму управления с квадратичным критерием.

Для оперативной оптимизации нейтронного поля зонные регуляторы — идеальное средство. В этом случае выходными координатами ЭВМ верхнего уровня иерархии являются уставки регуляторов, вычисленные из условия обеспечения оптимального поля. Этот режим облегчает работу оператора, поскольку в его функции входит только изменение установок, которые обрабатываются автоматически.

Алгоритм вычисления уставок для зонных регуляторов состоит в следующем. Для данного вектора ошибок вычисляется оптимальное управление и ожидаемое поле в предположении, что управляющие органы — зонные регуляторы. Ожидаемое значение нейтронного потока в местах расположения датчиков зонных регуляторов и является искомой уставкой.

Использование «динамической» уставки для зонных регуляторов дает ряд технических преимуществ: в этом случае по сравнению с базовым режимом зонного регулирования достигается лучшее выравнивание поля, оптимально используются зонные регуляторы, появляется возможность сокращения числа датчиков, повышается надежность системы управления. Проведенные расчеты показали, что использование динамической уставки для системы из четырех зонных регуляторов позволяет улучшить выравнивание поля по квадрантам на 1—3%.

Применение зонных регуляторов в качестве исполнительных органов ЭВМ позволит в дальнейшем реализовать так называемый суперви-

зорный режим управления, при котором ЭВМ непосредственно воздействует на уставки регуляторов низшего уровня иерархии.

Прогресс в области построения мини-ЭВМ, являющихся мощным и экономичным средством обработки данных в реальном времени, позволяет пересмотреть объем функций, поручаемых ЭВМ в управлении реактором. Естественным логическим развитием внедрения ЭВМ в системы управления становится использование средств вычислительной техники (специализированных мини-ЭВМ) и на низшем уровне иерархии. В ее функции целесообразно включить контроль и прямое цифровое управление нейтронным полем, для поддержания его вблизи оптимального профиля. При этом в соответствии с требованиями к быстродействию и надежности предпочтение следует отдать классическим законам управления с обратной связью, т. е. синтезировать простую и эффективную следующую систему [9].

Для решения задач прямого цифрового управления можно предложить следующий алгоритм. Управляющий сигнал каждого зонного регулятора вычисляется в соответствии с выражением

$$\delta u = k \left[\frac{\Phi_i}{\sum_i \Phi_i} - \left(\frac{\Phi_i}{\sum_i \Phi_i} \right)^0 + (N^0 - N) \right].$$

Таким образом, обеспечивается оптимальное нейтронное поле при заданной мощности реактора, которая определяется единственной уставкой N^0 . Экспериментальные исследования [10] подтвердили хорошую работоспособность и эффективность данного алгоритма управления при типовых возмущениях.

Таким образом, для оперативного управления энергетическим реактором с помощью

ЭВМ предложена двухуровневая структура системы регулирования. Зонные регуляторы (цифровые или аналоговые) низшего уровня иерархии стабилизируют нейтронное поле и мощность реактора, обеспечивая при этом технически приемлемый режим работы ЭВМ верхнего уровня иерархии. Цель управления для системы верхнего уровня состоит в минимизации отклонений нейтронного поля от эталонного профиля. Выходными сигналами ЭВМ являются советы оператору по управлению реактором и уставки на зонные регуляторы.

Предлагаемый алгоритм управления состоит в решении обобщенной задачи линейного или квадратичного программирования с учетом имеющихся технологических ограничений.

Поступила в Редакцию 30/III 1977 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Клеин А. Н., Стригулин Н. М. Некоторые вопросы надежности ядерных реакторов М., Атомиздат, 1968.
2. Доллежал Н. А., Емельянов И. Я. «Атомная энергия», 1976, т. 40, вып. 2, с. 117.
3. Емельянов И. Я. и др. «Атомная энергия», 1974, т. 37, вып. 6, с. 451.
4. Емельянов И. Я., Гаврилов П. А., Селиверстов Б. Н. Управление и безопасность ядерных энергетических реакторов. М., Атомиздат, 1975.
5. Потаненко П. Т. «Атомная энергия», 1976, т. 41, вып. 1, с. 25.
6. Емельянов И. Я. и др. «Атомная энергия», 1976, т. 41, вып. 2, с. 81.
7. Lemke С. «Management Sci.», 1965, v. II, N 7, p. 681.
8. Емельянов И. Я. и др. «Атомная энергия», 1977, т. 42, вып. 4, с. 263.
9. Филипчук Е. В. и др. «Атомная энергия», 1975, т. 39, вып. 1, с. 12.
10. Филипчук Е. В. и др. «Атомная энергия», 1977, т. 42, вып. 5, с. 365.
11. Емельянов И. Я. и др. «Атомная энергия», 1978, т. 44, вып. 4, с. 310.

Метод анализа устойчивости высотного поля нейтронов реактора к ксеноновым колебаниям

АФАНАСЬЕВ А. М., ТОРЛИН Б. З.

В настоящее время наиболее популярным методом расчета стационарных нейтронных полей в реакторах является метод итераций. В сочетании с конечно-разностной дискретизацией он прост, надежен и детально разработан [1]. Определяемый в этих статических

расчетах собственный параметр уже в той или иной степени является мерой нестационарности рассчитываемого реактора. В самом деле, если собственное число свидетельствует, например, о надкритичности реактора, то это значит, что предоставленный сам себе он будет разгоняться