

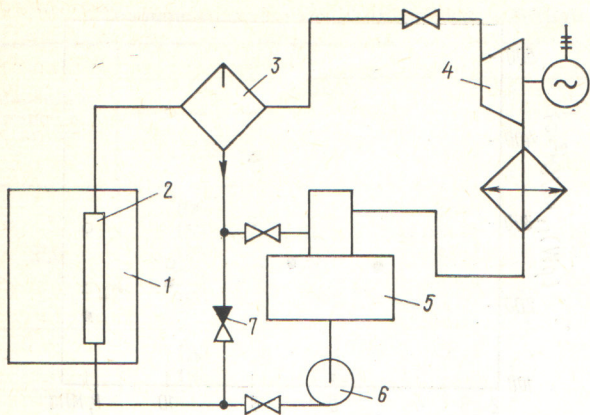


Рис. 4. Принципиальная технологическая схема АЭС с реактором проточного типа: 1 — водографитовый реактор; 2 — испарительные каналы; 3 — паросушитель, аналогичный центробежному сепаратору проточных парогенераторов; 4 — турбогенератор; 5 — деаэрактор; 6 — питательный насос; 7 — обратный клапан

Расход теплоносителя принимается таким, чтобы критическое паросодержание было близким к единице. Тогда выбор значения рабочего массового паросодержания на выходе 0,85 обеспечит бескризисный режим работы испарительных каналов. Применение питательного насоса для принудительной циркуляции позволяет получить необ-

ходимую степень дросселирования испарительных каналов и их твэлов в целях обеспечения теплогидравлической устойчивости расходов в них. При малой мощности реактора (на уровне остаточного тепловыделения) твэлы могут охлаждаться за счет естественной циркуляции через линию с обратным клапаном.

Таким образом, преимущества предлагаемого проточного реактора с докритическими параметрами (снижение капитальных затрат, снижение расхода электроэнергии на собственные нужды, повышение надежности за счет сокращения единиц оборудования) дают хорошие предпосылки для создания маневренной АЭС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Доллежал Н. А. «Атомная энергия», 1978, т. 44, вып. 3, с. 203.
2. Алещенков П. И., Баканов А. В., Зверева Г. А. В кн.: Сб. Сов. докл. юбилейной конф., посвященной XX-летию атомной энергетики. Т. II. Обнинск, 1974, с. 99.
3. Смолин В. П., Есиков В. И., Шпанский С. В. В кн.: Вопросы атомной науки и техники. Сер. «Реакторостроение». Вып. 1. М., ЦНИИАтоминформ, 1972, с. 122.
4. Becker K., Ling C.-H. KTH-NEL-13, Royal Institute of Technology, Stockholm, 1970.
5. Becker K. e.a. KTH-NEL-14, Royal Institute of Technology, Stockholm, 1971.

Поступила в Редакцию 25.03.79

УДК 621.039.562

Регулирование нейтронного поля реактора с помощью инверсных моделей

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

Метод регулирования нейтронного поля реактора с использованием обратной (инверсной) модели предложен в работе [1]. Обобщением этого метода для произвольного расположения датчиков и стержней СУЗ при ограничении перемещения управляющих стержней является алгоритм [2]. В публикации [3] описан метод модального регулирования, разработанный для стабилизации энергораспределения реактора АЭС «Джентли-1». По существу этот алгоритм также может быть отнесен к алгоритмам с инверсной моделью. Цель настоящей работы — распространение метода инверсной модели на регулирование большого канального реактора, для которого наиболее актуальна проблема стабилизации нейтронного поля.

Алгоритм регулирования гармоник. Динамика нейтронного поля названного реактора достаточно точно описывается четвертой адиабатической моделью [4]:

$$\Phi(p) = \{A_0 W_0(p) + A_1 W_1(p) + A_*\} k(p), \quad (1)$$

где $\Phi(p)$ — вектор отклонения нейтронного поля от стационарного профиля; $k(p)$ — вектор возмущения или управления.

В соответствии с уравнением (4) процесс изменения нейтронного поля, вызванный возмущением реактивности, может быть описан суперпозицией трех независимых движений:

1) фундаментального с передаточной функцией фундаментальной гармоники $W_0(p)$ и статической передаточной матрицей A_0

$$\Phi_0(p) = A_0 W_0(p) k(p); \quad (2)$$

2) азимутального с передаточной функцией первой азимутальной гармоники $W_1(p)$ и статической передаточной матрицей A_1

$$\Phi_1(p) = A_1 W_1(p) k(p); \quad (3)$$

3) безынерционного перераспределения по высшим гармоникам, связанного с матрицей устойчивой формы A_*

$$\Phi_* = A_* k(p). \quad (4)$$

Следует особо подчеркнуть, что динамические характеристики этих движений существенно различны. Статические передаточные матрицы A_0 , A_1 и A_* могут вычисляться по расчетно-эмпирической методике [4].

Воспользуемся идеей инверсной модели для построения алгоритма регулирования гармоник нейтронного поля с помощью управляющей ЭВМ. Следует заметить, что по терминологии, принятой в работе [5], реализация этого алгоритма относится к низшему уровню иерархии — прямому управлению реактором с использованием специализированных автономных мини-, микро-ЭВМ.

Предположим, что для стабилизации фундаментальной и первой азимутальной гармоник выбрано r стержней СУЗ (до десяти) из общего числа m стержней и n внутри- и вне реакторных датчиков нейтронного потока. В соответствии с предлагаемым алгоритмом управляющее воздействие, компенсирующее отклонение нейтронного поля от базового распределения, состоит из суммы трех компонентов, которые реализуются контурами регулирования фундаментальной гармоник отклонения, азимутальной гармоник и высших гармоник:

$$k_0 = A_0^+ \Phi W_0^p;$$

$$k_1 = A_1^+ \Phi^p;$$

$$k_* = A_*^+ \Phi.$$

Здесь A_0^+ , A_1^+ , A_*^+ — псевдообратные матрицы от матриц A_0 , A_1 , A_* соответственно. Передаточные функции регуляторов W_0^p и W_1^p двух первых контуров выбираются из условия оптимальной коррекции передаточных функций фундаментальной и первой азимутальной гармоник.

В связи с большим отличием характерных постоянных времени регулируемых неустойчивых гармоник различается и периодичность вычисления компонентов управляющего воздействия. Так, в контуре регулирования фундаментальной гармоник или интегральной мощности воздействие k_0 вычисляется с периодом 0,1—0,5 с, в то время как в контуре азимутальной гармоник период может достигать нескольких секунд. Для контура регулирования устойчивых высших гармоник период вычисления управляющего воздействия может быть еще больше. Подобное разделение позволяет повысить точность и надежность регулирования и, что очень важно, снижает требования к вычислительной мощности управляющей ЭВМ. За счет аппаратного разделения подсистем стабилизации гармоник (с помощью микро-ЭВМ) может быть повышена надежность и живучесть системы управления в целом.

Рассмотрим, как происходит компенсация отклонений от базового профиля нейтронного поля в соответствии с описанным алгоритмом. Синхронное (однаправленное) перемещение r стержней,

компенсирующее невязку по общей мощности, осуществляется по сигналу ошибки, равному взвешенной сумме отклонений от стационарного уровня сигналов датчиков:

$$\varepsilon_0 = \sum_{i=1}^n \alpha_i^0 \Phi_i, \quad (5)$$

где весовые коэффициенты α_i^0 , являющиеся элементами псевдообратной матрицы A_0^+ , одинаковы для всех r стержней при расположении их в выравненной зоне и определяются по показаниям каждого датчика относительно базового распределения. Калибровка общей мощности реактора по сигналам всех n внутриреакторных и вне реакторных датчиков позволяет поддерживать ее на заданном уровне с высокой точностью.

Как следует из математической модели (1), отклонение нейтронного поля от базового профиля после компенсации фундаментальной гармоник в основном определяется первой азимутальной гармоникой. Независимое перемещение j -го стержня для ее ликвидации определяется сигналом ошибки:

$$\varepsilon_j^1 = \sum_{i=1}^n \alpha_{ij}^1 \Phi_i. \quad (6)$$

Здесь весовые коэффициенты α_{ij}^1 , являющиеся элементами j -й строки матрицы обратной связи A_1^+ , определяются по значению первой азимутальной гармоник в местах расположения датчиков. То, что в вычислении амплитуды азимутальной гармоник участвуют все n датчиков, также увеличивает точность ее стабилизации.

Для компенсации оставшейся невязки, обусловленной суперпозицией высших гармоник отклонения от базового профиля, целесообразно использовать все m стержней СУЗ (порядка ста в реакторах типа РБМК), осуществляя локальное регулирование. Поскольку матрица A_*^+ сильно разрежена (в ней отсутствуют элементы дальнедействующих связей, обусловленных фундаментальной и первой азимутальной гармониками), перемещения стержней вычисляются практически по сигналам лишь ближайших датчиков.

Компенсация высших гармоник в основном является задачей высшего уровня иерархии системы регулирования нейтронного поля или даже задачей оптимизации энергораспределения, т. е. получения базового профиля [6]. Поэтому с учетом сделанных оговорок предположим, что задача компенсации высших гармоник решается программой «советчик оператора» [5, 6].

В целом к достоинствам предложенного алгоритма можно отнести повышение точности и надежности стабилизации гармоник за счет максимального (по сравнению с зонным регулированием) использования реакторной информации. Следует подчеркнуть, что такой алгоритм позволяет легко

отбраковывать ложную информацию (выход из строя датчика), так как вычисление амплитуд гармоник проводится с избыточной информацией.

Для иллюстрации алгоритма и структуры системы регулирования рассмотрим наглядный пример. Пусть четыре стержня расположены симметрично по квадрантам в максимуме радиальной функции первой радиально-азимутальной гармоники. Все датчики и стержни расположены в выравненной области с относительным значением нейтронного поля 1, причем показания датчиков каждого квадранта суммируются и усредняются («зонный» датчик). Для матрицы фундаментальной гармоники (мощности) A_0 , все члены которой равны 1, псевдообратная матрица имеет одинаковые элементы, равные $1/16$. Таким образом, в контуре стабилизации интегральной мощности сигнал ошибки для каждого стержня равен сумме сигналов датчиков с весом $1/4$, т. е. каждый стержень должен компенсировать четверть имеющейся невязки по реактивности.

В контуре стабилизации первой азимутальной гармоники в соответствии с матрицей обратной связи

$$A_1^* = \begin{bmatrix} 1/4 & 0 & -1/4 & 0 \\ 0 & 1/4 & 0 & -1/4 \\ -1/4 & 0 & 1/4 & 0 \\ 0 & -1/4 & 0 & 1/4 \end{bmatrix}.$$

Каждый датчик учитывается с весом $1/4$, причем по отношению к каждому стержню сигналам датчиков, расположенных в разных половинах реактора, приписываются разные знаки. Таким образом, каждая пара противоположных стержней перемещается навстречу друг другу и компенсирует половину имеющихся невязок по реактивности, связанных с синусной и косинусной составляющими первой азимутальной гармоники.

Важное практическое отличие предлагаемого алгоритма от алгоритмов зонного или локального регулирования состоит в том, что алгоритмы на основе инверсной модели используют в качестве сигналов ошибки непосредственно амплитуды возмущенных гармоник, а не значение нейтронного поля в точках контроля, как алгоритмы, основанные на принципе локального регулирования. Однако возможна и комбинированная система.

Применение локальных регуляторов. Предположим, что на базе немногих безынерционных детекторов реализуется алгоритм локального регулирования, причем возможна и его аналоговая реализация. На ЭВМ с периодом, существенно превышающим постоянную времени β -эмиссионных датчиков (единицы минут), по описанной схеме вычисляются управляющие воздействия для контура интегральной мощности

$$k_0 = A_0^* \Phi$$

и контура стабилизации азимутальной гармоники

$$k_1 = A_1^* \Phi,$$

где Φ — вектор отклонений поля от базового профиля с учетом работы локальных регуляторов.

Воспользовавшись очевидными соотношениями, найдем ожидаемое изменение профиля поля в местах расположения датчиков в соответствии с полученными управляющими воздействиями:

$$\delta \Phi_0 = A_0 A_0^* \Phi;$$

$$\delta \Phi_1 = A_1 A_1^* \Phi. \quad (7)$$

Теперь используем полученные значения для коррекции или калибровки уставок локальных регуляторов. На каждый из l локальных регуляторов к соответствующей уставке добавится компонент вектора $\delta \Phi_1$, а на уставку регулятора интегральной мощности — компонент вектора $\delta \Phi$. Если контуры объединены (система без специального регулятора мощности) и период вычисления коррекции одинаков для обоих контуров, то i -я уставка калибруется на величину $(\delta \Phi_0 + \delta \Phi_1)_i$.

Нужно обратить внимание на то, что схема с коррекцией уставок особенно эффективна для случая, когда матрица формы A_* , связывающая перемещение стержней с сигналами соответствующих датчиков, не является вырожденной, что хорошо выполняется при локальном регулировании. Тогда задание в качестве уставки оптимального показания локального датчика гарантирует регуляторам оптимальное положение стержня. В частности, для системы локального регулирования матрицу A_* можно считать диагональной.

При построении системы регулирования с разными по динамическим характеристикам датчиками можно воспользоваться также идеей, изложенной в обзоре [7]. Соответствующую этой идее схему вычисления управляющего воздействия поясним на примере контура стабилизации азимутальной гармоники. Сигнал ошибки для перемещения стержней формируется из трех компонентов:

безынерционного компонента

$$\varepsilon'_1 = \sum_{h=1}^l \alpha_h^1 \Phi_h,$$

где l — число безынерционных датчиков;

взвешенной суммы — инерционного компонента с передаточной функцией β -эмиссионного детектора $W_g(p)$

$$\varepsilon''_1 = \sum_{i=1}^n \alpha_i^1 \Phi_i,$$

где n — число «медленных» датчиков инерционного компонента;

инерционного компонента

$$\varepsilon'''_1 = - \sum_{h=1}^l \alpha_h^1 \Phi_h W_g(p),$$

компенсирующего в статике первый компонент.

Таким образом, динамическое поведение в основном определяется некалиброванным компонентом ε'_1 , статическое — откалиброванным компонентом ε''_1 . Такая схема по сравнению со схемой калибровки уставок приводит к большей загрузке управляющей ЭВМ, так как вычисление всех компонентов сигнала ошибки должно проводиться в ритме изменения сигнала инерционных датчиков, поэтому более целесообразна аналоговая реализация фильтров W_g . Структура на базе локального регулятора наиболее эффективна для стадии экспериментальной проверки и начального периода внедрения системы стабилизации гармоник.

Регулирование высотной гармоник. При регулировании радиального энергораспределения вносятся значительные возмущения аксиального распределения. Один из способов нейтрализации вредного влияния системы регулирования радиального энергораспределения на первую (наиболее существенную из аксиальных субгармоник) высотную гармонику — использование в качестве регулирующего органа в каждом контуре пары перемещающихся навстречу друг другу верхнего и нижнего стержней, размещенных в двух близко расположенных каналах. Такой орган оказывает симметричное по высоте воздействие на коэффициент размножения, вследствие чего практически не возбуждает первую высотную гармонику.

Дальнейшим развитием идеи независимого регулирования гармоник для стабилизации первой высотной гармоники является автономная система, не влияющая на интегральную мощность и азимутально-радиальное распределение. Основываясь на методе инверсной модели, в качестве сигнала ошибки такой системы можно использовать разность сигналов верхних и нижних датчиков, а в качестве исполнительного органа — укороченный стержень в центральной части активной зоны или пару из верхнего и нижнего стержней, перемещающихся в одном направлении, которые также могут быть объединены в один стержень, разделенный непоглощающей секцией [8]. Такой регулирующий орган вносит одинаковые управляющие воздействия в верхнюю и нижнюю половины активной зоны.

Регулирование высших гармоник. Обратимся теперь к контуру компенсации отклонений от стационарного профиля, связанных с высшими гармониками. Основываясь на свойстве разреженности матрицы A^* , с учетом ограничений управления можно предложить упрощенный алгоритм вычисления положения стержней, который реализуется в режиме «советчик оператора».

Решив систему линеаризованных уравнений нейтронного поля [4], пренебрегая малыми членами, связанными с запаздывающими нейтронами и

обратной связью, можно получить алгоритм построения инверсной модели в следующем виде:

$$k_j(p) = \frac{1}{\Phi_j} \sum_{i=1}^v b_{vj} [\varphi_j(p) - \varphi_i(p)], \quad (8)$$

где v — число суммируемых разностей сигналов «своего» j -го датчика с соседними (i) датчиками; b_{vj} — весовые коэффициенты разностей, зависящие от типа аппроксимации оператора Лапласа, числа и взаимного расположения датчиков, участвующих в аппроксимации. Этот алгоритм справедлив для реакторов как с отрицательным, так и с положительным мощностным коэффициентом реактивности, при этом регулирование низших гармоник, связанное с неучитываемыми алгоритмом (8) членами исходного уравнения, берут на себя контуры регулирования азимутальной и фундаментальной гармоник.

Таким образом, вычисление необходимых перемещений стержней в соответствии с (8) осуществляется по относительной кривизне эпюры отклонений нейтронного поля вблизи соответствующего стержня.

Ограничения управляющих воздействий по аналогии с алгоритмом, предложенным в работе [2], можно учесть с помощью простой логической процедуры: стержни, вышедшие на концевые выключатели, фиксируются в этом положении, стационарные положения остальных стержней уточняются после нескольких итераций путем псевдообращения матрицы A^* , усеченной за счет исключения стержней, вышедших на концевики.

В соответствии с концепцией независимого регулирования гармоник нейтронного поля в состав ограничений оптимизационной задачи высшего уровня иерархии по аналогии и наряду с ограничением постоянства общей мощности и баланса реактивности должны быть добавлены ограничения, учитывающие азимутальный баланс реактивности, т. е. условия невозбуждения азимутальной гармоник. Математически это может быть выражено как условие равенства с заданной точностью (по реактивности) управляющих воздействий по двум парам перекрывающихся половин реактора или, что эквивалентно, по квадрантам активной зоны.

Заключение. Дальнейшее развитие существующей концепции автоматического регулирования реакторов типа РБМК состоит в выделении и стабилизации неустойчивой первой азимутальной гармоники нейтронного поля. Описанный алгоритм регулирования на основе инверсной модели предполагает независимое (автономное) регулирование в общем случае N неустойчивых гармоник. Это позволяет значительно снизить требования к оперативности расчетов по оптимизации энергораспределения и допускает аппаратное разделение подсистем, что повышает надежность системы в целом.

Суть алгоритма в том, что регулируется не отклонение нейтронного поля от стационарного профиля в точках контроля, а вычисленная с помощью инверсной модели амплитуда соответствующей гармоник. При этом управляющее воздействие для каждого стержня вычисляется по сигналам всех датчиков, что также повышает надежность и точность регулирования.

Рассмотрены характерные особенности нескольких практических структур систем прямого регулирования первых гармоник нейтронного поля. Многочисленные вычислительные эксперименты на моделях показали эффективность предложенных алгоритмов. Настоящий метод является одним из возможных путей стабилизации нейтронного поля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Потапенко П. Т. «Атомная энергия», 1969, т. 27, вып. 3, с. 189.
2. Емельянов И. Я. и др. «Атомная энергия», 1977, т. 42, вып. 4, с. 263.
3. Kendall J. In: Proc. Canadian Conf. on Automatic Control. Fredericton, 1973.
4. Потапенко П. Т. «Атомная энергия», 1976, т. 41, вып. 1, с. 25.
5. Емельянов И. Я. и др. «Атомная энергия», 1978, т. 44, вып. 6, с. 483.
6. Емельянов И. Я. и др. Там же, вып. 4, с. 310.
7. Потапенко П. Т. и др. «Атомная техника за рубежом», 1977, № 12, с. 3.
8. Косилов А. Н. и др. Там же, 1975, № 7, с. 17.

Поступила в Редакцию 17.07.78
В окончательной редакции 09.01.79

УДК 621.039.54

Некоторые вопросы статистической оценки работоспособности твэлов быстрых реакторов

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

Точность предсказания работоспособности твэлов проектируемых быстрых реакторов определяется несколькими факторами — корректностью модели, описывающей напряженно-деформированное состояние, правильностью выбранных критериев работоспособности элементов, знанием физико-механических характеристик и поведения материалов в условиях облучения.

Накопленный в настоящее время как отечественный [1—3], так и зарубежный [4—6] опыт разработки математических моделей для определения работоспособности твэлов, основанный на анализе многочисленных экспериментальных данных, дает основания полагать, что неопределенности расчетов, связанные с самими моделями (вследствие недостаточного полного учета факторов, влияющих на работоспособность твэлов), не являются определяющими. Но-видимому, основной вклад в неопределенности расчета дает недостаточная изученность физико-механических свойств и поведения материалов в условиях облучения.

В настоящее время знания свойств материалов ограничены, особенно в области флюенса нейтронов более 10^{23} нейтр./см² и $E > 0,1$ МэВ, а твэлы проектируемых реакторов должны работать при флюенсе нейтронов $(2 \div 3) \cdot 10^{23}$ нейтр./см² и $E > 0,1$ МэВ в условиях высокой интенсивности нейтронного потока и высокоэнергетического спектра. Поэтому выбор конструкции твэлов и допустимой глубины выгорания проводился, как правило, на основе наиболее «пессимистических» оценок, т. е. при неблагоприятной комбинации параметров с точки зрения надежности работы твэлов. Этот подход на первых этапах разработки быстрых

реакторов является оправданным из-за отсутствия опыта работы твэлов в условиях большого быстрого реактора и малой изученности некоторых свойств материалов.

Проведение статистического анализа позволяет более полно отразить общую картину состояния работы твэлов и понять, какие характеристики или свойства материалов вносят наибольшую неопределенность при расчетах работоспособности твэлов и требуют первоочередного изучения. Этот анализ является также необходимым при статистической интерпретации экспериментальных и расчетных данных работоспособности твэлов. Использование статистических методов выдвигает и новые подходы при оценке работоспособности твэлов. Так, если раньше при расчетах определялось предельное выгорание топлива, после которого можно было ожидать разгерметизацию твэлов, то теперь основной характеристикой будет число разгерметизированных твэлов к заданному моменту времени работы реактора, не превышающее допустимых значений.

Определение значений математических ожиданий и дисперсий параметров работоспособности твэлов. При расчете работоспособности твэлов по той или иной модели [1—3] вначале определяется кинетика напряженно-деформированного состояния твэла в процессе его работы в реакторе, затем проводится оценка работоспособности по выбранным критериям. Расчет напряженно-деформированного состояния твэла зависит от многих параметров, которые являются случайными величинами. Поэтому определяемое состояние твэла является функцией случайных величин. Задача состоит