

Устойчивость системы регулирования распределения мощности в реакторе

Филипчук Е. В., Потапенко П. Т., Косидов А. Н.

УДК 621.039.515

Бурное развитие ядерной энергетики требует больших материальных средств. В связи с этим для увеличения ее эффективности к системам управления современных реакторов предъявляются более высокие требования, чем на начальном этапе развития.

В настоящее время наметилась устойчивая тенденция к увеличению размеров и мощностей энергетических реакторов. Эти количественные изменения потребовали качественно нового подхода к управлению реактором как к объекту с распределенными параметрами (в частности, все современные реакторы оснащаются системами внутриреакторного контроля).

В статье [1] дан систематизированный обзор многочисленных работ по пространственной динамике нейтронного поля реактора. В настоящей работе использована так называемая адиабатическая модель реактора, предполагающая разделение пространственной и временной составляющих нейтронного потока. Разумеется, указанное представление является приближенным. Оно допустимо при решении задач регулирования нейтронного поля, так как регулирование — медленный процесс в сравнении с временами перераспределения поля при локальном изменении реактивности, а также вследствие малости отклонений нейтронного поля от стационарного распределения [2].

В работе [3] получены условия устойчивости стационарного распределения мощности реактора, в котором отсутствует система регулирования. Инженерные аспекты этой проблемы рассматриваются также в монографии [4].

В настоящей работе приведена инженерная методика анализа устойчивости автоматической системы регулирования распределения мощности в реакторе. Используемая при анализе математическая модель ограничивает класс решаемой задачи реакторами с устойчивым пространственным распределением мощности, в которых динамикой внутренних обратных связей можно пренебречь. Так, в сравнении с динамикой регулирования распределения мощности отрицательная обратная связь, обусловленная эффектом Доплера, полагается безынерционной, а эффекты, связанные с отравлением ксеноном, не учитываются, как медленно действующие.

Для стабилизации и оптимизации нейтронного поля активная зона разбивается на несколько областей, в каждой из которых рас-

полагается нейтронный датчик и стержень системы регулирования. Мощность каждой области стабилизируется этим стержнем, называемым далее локальным регулятором. При работе все локальные регуляторы связаны между собой через реактор.

Таким образом, автоматизация управления распределением мощности приводит к созданию многосвязных систем регулирования. При построении этих систем проблема устойчивости регулирования должна быть решена в первую очередь.

В отличие от работы [5] проанализируем системы без искусственных связей между локальными регуляторами. Структура системы представлена на рис. 1, где индексы означают номер локального регулятора; W_d и W — передаточные функции датчика и регулятора. Уставки мощности n_0 на задатчики локальных регуляторов подаются в соответствии с формой распределения мощности, рассчитанной по необходимому критерию оптимальности.

Передаточная матрица реактора H , связывающая изменение нейтронного потока δn в местах расположения датчиков с изменениями коэффициента размножения в ячейках δk или перемещениями стержней на основе адиабатической модели, может быть представлена в виде

$$H = W_0 A, \quad (1)$$

где A — числовая матрица, определяемая из статических расчетов или эксперимента; W_0 — передаточная функция «точечного» реактора. При этом

$$\delta n = H \delta k,$$

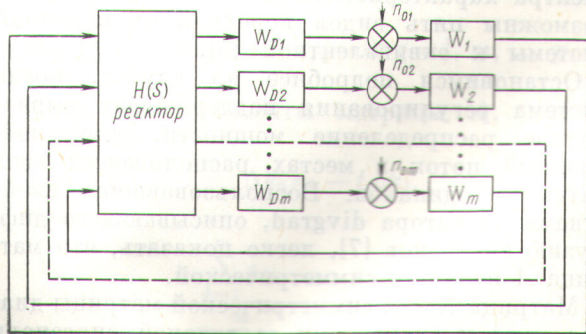


Рис. 1. Блок-схема системы регулирования.

а для установившегося состояния

$$\delta n = A \delta k.$$

Для реактора, обладающего отрицательным мощностным коэффициентом реактивности, матрица A определяется экспериментально измерением приращений потока всеми датчиками в ответ на перемещения исполнительных стержней локальных регуляторов. В указанной трактовке коэффициент усиления для передаточной функции W_0 , очевидно, должен быть принят равным единице.

Матричное уравнение системы, представленной на рис. 1, с учетом (1) имеет вид

$$[E + W_0 D W A] \delta n = W_0 D W A \delta n_0. \quad (2)$$

Здесь D и W — диагональные матрицы, составленные из передаточных функций датчиков и локальных регуляторов; E — единичная матрица; δn_0 и δn — векторы изменения уставок и нейтронного потока.

Введем новые координаты, связанные со старыми невырожденной матрицей преобразования C :

$$\delta n_0 = C N_0; \quad \delta n = C N.$$

Уравнение (2) в новой системе координат запишется в виде

$$C^{-1} [E + W_0 D W A] C N = C^{-1} W_0 D W A C N_0. \quad (3)$$

Естественно, передаточные функции локальных регуляторов и датчиков выбрать одинаковыми. Тогда матрицы W и D будут скалярными. С учетом этого уравнение (3) преобразуется следующим образом:

$$[E + W_0 D W C^{-1} A C] N = W_0 D W C^{-1} A C N_0. \quad (4)$$

Как известно, если в качестве матрицы C взять канонический базис матрицы A , то $C^{-1} A C = \Lambda$

дает вместо матрицы A ее каноническую, предельно простую форму Λ . В зависимости от спектра характеристических чисел матрицы A возможны пять видов перехода от исходной системы к эквивалентной [6].

Остановимся подробнее на случае, когда система регулирования поддерживает выравненное распределение мощности, т. е. нейтронный поток в местах расположения всех датчиков одинаков. Воспользовавшись свойствами оператора divgrad , описывающего диффузию нейтронов [7], легко показать, что матрица A является симметрической.

Матрица Λ для симметрической матрицы диагональна и элементами ее главной диагонали служат характеристические (вещественные)

числа λ_i матрицы A . Из (4) следует, что многомерная система распадается на m (по числу локальных регуляторов) одномерных систем, отличающихся друг от друга лишь звеньями с коэффициентами усиления $\lambda_i, \lambda_2, \dots, \lambda_m$.

Устойчивость исходной системы в соответствии с (2) определяется характеристическим уравнением

$$\det [E + W_0 D W A] = 0. \quad (5)$$

Так как переход от исходной системы к эквивалентной осуществляется преобразованием подобия, корни их характеристических уравнений совпадают:

$$\det [E + W_0 D W \Lambda] = \prod_{i=1}^m [1 + W_0 D W \lambda_i] = 0. \quad (6)$$

Таким образом, характеристическое уравнение эквивалентной системы распалось на m характеристических уравнений эквивалентных сепаратных систем.

$$1 + W_0 D W \lambda_i = 0, \quad i = 1, 2, 3, \dots, m. \quad (7)$$

Поэтому для устойчивости системы необходимо и достаточно, чтобы каждая из m сепаратных систем была устойчива.

Если все λ_i вещественны и положительны, как в рассматриваемом случае, то достаточно ограничиться исследованием устойчивости сепаратной системы с λ_i макс.

Приведем численные результаты исследования устойчивости регулирования для конкретного реактора с параметрами: диаметр активной зоны 52 (далее всюду линейные размеры выражаются в длинах миграции нейтронов), диаметр выравненной зоны (зоны управления) 32. Регулирование ведется на номинальной мощности, при которой мощностной коэффициент реактивности составляет 1 цент на 1 % отклонения мощности.

На рис. 2 представлены зависимости пороговых коэффициентов усиления локальных регуляторов, соответствующих границе устойчивости, K от их количества m при неизменном шаге между ними h (1) и от шага между регуляторами при неизменном их количестве (2). Эти результаты получены для медленнодействующих локальных регуляторов, передаточная функция которых совместно с датчиком

$$W_1 = \frac{K e^{-s\tau}}{s(40s+1)(10s+1)(2,5s+1)}. \quad (8)$$

Локальные регуляторы во всех случаях размещаются в центральной части активной зоны на одинаковом расстоянии друг от друга.

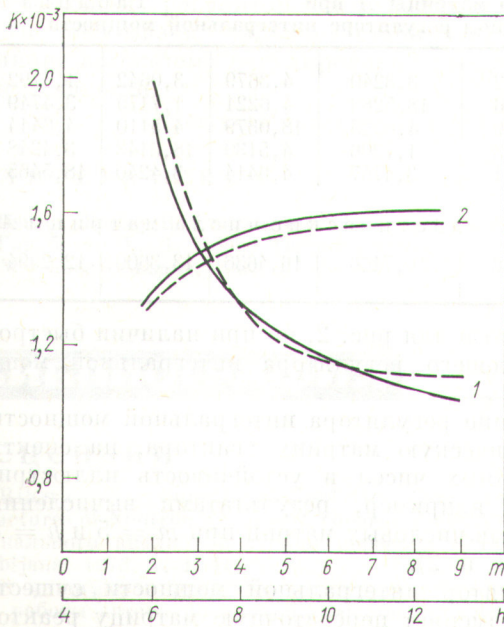


Рис. 2. Зависимость пороговых коэффициентов усиления локальных регуляторов K с передаточной функцией W_1 от числа регуляторов m и расстояния между ними h .
— теоретическая зависимость; — — — — — аналоговое моделирование.

На рис. 3 представлены аналогичные результаты для быстродействующих регуляторов с передаточной функцией

$$W_2 = \frac{K}{s(4s+1)(0,2s+1)} \quad (9)$$

При вычислениях собственных чисел на ЭВМ и аналоговом моделировании использовалась однорупповая диффузионная модель активной зоны.

Требования к системе регулирования интегральной мощности реактора значительно жестче, чем в системе регулирования распределения мощности, в частности в первой системе требуются гораздо большее быстродействие (на порядок) и более высокая надежность.

Система регулирования распределения мощности, хотя и выполняет одновременно функции регулятора интегральной мощности, обычно не может удовлетворить указанным жестким требованиям. Поэтому при практической реализации многосвязной системы регулирования необходимо дополнительный специальный контур регулирования интегральной мощности.

Найдем числовую матрицу реактора A с учетом работы астатического регулятора интеграль-

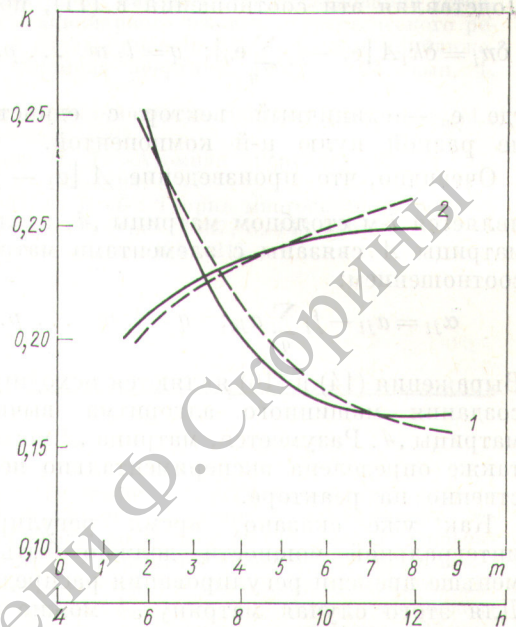


Рис. 3. Зависимость пороговых коэффициентов усиления локальных регуляторов K с передаточной функцией W_2 от числа регуляторов m и расстояния между ними h .

ной мощности; при этом, как и ранее,

$$\delta n = A \delta k \quad (10)$$

или

$$\delta n = A (\delta k + \Delta k_0), \quad (11)$$

где Δk_0 — вектор воздействия регулятора интегральной мощности.

Пусть внешнее возмущение δk вносится только в i -ю ячейку. Стержни регулятора интегральной мощности, компенсирующего указанное локальное возмущение, двигаются синхронно в ячейках $l, m, \dots p$. Тогда условие астатического регулирования запишется в следующем виде:

$$\delta k_i \sum_{j=1}^m a_{ji} + \Delta k_0 \sum_{q=l, m, \dots p} \sum_{j=1}^m a_{jq} = 0; \quad q = l, m, \dots p. \quad (12)$$

Здесь a_{ji} — элементы матрицы A .

Отсюда

$$\Delta k_0 = -f_i \delta k_i, \quad (13)$$

где

$$f_i = \frac{\sum_{j=1}^m a_{ji}}{\sum_{q=l, m, \dots p} \sum_{j=1}^m a_{jq}}; \quad q = l, m, \dots p. \quad (14)$$

Подставляя эти соотношения в (11), получим:

$$\delta n_i = \delta k_i A [e_i - f_i \sum_q e_q]; \quad q = l, m, \dots p, \quad (15)$$

где e_μ — единичный вектор с единственной не равной нулю μ -й компонентой.

Очевидно, что произведение $A [e_i - f_i \sum_q e_q]$ является i -м столбцом матрицы A , а элементы матрицы A связаны с элементами матрицы $\mathcal{A}$ соотношением:

$$a_{ji} = a_{ji} - f_i \sum_q a_{jq}; \quad q = l, m, \dots p. \quad (16)$$

Выражения (14) и (16) являются исходными для создания машинного алгоритма вычисления матрицы $\mathcal{A}$. Разумеется, матрица A может быть также определена экспериментально непосредственно на реакторе.

Как уже сказано, время регулирования интегральной мощности должно быть много меньше времени регулирования распределения. Для этого случая матрицу A можно считать передаточной матрицей реактора.

Теперь для анализа устойчивости применима методика, изложенная выше, при этом необходимо вычислять собственные числа матрицы A вместо $\mathcal{A}$ и принять $W_0 = 1$.

На рис. 4 представлены зависимости пороговых коэффициентов усиления при тех же усло-

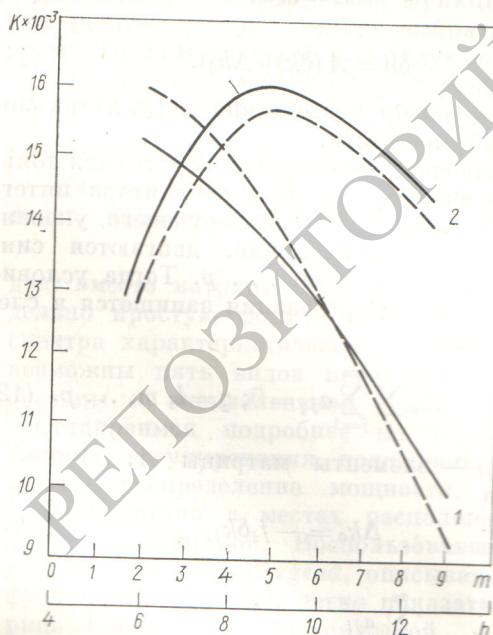


Рис. 4. Зависимость пороговых коэффициентов усиления локальных регуляторов K от числа регуляторов m и расстояния между ними h при наличии регулятора интегральной мощности.

Элементы матрицы A при отключенном регуляторе интегральной мощности Таблица 1

17,8592	3,3240	4,3679	3,0642	1,6792
3,3286	18,5283	4,6221	1,7175	3,4749
3,3869	4,6245	18,0379	4,5110	4,6414
3,0853	1,7206	4,5130	18,3143	3,4248
1,6861	3,4757	4,6414	3,4240	18,5465
Характеристические числа матрицы A				
32,4166	16,7466	16,4636	13,3600	12,2994

виях, что и для рис. 2, но при наличии быстродействующего регулятора интегральной мощности.

Влияние регулятора интегральной мощности на статическую матрицу реактора, на спектр собственных чисел и устойчивость иллюстрируется, например, результатами вычисления элементов числовых матриц при $m = 5$ и $h = 8$ (табл. 1 и 2).

Регулятор интегральной мощности существенно изменяет передаточную матрицу реактора; для устойчивости важно, что при этом резко уменьшаются характеристические числа. Из сравнения рис. 2 и 4 видно, что влияние регулятора интегральной мощности на устойчивость еще более резко вследствие улучшения динамических характеристик реактора. Рассмотренная методика может быть использована и при произвольном, в частности неравномерном, размещении датчиков и регулирующих стержней в активной зоне.

Таким образом, предложена методика анализа устойчивости системы регулирования распределения мощности в активной зоне, которая распространена на случай, когда интегральная мощность реактора стабилизируется специальным быстродействующим регулятором. С увеличением числа локальных регуляторов их пороговые коэффициенты усиления уменьшаются. Шаг между регуляторами меньше влияет на устойчивость, чем их количество. Быстро-

Элементы матрицы $\mathcal{A}$ при включенном регуляторе интегральной мощности Таблица 2

14,8024	-0,0965	0,9207	-0,1810	-1,7668
-0,1317	14,6563	0,7196	-1,9562	-0,4262
1,6665	1,5805	14,9701	1,6229	1,5746
-0,1859	-1,9397	0,8238	14,8412	-0,2631
1,8033	-0,4288	0,7061	-0,2806	14,6125
Характеристические числа матрицы $\mathcal{A}$				
16,7465	16,1271	16,5978	13,3570	11,0541

действующий регулятор интегральной мощности оказывает сильное стабилизирующее влияние на систему регулирования распределения мощности.

Поступила в Редакцию 13/XI 1972 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Hsu C., Bailey R. Trans. Amer. Nucl. Soc., v. 2, № 2.
2. Гарабедян Х. Л. В сб.: Теория ядерных реакторов. М., Госатомиздат, 1963, с. 284—318.

3. Постников И. С., Сабаев Е. Ф. Исследование устойчивости стационарного режима энергетического реактора в одноступенчатом диффузионном приближении. — «Атомная энергия», 1968, т. 24, вып. 1, с. 38—42.
4. Хитчок А. Устойчивость ядерных реакторов. М., Госатомиздат, 1963.
5. Потанин П. Т. «Атомная энергия», 1969, т. 27, вып. 3, с. 189—193.
6. Соболев О. С. В сб.: Теория многосвязного регулирования. М., «Наука», 1967, с. 143—161.
7. Варга Р. См. [2], с. 187—215.

БИБЛИОГРАФИЯ

Рецензии

Ribaric M. *Functional-Analytic Concepts and Structures of Neutron Transport Theory*. (Понятие функционального анализа и теории переноса нейтронов.) Ljubljana, 1973, v. I, II.

В монографии представлены результаты многолетней работы автора по применению аппарата функционального анализа в некоторых задачах теории переноса нейтронов. Разрабатывается теория определения нейтроннофизических свойств среды, состоящей из отдельных частей, свойства которых известны. В основу теории положен альбедный подход.

Первый том состоит из 23 глав, сгруппированных в пять разделов. Основные математические определения представлены во втором томе.

В первом разделе (главы 2—4) рассматривается переход нейтронов через границу единичного изолированного тела. Вводятся основные определения и предположения, оцениваются отражающие свойства среды в ограниченном интервале времени, устанавливаются принципы непрерывности, инвариантности и законы условного сохранения альбедного оператора. В четвертой главе раздела рассматривается изменение отражающих свойств среды в бесконечном временном интервале. Делается предположение об асимптотическом характере реакции среды на импульс влетающих нейтронов. Устанавливаются соотношения между физическими понятиями, такими, как альbedo в стационарном состоянии, среднее состояние на бесконечном временном интервале, пропускание, реакция на импульс и т. д.

Во втором разделе (главы 5—9) изучаются отражающие свойства среды, состоящей из нескольких частей. Исследуется состояние среды в ограниченном временном интервале, дается определение составной среды и выводится основное уравнение, описывающее ее состояние. Рассматривается состояние составной среды из подкритических частей, в бесконечном интервале времени. В седьмой главе вводятся понятия, определяющие процессы, происходящие в составной среде (среднее распределение нейтронов после бесконечного числа отражений, среднее число отражений, среднее время и скорость отражения и пр.). Асимптотические свойства среды, состоящей из подкритических равномерно связанных частей с постоянным альbedo в бесконечном временном интервале, и свойства среды, близкой к критическому состоянию, обсуждаются в последних главах раздела.

Вопросам измерений, экспериментальному определению распределений нейтронов и отражающих характеристик среды посвящен третий раздел монографии (главы 10—15). Вводится понятие линейного измерения, устанавливается его отношение с понятием линейного функционала, дается определение сопряженного оператора и сопряженного уравнения. Обсуждаются измерения в стационарном и динамическом состояниях, а также неточности измерений. Дается математическая интерпретация экспериментально измеряемых величин, которые определяются при пересечении нейтронами поверхностей составляющих среду частей. В заключение раздела обсуждается вопрос косвенного экспериментального определения отражающих свойств составной среды на основании экспериментальных данных по отражающим свойствам составляющих ее частей в стационарном и нестационарном состояниях.

В четвертом разделе (главы 16—18) рассматривается определение свойств составной среды через свойства частей с использованием альбедных уравнений. Показано существование конечномерных приближений линейной теории взаимодействующих систем. Изучаются проблемы, связанные с расчетом подкритического состояния в конечном временном интервале. В последней главе обсуждаются расчеты, позволяющие получать приближенные решения задачи на собственное значение.

В пятом разделе монографии (главы 19—23) рассматривается несколько специальных вопросов, имеющих отношение к содержанию первых двух частей. Определяются отражающие свойства составной среды в отдельной его части в транспортном приближении, состояния среды и пр. Рассмотрен случай, когда отражающие свойства среды и ее частей имеют нелинейный характер. В последних главах устанавливается связь между предлагаемой теорией и теорией поля, обсуждается роль математических моделей в естественных науках.

В монографии показано, что некоторые понятия теории реактора можно хорошо описать в функционально-аналитических терминах. Интерес представляет и установление простых физических интерпретаций основных понятий функционального анализа. Показана роль физических предположений при определении математической модели.

В силу своей спецификации книга не может служить пособием при изучении теории реактора. Однако