

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования
«ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

В.И. Карначук

**СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО
ВЫРАВНИВАНИЯ НЕЙТРОННОГО ПОТОКА
В ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРАХ**

Учебное пособие

Издательство
Томского политехнического университета
2009

УДК 621.039.57(078.8)

К21

Карначук В.И.

К21 Системы автоматического выравнивания нейтронного потока в ядерных реакторах: учебное пособие / В.И. Карначук; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – 221 с.

ISBN 978-5-98298-805-8

Пособие разработано в рамках реализации Инновационной образовательной программы ТПУ по направлению «Атомная энергетика, ядерный топливный цикл, безопасное обращение с радиоактивными отходами и отработанным ядерным топливом, обеспечение безопасности и противодействия терроризму».

Предназначено для студентов физико-технических специальностей, специализирующихся в разработке и эксплуатации аппаратуры и систем управления ядерных уран-графитовых реакторов.

УДК 621.039.57(078.8)

Рецензенты

Доктор технических наук, профессор СТА

Б.М. Кербель

Доктор технических наук, профессор,
декан факультета систем управления ТУСУРа

Н.В. Замятин

ISBN 978-5-98298-805-8

© Томский политехнический университет, 2009

© Карначук В.И., 2009

© Оформление. Издательство Томского
политехнического университета, 2009

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ

АКНП – аппаратура контроля нейтронного потока

АРМ-5С – автоматический регулятор мощности реактора ВВЭР-1000

БЩУ – блочный щит управления

ВРК – внутрореакторный контроль

ИК – ионизационные камеры

ИМ – исполнительные механизмы

ЛАР – локальный автоматический регулятор

МОСАР – многосвязная однотипная система автоматического регулирования

МСАР – многосвязная система автоматического регулирования

ОР – органы регулирования (поглощающие стержни)

РОМ-2 – устройство разгрузки и ограничения мощности

РЩУ – резервный щит управления

САР – система автоматического регулирования

СУЗ – система управления и защиты

ШЭМ – шаговый электромагнитный привод

ЭГСР – электрогидравлическая система регулирования турбины

ОТ АВТОРА

Проблеме выравнивания распределения нейтронного потока в рабочем пространстве активной зоны ядерного реактора столько же лет, сколько атомной энергетике в целом. Эксплуатация уже первых ядерных реакторов показала, что автоматическая стабилизация плотности нейтронного потока в целом по реактору должна быть дополнена устройствами управления распределением этой мощности по активной зоне. Многочисленные аварии на реакторах, как у нас в стране, так и за рубежом, происходили не по причине отказа системы регулирования интегральной мощности (она поддерживала мощность на заданном уровне), а по отсутствию контроля и соответствующего управления распределением мощности по активной зоне.

Дело в том, что реактор, как объект управления, является неустойчивым элементом системы. При нормальном режиме эксплуатации происходят самопроизвольные колебания мощности, которые при отсутствии соответствующего управления нарастают по амплитуде и могут привести к срабатыванию аварийной защиты и остановке реактора. Это так называемые ксеноновые колебания, вызванные неустойчивым контуром внутренней обратной связи реактора по отравлению продуктами деления. Известно, что ввиду малой частоты ксеноновых колебаний (одно-два колебания в сутки), они могут быть скомпенсированы ручным перемещением поглощающих стержней, не вызывая серьезной загрузки операторов управления.

Однако, ситуация осложняется тем, что управляющие стержни при своем перемещении сверху-вниз активной зоны создают неравномерности распределения нейтронного потока. Плотность потока в нижней части активной зоны увеличивается по сравнению с верхней частью, возникает так называемое распределение типа «бутылки». Поскольку амплитуда ксеноновых колебаний прямо пропорциональна плотности нейтронного потока, то в нижней части реактора она больше, чем в верхней, поэтому устойчивость распределения нейтронного поля по объему реактора ухудшается.

Для активных зон малых размеров утечка нейтронов стабилизирует распределение нейтронной плотности, поэтому для них проблема распределения потока решается достаточно легко ручными системами управления, так называемыми системами физического профилирования нейтронного поля. К ним относятся неравномерная загрузка топлива, добавка в топливо выгорающих поглотителей, введение укороченных

стержней ручного управления «снизу-вверх», добавка борной кислоты в наиболее энергонапряженный участок объема активной зоны и т. п.

Но ситуация сильно ухудшается, когда современная атомная энергетика начинает эксплуатировать реакторы с большим объемом активной зоны, или использовать реакторы с большим удельным энерговыделением. Из практики эксплуатации известно, что к большим реакторам относятся реакторы, у которых квадрат отношения диаметра

активной зоны к длине миграции нейтронов больше 100: $\left(\frac{D}{M}\right)^2 > 100$

Ввиду того, что стабилизирующее действие утечки нейтронов здесь ослабевает, распределение нейтронов в активной зоне носит неустойчивый характер. Это приводит в некоторых случаях к тому, что оператору управления приходится совершать 50–60 ручных операций в минуту для стабилизации распределения нейтронного поля с помощью управляющих стержней РР. Утомляемость операторов управления настолько велика, что приходится говорить о необходимости введения *автоматического* управления распределением нейтронного потока, потому что без этого становится невозможной эксплуатация таких реакторов. Именно так складывалась ситуация в английской атомной энергетике, когда вводили в строй серию больших (и экономически выгодных разумеется) атомных реакторов типа Хинкли-Пойнт, именно так сложилась ситуация в России с пуском первой очереди Ленинградской АЭС на реакторе РБМК.

Для реакторов типа ВВЭР-1000, на которых планируется развитие атомной энергетике России в недалеком будущем, размеры активной зоны таковы, что радиальные ксеноновые колебания успешно купируются утечкой, поэтому для них можно говорить только о подавлении осевой неравномерности. Увеличение удельной энергонапряженности в реакторах этого типа увеличивает экономичность их работы, но и приводит к нестабильности аксиального распределения потока и опасности кризиса теплосъема в наиболее напряженных участках активной зоны.

Из сказанного следует, что современная система автоматического управления мощностью реактора претерпевает значительные изменения, связанные с необходимостью выполнения двух функций одновременно: управления средней, интегральной мощностью реактора и управления распределением этой мощности по пространству активной зоны. На первом этапе ставится задача автоматического управления распределением потока по высоте (для водоводяных реакторов) или по радиусу (для канальных уран-графитовых реакторов). Задача автомати-

ческого управления по объему активной зоны, то есть по радиусу и высоте, в настоящее время неразрешима, потому что сегодня не существует надежный управляющий орган, который бы мог управлять одновременно нейтронным потоком в обоих направлениях.

Системы автоматического управления мощностью современных ядерных реакторов значительно отличаются от систем, применяемых совсем недавно. Еще недавно технические регламенты категорически запрещали включение в одновременную работу двух и более каналов регулирования нейтронной мощности. Потребовалось время и усилия, чтобы в практику регулирования мощности реакторов вошло понятие локального автоматического регулятора (ЛАР), который может осуществлять управление мощностью определенного участка активной зоны, не мешая при этом другим таким же соседним регуляторам. Необходимо было спроектировать, испытать и опробовать в лабораторных и производственных условиях различные алгоритмы управления нейтронным полем реактора, доказать их устойчивость в работе и добиться хорошего качества ведения процесса управления. По существующей классификации систем эти системы относятся к многосвязным автоматическим системам регулирования (МСАР), состоящим из большого количества контуров регулирования, теория и практика которых находится еще в стадии становления.

Всем этим вопросам и посвящено настоящее учебное пособие, ориентированное на проектировщиков и эксплуатационников таких систем на российских энергетических ядерных реакторах. Так как задачи проектирования и эксплуатации значительно разнятся между собой, то книга окажется неодинаково ценной и даже понятной отдельным читателям. В связи с этим приведем краткое описание отдельных глав, чтобы можно было ориентироваться в проблеме в целом, опуская непонятные или кажущиеся ненужными разделы.

Первая глава посвящена краткому описанию существующих систем управления мощностью современных российских реакторов ВВЭР и РБМК. По этому вопросу существует большое количество литературы, но многие вопросы технической реализации систем остаются неосвещенными. Сведения, почерпнутые из технической документации и пособий для учебно-тренировочных центров атомных станций, окажутся полезными для всех категорий читателей.

Во второй главе рассматриваются вопросы математического представления реактора, как объекта автоматического многосвязного управления. Проектировщикам систем понятно, что без математической модели объекта управления нельзя приступать к расчету любой системы управления. Поэтому глава ориентирована именно для них. Надо только отметить, что в силу интересов автора большее внимание

уделено методам локальной кинетики и конечно-разностного, сеточного моделирования. Во-первых, эти методы выросли так сказать на местной почве и долгое время разрабатывались в стенах Томского политехнического, а во-вторых, сеточные имитаторы, построение которых кратко описано во второй главе, являются до сих пор достаточно точным средством моделирования и проверки работоспособности систем управления мощности реактора *в реальном времени* в лабораторных условиях. Так как лабораторную проверку все описываемые алгоритмы проходили именно на сеточных имитаторах, то хотя бы бегло надо иметь представления об их построении.

Третья глава полезна специалистам по автоматическому управлению и студентам старших курсов соответствующих специальностей. Она представляет собой краткий курс теории линейных многосвязных систем регулирования, особенно однопоточных систем, состоящих из одинаковых каналов автоматического регулирования. Именно к этому типу систем относится МСАР мощности реактора, если ее задачей является стабилизация *равномерного* распределения нейтронного потока. Эксплуатационники могут опустить этот материал, так же как и расчеты устойчивости многосвязных систем реактора в следующих главах.

В четвертой главе описываются алгоритмы работы систем многосвязного регулирования реактора, в которых один канал регулирования выделен специально для регулирования средней мощности реактора в целом. Так как он по техническому насыщению полностью повторяет известную штатную систему регулирования нейтронной мощности реактора, то описывается только в виде структурных схем. Остальные каналы регулирования, работающие от более инерционных ВРК – датчиков, предназначены для регулирования мощности в каждой отдельной зоне управления. Для эксплуатационников и студентов соответствующих специальностей будет интересно рассмотреть результаты лабораторных и производственных испытаний данных систем, которые приведены в этой главе. Впервые в отечественной практике разработка и производственные испытания таких систем прошли в Томске.

Пятая глава посвящена многосвязным системам регулирования мощности реактора, в которых нет специального канала регулирования средней мощности реактора. В отечественной литературе эти системы называют *системами зонного регулирования*. Здесь все однопоточные локальные регуляторы одновременно выполняют обе задачи – управление средней мощностью реактора и ее распределением по активной зоне. В настоящее время эти системы являются единственными МСАР мощности реактора, реализованными в атомной энергетике России. Интерес для эксплуатационников представляют результаты лабораторных

и производственных испытаний этих систем, показывающие их положительные стороны и недостатки.

В заключение считаю своим приятным долгом выразить искреннюю благодарность кандидатам технических наук Смиренскому О.В., Войлошникову В.А., Тотьменинову М.Е. и Шишлову В.И. за любезное предоставление материалов, вошедших составной частью в данное учебное пособие.

Карначук В.И.

ВВЕДЕНИЕ

Современные объекты управления в промышленности, и в частности, в атомной промышленности, рассматриваются с позиций комплексного управления как сложные нелинейные системы с распределенными параметрами, с обычно взаимосвязанными регулируемыми величинами. При регулировании таких взаимосвязанных процессов, происходящих в одном объекте, применяются многосвязные системы регулирования (МСАР). Отличительной чертой этих систем является наличие многих регулируемых величин, в общем случае влияющих друг на друга. Требования комплексной автоматизации ставят задачу выявления этих связей, а затем анализа и синтеза МСАР как единого целого.

Большой энергетический ядерный реактор является типичным примером объекта с распределенными параметрами. Известно, что наряду с регулированием интегральной мощности реактора необходимо контролировать целый ряд технологических параметров, от распределения которых по активной зоне зависит сохранение нормального режима работы и в конечном счете – зависит возможность работы реактора на номинальном уровне мощности. В качестве примера распределенных параметров реактора можно указать на распределение температуры в технологических каналах, распределение расходов теплоносителя, распределение нейтронного потока и, наконец, распределение энерговыделения по активной зоне.

Распределение энерговыделения и его первопричины – нейтронного потока, непосредственно определяет работу реактора, поскольку мощность его ограничена максимально-допустимой энергонапряженностью топливных элементов, то есть максимальной температурой местного нагрева. Вследствие неравномерного распределения нейтронного потока по активной зоне технологические каналы отдельных ее областей оказываются энергетически перенапряженными. Оператор, устраняя эту неравномерность, может вызвать нежелательные температурные переходные процессы, вследствие чего мощность реактора приходится снижать, если выровнять распределение потока не представляется возможным.

Для реакторов с малыми размерами активной зоны, у которых распределение потока нейтронов стабилизировано утечкой на периферии, распределение энерговыделения можно поддерживать на заданном уровне, близком к равномерному, с помощью перемещения стержней ручной регулировки и с помощью средств физического профилирования: неравномерным обогащением топлива, неравномерным расходом

теплоносителя, установки в активной зоне выгорающих поглотителей, создания неравномерной решетки каналов и т. п.

Однако, с увеличением размеров активной зоны и единичной мощности реакторных блоков все сильнее проявляется неустойчивость распределения нейтронного потока в больших реакторах. Ручная корректировка распределения потока в этом случае должна производиться настолько часто, что превышает физические возможности человека – оператора. Поэтому работа таких реакторов без автоматической системы регулирования распределения нейтронного потока нейтронов становится невозможной.

Принципиальная возможность создания таких систем известна с 50-х годов прошлого века, но приступить к их рабочему проектированию стало возможным только тогда, когда были разработаны первые датчики и системы внутриреакторного контроля нейтронного потока. В России эти работы были начаты в 60-х годах в связи с разработкой проекта большого кипящего реактора – РБМК.

Решением проблемы является создание МСАР, состоящей из нескольких одинаковых по динамическим характеристикам каналов регулирования, каждый из которых поддерживает постоянство заданного нейтронного потока в своей области активной зоны. Сигналы управления эти каналы регулирования должны получать от ВРК-датчиков, расположенных вблизи соответствующих стержней. В зависимости от выбранных датчиков имеется возможность создания двух принципиально различных систем:

- системы теплового выравнивания энерговыделения, работающей от термопар и датчиков расхода, поддерживающей постоянной энерговыделение на выходе каналов каждой зоны управления,
- системы нейтронного выравнивания, работающей от внутриреакторных датчиков нейтронного потока и поддерживающей постоянным среднее значение потока в каждой зоне управления.

Очень скоро выяснилось, что выравнивание энерговыделения, хотя и является более правильной формулировкой задачи управления, но не может привести к созданию работоспособной системы автоматического управления распределением энерговыделения. Надежность отвода тепла из активной зоны обеспечивается определенным образом организованным тепловым режимом реактора. Для нормальной работы необходимо, чтобы величины, определяющие надежность теплосъема, так называемые определяющие параметры, не превышали бы своих критических значений. В противном случае произойдет отказ реактора из-за выхода из строя топливных элементов (прогорание, расплав, деформация). К определяющим параметрам относятся: температура ТВЭЛ-ов, температура оболочки ТВЭЛ-ов, тепловой поток, температура теплоносителя,

температура замедлителя, паросодержание на выходе из каналов, скорость прокачки теплоносителя и т. п. Определяющие параметры распределены в активной зоне, и поддержание их в пределах определенных допусков связано с таким большим числом физических ограничений, что будучи созданной, автоматическая система не смогла бы проработать и часа. Известно, что наибольшую ненадежность создают отклонения локальных значений мощности и расхода теплоносителя от предельных значений. Эти отклонения обусловлены нестабильностью нейтронного поля, перемещением стержней и изменением расхода теплоносителя через каналы. Именно эти причины могут вызвать значительные отклонения (до **20 %** и более) локальных значений остальных определяющих параметров. При этом нельзя игнорировать любой локальный эффект. Разрушение хотя бы одного ТВЭЛ-а означает отказ всей установки. Регулирующими органами такой системы должны являться управляющие стержни и вентили расходов, а датчиками – датчики нейтронного потока, датчики температуры и датчики расхода.

К этому надо добавить, что прямое измерение основных определяющих тепловых параметров невозможно или затруднено. Нельзя измерить температуру топлива, оболочки, число датчиков контроля температуры графита очень ограничено, отсутствуют достаточно надежные методы и датчики контроля паросодержания. В то же время ядерная техника располагает надежными и точными датчиками внутриреакторного контроля нейтронного потока.

Бросается в глаза явное несоответствие размерностей поля контроля теплофизических параметров и поля управления этими параметрами. Один управляющий стержень приходится на несколько десятков каналов с топливом. Один нейтронный детектор в зоне действия управляющего стержня лучше отражает теплофизическую обстановку в контролируемой области, чем десятки датчиков температуры и расхода, потому что на температуру в канале влияют ряд локальных эффектов, не подлежащих управлению, например, выгорание топлива, изменение паросодержания и т. д.

Большая размерность системы теплофизического управления, включающей тысячи сигналов от датчиков тепловых параметров и тысячи выходных сигналов регулирующих воздействий от стержней и вентилей регулировки расхода, делает систему неработоспособной из-за множества локальных физических ограничений. Наконец, следует учитывать, что нейтронное поле является первичным, а поле энерговыделения – вторичным.

Поэтому в настоящее время признано, что задача управления энерговыделением может быть решена с помощью управления первич-

ной причиной энерговыделения –распределением плотности нейтронного потока.

Задача автоматического управления распределением нейтронного потока сводится к решению трех взаимосвязанных проблем:

1. Создание информационно-вычислительной системы для обработки показаний датчиков. При этом должна быть решена проблема дискретного внутриреакторного контроля нейтронного поля, размещения определенного количества датчиков в активной зоне, восстановления кривой распределения потока с достаточной точностью, расчет предельно допустимых и наибольших значений сигналов с датчиков и т. д. При решении этой задачи устанавливаются фактически критерии распределения нейтронного потока в активной зоне.

2. Разработка регулирующего органа, обеспечивающего достижение оптимального распределения потока по объему активной зоны. Традиционный поглощающий стержень, вводимый сверху или снизу не обеспечивает оптимального управления потоком в объеме реактора.

3. Разработка алгоритмов многосвязных систем автоматического управления распределением нейтронного потока, совместно с поддержанием постоянным уровня интегральной мощности.

Первая проблема в настоящее время решена. Каждый ядерный реактор имеет систему внутриреакторного контроля распределения нейтронной плотности, показания которой обрабатываются стационарной ЭВМ и постоянно выдают оператору информацию о коэффициентах неравномерности распределения нейтронного потока по высоте и радиусу активной зоны. Разработка управляющего стержня, изменяющего свою эффективность в зависимости от глубины погружения все еще не решена, несмотря на большое количество разработанных патентов. Разработка алгоритмов управления нейтронным полем привела к нескольким проектам, доказавших свою работоспособность в результате испытаний, но внедрен в производство только один, на реакторе РБМК.

Прежде чем рассматривать эти автоматические системы, необходимо дать оценку современным системам автоматического управления мощностью российских реакторов, которые тем или иным образом решают проблему выравнивания распределения нейтронного потока.

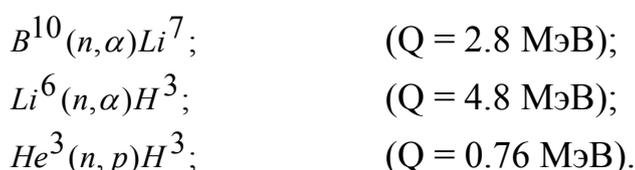
ГЛАВА 1. СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ МОЩНОСТИ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕАКТОРОВ

1.1. Система автоматического регулирования мощности реактора ВВЭР-1000

1.1.1. Аппаратура контроля нейтронного потока

Рассмотрим сначала аппаратуру контроля нейтронного потока (АКНП), используемую на реакторе ВВЭР-1000. Для измерения плотности потока нейтронов применяются различные детекторы, различающиеся принципом действия, исполнением, чувствительностью к нейтронному потоку.

Нейтроны детектируются посредством двухступенчатого процесса, так как взаимодействие между нейтронами и электронами, обусловленное их магнитными моментами, очень мало и не может привести к ионизации атомов при прохождении нейтронов через вещество. Поэтому принципиально возможен только такой режим детектирования, когда энергия нейтрона передается заряженным частицам, которые затем регистрируются ионизационными методами. При регистрации предпочтение отдается более легким ядрам, обладающим меньшим кулоновским барьером для вылета заряженных частиц. Используются реакции:



Для детектирования может быть использован процесс деления **U-235** под действием нейтронов, при котором образуются заряженные осколки деления больших энергий.

Для регистрации нейтронов широкое применение нашли ионизационные камеры. Ионизационные камеры делятся на импульсные и токовые. В камере импульсного типа каждая детектируемая частица производит импульс тока (счетчики). Камерами токовыми называют устройства, регистрирующие средний уровень излучения. При этом ток ионизационной камеры определяется интенсивностью излучения.

Ионизационные камеры и счетчики используются, как правило, для измерения нейтронного потока вне активной зоны (в сухой защите), т. е. измеряют нейтроны утечки из активной зоны.

В общем случае к достоинствам ионизационных камер можно отнести их безинерционность, к недостаткам – выгорание и необходимость высокого напряжения для электропитания камер, что приводит к повышенным требованиям к их изоляции.

Используются ионизационные камеры следующих типов:

КН – с газообразным радиатором;

КНТ – камеры с радиаторами в виде твердого покрытия;

КНК – камеры для измерения нейтронного потока, скомпенсированные к влиянию γ -фона (как с твердым покрытием, так и с газообразным радиатором).

Обычно, как уже отмечалось, в качестве радиатора применяются материалы, содержащие **В-10**, **Не-3**, **U-235**, или так называемую невыгорающую смесь из двух или трех изотопов, в которой выгорание одного из компонентов смеси компенсируется образованием другого в результате реакции (n, γ).

Нейтронный поток в реакторе изменяется в очень широком диапазоне, поэтому создание ионизационных камер для всего диапазона затруднено. В настоящее время разработаны ионизационные камеры, которые применяются в различных диапазонах, так называемых:

- диапазоне источника (**ДИ**);
- промежуточном диапазоне (**ДП**);
- энергетическом диапазоне (**ЭД**).

Для измерения нейтронного потока в различных диапазонах изменения нейтронной мощности реактора, применяются различные ионизационные камеры, различающиеся радиаторами, чувствительностью, исполнением, а также режимами работы (импульсный или токовый).

В последнее время для контроля реактора все шире используются (особенно при пуске реактора) реактиметры – аналоговые устройства, вычисляющие в реальном масштабе времени значение реактивности по изменениям во времени тока ионизационных камер. Значение и знак реактивности однозначно определяют характер операций, которые необходимо выполнить для возвращения реактора в заданное состояние.

Внешнее расположение детекторов нейтронов (в сухой защите реактора) имеет ряд недостатков:

- расположение ионизационных камер не дает однозначной связи между мощностью реактора и показаниями детекторов, что вызвано возможностью затенения детекторов органами регулирования и значительными градиентами в распределении плотности потока нейтронов в реакторе;
- оказывает значительное влияние на достоверность показаний аппаратуры **АКНП** при изменении распределения нейтронного потока по высоте активной зоны;

- использование внезонных детекторов не позволяет осуществлять алгоритмы зонного регулирования;
- применение внешних детекторов исключает возможность физического профилирования с помощью органов регулирования и поддержание в течение всей кампании оптимального распределения энерговыделения по объему активной зоны, которое обеспечивает безопасную эксплуатацию реактора с максимальной экономичностью. Эти функции в настоящее время отводятся системе внутриреакторного контроля **СВРК**.

Работа ионизационных камер основана на собирании ионов, возникающих при прохождении через камеру ионизирующего излучения. При облучении газа ионизирующими излучениями возникают два процесса: ионизации и рекомбинации. Различают три вида ионизации:

- объемную, равномерно распределенную по объему газа;
- поверхностную, распределенную по поверхности;
- колонную, когда вдоль пути ионизирующей частицы образуется колонна близкорасположенных ионов обеих знаков.

При прохождении заряженной частицы через вещество ее электрическое поле взаимодействует с электронной оболочкой атомов. В результате часть электронов отрывается от атомов и на пути частицы образуются положительные ионы.

Процесс ионизации характеризуют следующие основные величины:

- работа ионизации, т. е. энергия, необходимая для образования электрона и положительного иона, которая изменяется в пределах 20–40 электрон-вольт и зависит от вещества среды; влияние на нее природы и энергии частицы велико;
- удельная ионизация, т. е. число пар ионов на 1 см пути, зависит от энергии частицы, ее массы и плотности среды. Эта величина возрастает с увеличением массы и уменьшением энергии частицы;
- длина пробега частицы в веществе, которая возрастает с увеличением энергии частицы и уменьшением ее заряда.

При прохождении через вещество электромагнитное излучение (γ -кванты) поглощается в результате комптоновского рассеяния и образования электрон-позитронных пар. В каждом из этих процессов возникают заряженные частицы (электроны, позитроны), которые способны ионизировать атомы среды.

При столкновении ионы атомов среды противоположных знаков рекомбинируют, т. е. образуются нейтральные молекулы.

Различают два типа рекомбинации: объемную, когда рекомбинация происходит между ионами соседних треков, и колонную, когда рекомбинируют ионы одного и того же трека. В зависимости от вида излуче-

ния и свойств ионизирующей среды определяющим является тот или иной тип рекомбинации.

Вероятность рекомбинации зависит от относительной скорости частиц в момент соударения и определяется свойствами газа. При увеличении относительной скорости ионов коэффициент рекомбинации уменьшается. Естественно, что достаточно много эффектов оказывают влияние на процесс ионизации.

Если облучаемый газ помещается между двумя пластинами, к которым приложена разность потенциалов, то возникает электрический ток. Рассмотрим зоны вольт-амперной характеристики газового разряда (рис. 1.01):

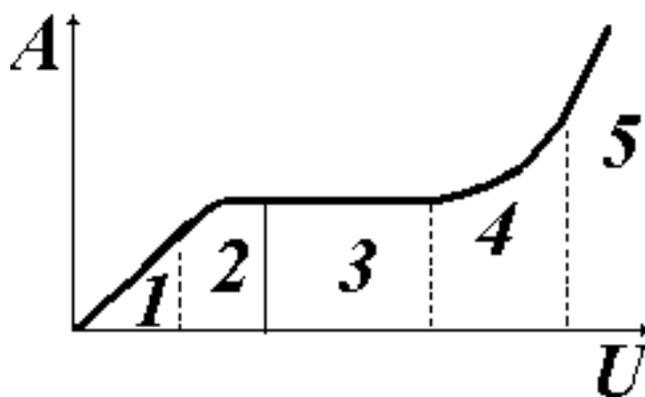


Рис. 1.01. Вольт-амперная характеристика газового разряда

Участок 1. При малых напряжениях наблюдается прямая пропорциональность между током и напряжением. Поскольку скорости ионов невелики, вероятность рекомбинации значительна. Подвижность как положительных, так и отрицательных ионов зависит от природы газа, обратно пропорциональна его давлению и равна примерно $1 \frac{cm^2}{v * c}$. Подвижность электронов на два порядка превышает подвижность ионов, и также обратно пропорциональна давлению.

Участок 2. С увеличением напряжения вероятность рекомбинации ионов уменьшается, вследствие возрастания их относительных скоростей. Это область неполной пропорциональности.

Участок 3. Начиная с некоторого значения напряженности, рекомбинацией можно пренебречь. Таким образом, плотность тока зависит только от числа пар ионов, образующихся в объеме камеры. Измеряя плотность тока можно определить интенсивность ионизирующего излучения. Соответствующий участок характеристики называется областью ионизационной камеры, работающей в токовом режиме.

Участок 4. При повышении напряжения первичные ионы под действием поля приобретают такую энергию, что сами ионизируют молекулы газа, при этом плотность тока, текущего через газ, возрастает. Эта область называется областью ударной ионизации или областью счетчиков.

Участок 5. При дальнейшем увеличении напряжения наступает пробой.

Естественно, на работу камер оказывает большое влияние много факторов, в частности:

- сопротивление изоляции;
- зависимость плотности тока ионизационной камеры от интенсивности излучения;
- влияние давления газа, наполняющего камеру;
- влияние температуры;
- геометрические размеры ионизационной камеры;
- инерционность ионизационной камеры.

Как уже отмечалось ранее, принцип работы нейтронных ионизационных камер основан на ионизирующем действии частиц, возникающих в результате реакций типа (n, α) , (n, p) , (n, f) .

Камеры с использованием реакции (n, α) – борные камеры,
с использованием реакции (n, p) – гелиевые камеры,
с использованием реакции (n, f) – это камеры деления.

В аппаратуре контроля нейтронного потока (АКНП) на реакторах ВВЭР-1000 детектирование нейтронов осуществляется с помощью блоков детектирования:[1]

БДПН 3-15А1 – в энергетическом диапазоне, разработанных на базе ионизационной камеры КНК-3 (для серийного блока В-320);

БДПН 3-16А1 – в промежуточном диапазоне, разработанных на базе ионизационной камеры КНК-4;

БДПН 3-17А1, А2 –разработанных на базе ионизационной камеры КНК-15, работающей в импульсном режиме в диапазоне источника.

Блоки детектирования БДПН-17А1, А2 используются также для системы контроля с резервного щита управления (РЩУ).

Рассмотрим конструктивные особенности блоков детектирования нейтронов.

1. Блок детектирования БДПН3-17А1, А2. Чувствительность КНК-15 к тепловым нейтронам в импульсном режиме составляет $0.5 \frac{\text{имп}}{\text{нейтрон}} \cdot \text{см}^2$. Рабочее напряжение питания 250÷400 В. Схема подключения блока видна из рис. 1.02.

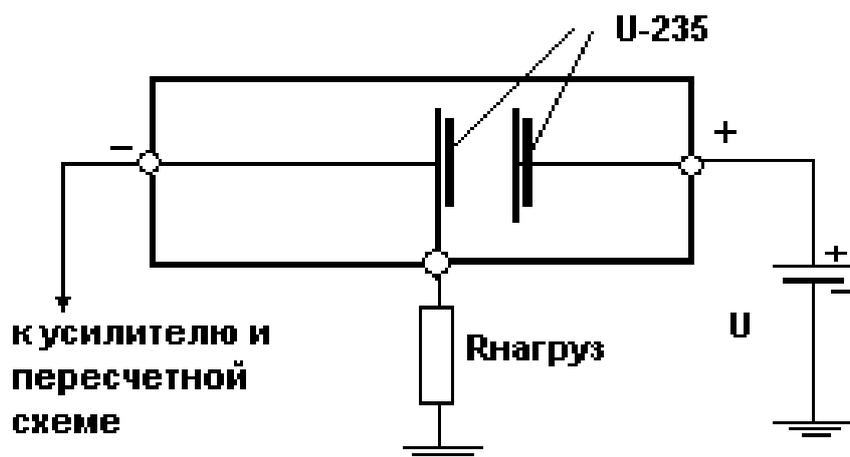


Рис. 1.02. Схема подключения блока БДПНЗ-17А1, А2

КНК-15 представляет собой трехэлектродную систему, состоящую из набора пластин диаметром **44 мм** с зазором **1,6 мм**. Положительный высоковольтный электрод представляет собой **23** пластины, покрытые **U-235 (99,8 % обогатения)**. Собирающий электрод – **44** пластины, покрытые ураном с одной стороны и отрицательный высоковольтный электрод – **22** пластины без покрытия. Камера состоит из двух объемов рабочего и компенсирующего, наполненных смесью газов (аргон, азот, гелий) до давления **2,5 атм**.

При облучении камеры потоком тепловых нейтронов происходит деление ядер урана с образованием осколков, вызывающих ионизацию газа, наполняющего камеру.

Движение высвободившихся электронов в межэлектродном пространстве создает импульсы тока. Количество импульсов пропорционально нейтронному потоку. Камера деления размещается внутри электромагнитного экрана, выполненного из омедненной стали, который, в свою очередь, размещается в герметичном цилиндрическом корпусе блока детектирования из нержавеющей стали.

Экран и герметичный корпус БД электрически изолированы друг от друга. Наружная поверхность корпуса БД покрыта эмалью для исключения электрического контакта между корпусом блока детектирования и измерительным каналом реактора.

Для увеличения помехоустойчивости при передаче сигналов, в БД размещается предусилитель и фильтры питания камеры деления. Для повышения виброустойчивости камеры деления используется специальный компенсационно–амортизирующий узел. Выводы электродов камеры деления «+», «-», «0» проходят через герметичные металлокерамические изоляторы.

БДПН-17А1, А2 связаны с аппаратурой АКНП через блок усилителей БУСИ-51.

2. Блок детектирования БДПНЗ-16А1, разработанный на основе камеры КНК-4, работающей в токовом режиме, используется в промежуточном диапазоне. Схема подключения показана на рис. 1.03.

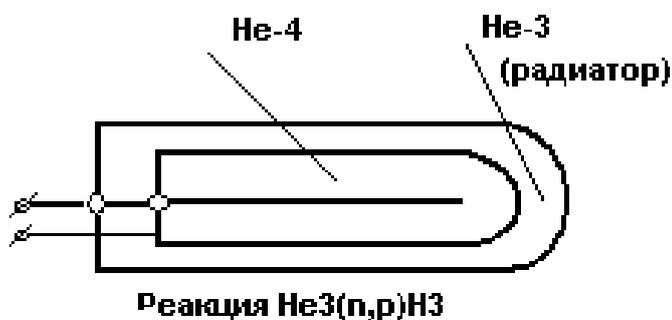


Рис. 1.03. Схема подключения БДПНЗ-16А1

Чувствительность камеры КНК-4 к тепловым нейтронам составляет $1 \cdot 10^{-13} \frac{A}{\text{нейтр} / \text{см}^2 \cdot \text{с}}$. БДПНЗ-16А1 связан с аппаратурой АКНП через

блок преобразователей БПНЗ-05.

3. Блок детектирования БДПНЗ-15А1 применяется в энергетическом диапазоне.

Для реакторных установок В-320 используются сборки из двух ионизационных камер на базе КНК-3 с борным радиатором.

Чувствительность КНК-3 к тепловым нейтронам составляет $3.3 \cdot 10^{-14} \frac{A}{\text{нейтр} / \text{см}^2 \cdot \text{с}}$. Схема включения камеры показана на рис. 1.04.

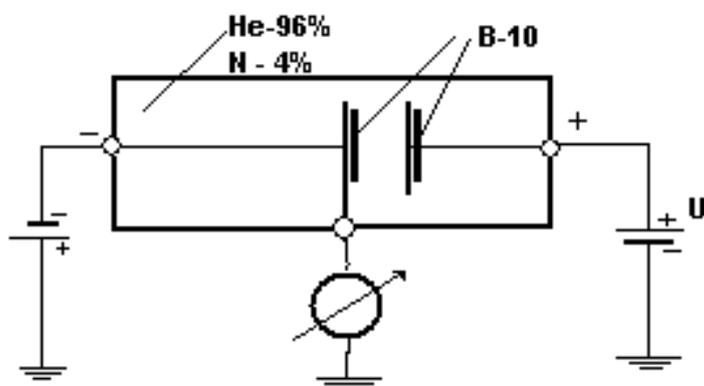


Рис. 1.04. Схема включения БДПНЗ-15А1

Блок разработан на основе двух ионизационных камер КНК-3 с борным радиатором, соединенных между собой тросом. Электрическое соединение камер выполнено таким образом, что в цепи собирающего электрода регистрируется ток, который равен разности токов, вызванных излучением в рабочем (первая камера) и компенсирующем (вторая камера) объеме, чем и достигается компенсация γ – фона на показания камеры.

БДПНЗ-15А1 связан с аппаратурой АКНП через блоки преобразования БПНЗ-06.

Все блоки детектирования с одной из торцевых сторон корпуса имеют хвостовик для соединения при помощи захвата с тросом подвески блока детектирования.

С противоположного конца блока осуществляется вывод линии связи, которая из БДПНЗ-15 не изолирована, а у блоков БДНЗ-16,17 изолирована от трубы канала и заделана герметично в корпусе блока детектирования.

При увеличении мощности реактора во избежание выхода из строя блоков детектирования в предварительном диапазоне и диапазоне источника, эти блоки выводятся из зоны максимального нейтронного потока системой управления механизмами перемещения блоков детектирования (УМПБД). При уменьшении мощности реактора (при появлении сигнала аварийной защиты АЗ) они автоматически снова вводятся в зону максимального нейтронного потока.

Назначение и состав комплекса АКНП-3

Комплекс **АКНП-3** предназначен для контроля нейтронной мощности и периода изменения нейтронной мощности реактора во всех режимах его работы.

Комплекс формирует сигналы превышения заданных значений периода и мощности, выдает сигналы в систему управления и защиты реактора и в устройства регулирования реактора АРМ-5С, РОМ-2, осуществляет обработку, регистрацию и представление информации оператору на блочный щит управления (БЩУ).

Структурная схема комплекса АКНП-3 для реактора В-187 (Нововоронежская АЭС) представлена на рис. 1.05. Комплекс АКНП-3 состоит из 3-х систем, которые функционально автономны в эксплуатации:

- система контроля нейтронного потока для СУЗ;
- система контроля перегрузки топлива (СКП);–система контроля нейтронного потока для резервного щита управления

В состав комплекса АКНП входят:

1. Блок усиления БусИ

9 шт.

- | | |
|--|--------|
| 2. Блоки детектирования БДПНЗ-16А1 (ПД) | 6 шт. |
| 3. Блоки детектирования БДПНЗ-15А1(ЭД) | 12 шт. |
| 4. Блоки детектирования БДПНЗ-17А1(ДИ) | 9 шт. |
| 5. Блок детектирования БДПН-16Р | 6 шт. |
| 6. Устройства накопления и обработки информации 1,3,4,6 УНО-01А1 | 4 шт. |
| 7. Устройство накопления и обработки информации 2,5 УНО-02А1 | 2 шт. |
| 8. Устройство накопления и обработки информации 7,8,9 УНО-03А1 | 3 шт. |
- а также блоки питания, преобразования сигналов, переключатели диапазонов, указатели положения ионизационных камер, блоки индикации.

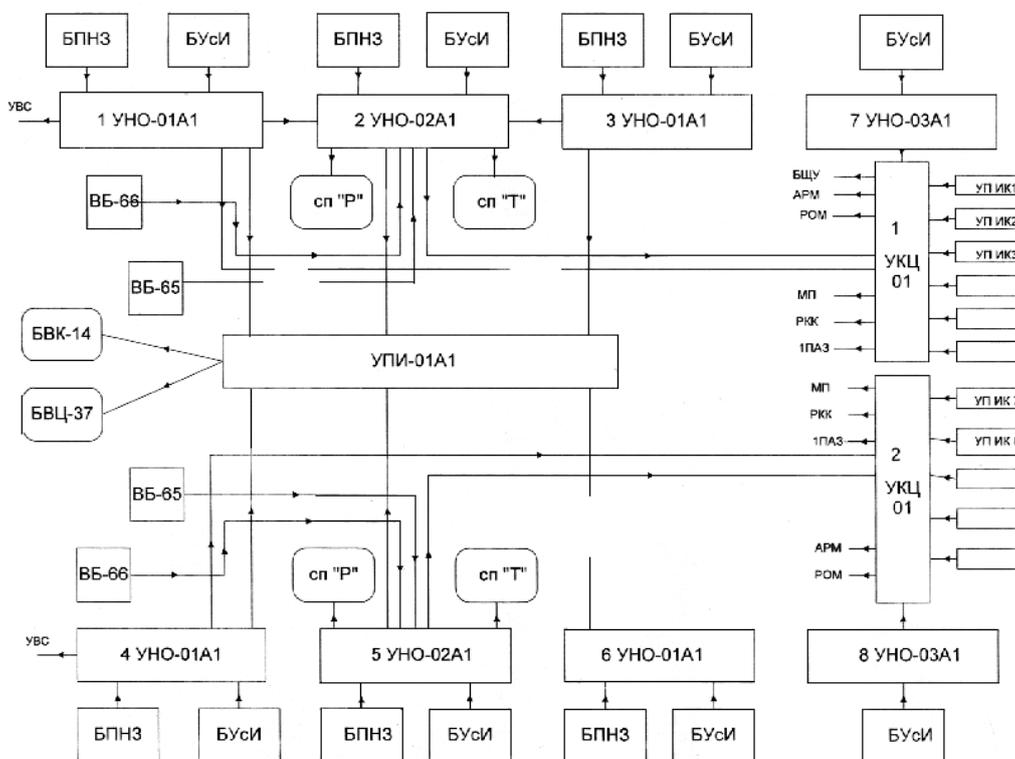


Рис. 1.05. Структурная схема системы АКНП-3

Система АКНП-3 для СУЗ

Система АКНП, используемая для управления и защиты реактора, работает в режиме постоянного контроля нейтронного потока, начиная с глубоко подкритичного состояния реактора и на всех уровнях его мощности. Система содержит две независимые подсистемы с попарным размещением блоков детектирования в соседних каналах **БИК** (блоков ионизационных камер). Каждая из подсистем производит сбор и обра-

ботку информации в каждом из 3-х диапазонов по сигналам от 3-х блоков детектирования, расположенных примерно под углом **120** градусов по поперечному сечению реактора. Весь диапазон измерения плотности нейтронного потока условно разбит на три диапазона: источника (ДИ), промежуточный (ДП), энергетический (ДЭ). Для обеспечения надежности выполнения защитных функций предусмотрено перекрытие диапазонов измерения.

Сигналы с блоков детектирования трех диапазонов: ДИ, ДП, ДЭ усиливаются и формируются соответственно в блоках усиления **БУСИ** и преобразования **БПНЗ-05** и **БПНЗ-06** и по длинной линии связи передаются в устройства накопления и обработки информации (**УНО-01,02**).

В **УНО-01,02** осуществляется функциональное преобразование импульсной информации, формирование дискретных сигналов аварийной защиты и предупредительной сигнализации, переключения диапазонов, аналоговых сигналов для АРМ-5С и РОМ-2, записи на самопишущие потенциометры, передачи на УВС и на пульт оператора БЦУ.

Тракты формирования сигналов защиты и управления имеют полную автономию.

Преобразование и отображение сигналов, пропорциональных плотности потока нейтронов и скорости его изменения, осуществляется соответственно в устройстве преобразования информации **УПИ-01А1**, и на оперативном (**БВК-14**) и цифровом (**БВЦ-37**) дисплеях.

Оперативный дисплей обеспечивает аналоговое представление информации одновременно по всем измерительным каналам с указанием значение пороговых уставок, а также выборочное цифровое представление информации по любому из каналов или усредненного по 3-м каналам.

Цифровой дисплей предназначен для выборочного цифрового измерения информации по любому из каналов энергетического диапазона или усредненного значения по 3-м каналам ДЭ.

Размножение и усиление дискретных сигналов АЗ, предупредительной сигнализации и переключения диапазонов, а также аналоговых сигналов для

АРМ-5С и РОМ-2 осуществляется в устройстве коммутации цепей (**УКЦ-01**).

В состав **УКЦ-01** входят также устройства управления перемещением блоков детектирования в ДИ и ДП, которые работают совместно с механизмами перемещения МП. Органы управления перемещением и указатели положения БД расположены на БЦУ.

Управление подсистемой комплекса АКНП-3 для СУЗ осуществляется на БЦУ блоками **ВБ-65** и **ВБ-66**. С блока переключателей диапа-

зонов измерения и каналов (**ВБ-65**) осуществляется выбор канала на измерение, вызов цифровой информации на **БВК-14** и **БВЦ-37** одного из каналов или усредненного значения от трех каналов любого диапазона.

С блоков задания уставок **ВБ-66** осуществляется задание уставки уровня защиты по нейтронному потоку, централизованного сразу на три канала одной подсистемы ДИ и ДП. В энергетическом диапазоне задание уставки уровня защиты (**АЗ-1**) по нейтронному потоку осуществляется поканально. Допускается автономное задание уровня защиты в каждом **УНО**.

Уставка уровня защиты по периоду осуществляется отдельно по каждому каналу только в **УНО**.

Для контроля низких уровней нейтронного потока (до $60 \frac{\text{нейтр}}{\text{см}^2 * \text{с}}$) в системе предусмотрен звуковой индикатор разгона **БКнК-07**, фиксирующий приход каждого импульса с блока усиления. Информация об уровне нейтронного потока и периоде по любому каналу каждого диапазона фиксируется самопишущим потенциометром **КСП2-003**. Причем, сигнал по мощности записывается усредненным по трем каналам, и по периоду минимальный из любого канала. Дополнительно на РЩУ имеются два следящих прибора **БИА-01Р**, показывающих среднее значение мощности.

Таким образом, обобщенная структурная схема системы АКНП для одного из диапазонов измерения, например, энергетического (**ЭД**) представляет собой объединение соответствующих блоков детектирования **БДПН 3-15А1**(3 шт), усилителей **БУСИ**, преобразователей **БПНЗ-06**, и устройств накопления и обработки информации **УНО-1,2**. Последние содержат в своем составе логарифмические усилители, необходимые для компенсации зависимости коэффициента передачи реактора от уровня мощности, и преобразователи для получения унифицированных аналоговых сигналов для регуляторов нейтронного потока **АРМ-5М**.

Система контроля нейтронного потока резервного щита (РЩУ)

Система контроля нейтронного потока для РЩУ включена постоянно и используется при потере контроля за уровнем нейтронного потока на БЩУ.

Эта система осуществляет контроль нейтронного потока только в подкритическом состоянии реактора. В аварийных системах **АЗ**, **ПЗ-1**, **ПЗ-2** сигналы аппаратуры РЩУ не используются. Система содержит одну группу устройств, состоящую из трех измерительных каналов диапазона источника (ДИ). Блоки детектирования размещены в каналах ИК сухой защиты шахтного объема реактора

Измерительные каналы в устройствах накопления и обработки информации (**9УНО-03А1**) формируют сигналы превышения заданных уставок по уровню нейтронного потока и периоду. Индикация исправности каналов и превышения заданных уставок отображаются на двух сигнальных переносных табло (**УВИЗ-06**). Предусмотрена фиксация самопишущими потенциометрами уровня нейтронного потока, периода и контроля низких уровней нейтронного потока звуковым индикатором разгона **БКнК-07**.

В процессе эксплуатации комплекса АКНП не реже 1 раза в месяц, а также каждый раз после ППР на уровнях мощности 30 %, 50 %, 75 %, 100 % от номинального значения проводится тарировка каналов в ДЭ по отдельной методике. Расхождения в показаниях каждого канала ДЭ между собой и средневзвешенного значения тепловой мощности не должны превышать 2 %.

Диапазон контроля нейтронной мощности:

Диапазон источника (ДИ) – $10^{-7} \div 10^{-1} [\%] N_{ном}$.

Диапазон предварительный (ДП) – $10^{-3} \div 10^{+2} [\%] N_{ном}$.

Диапазон энергетический (ДЭ) – $0.1 \div 120 [\%] N_{ном}$.

Диапазон измерения плотности потока тепловых нейтронов в местах расположения блоков детектирования в $[\frac{нейтр}{см^2 * с}]$:

ДИ – $0.3 \div 3 * 10^5$

ДП – $3 * 10^3 \div 3 * 10^8$

ДЭ – $3 * 10^5 \div 3.6 * 10^8$.

Система внутрореакторного контроля реактора ВВЭР-1000

Система внутрореакторного контроля (ВРК) предназначена для выдачи эксплуатационному персоналу и в систему управления значений тепловой мощности реактора, распределения энерговыделения по объему активной зоны, минимального запаса до кризиса теплообмена, определения запаса реактивности, степени отравления реактора ксеноном, а также порядка действий для подавления ксеноновых колебаний.

Кроме этого, наблюдения за состоянием активной зоны с помощью системы ВРК позволяют оператору контролировать качество работы всех элементов измерительной системы, а также уточнить расчеты параметров активной зоны и различных констант.

В состав системы входят датчики нейтронного потока типа ДПЗ с родиевым детектором, размещаемые в активной зоне реактора, датчи-

ки температурного контроля на выходе из ТВС, датчики положения управляющих стержней, датчики концентрации борной кислоты, датчики давления в различных участках первого и второго контуров, а также аппаратура сбора и обработки всей этой информации.

Внутриреакторные датчики нейтронного потока устанавливаются в виде измерительных зондов в центральные трубки ТВС. В каждом зонде находится по семь датчиков, расположенных равномерно по высоте канала. Количество зондов на серийных блоках с реакторами В-320 составляет 64, размещенных равномерно по сечению активной зоны.

В качестве датчиков нейтронного потока используются β -эмиссионные датчики прямой зарядки (ДПЗ), имеющие различные эмиттеры и позволяющие наблюдать за распределением энерговыделения в наиболее напряженных ТВС с точностью $3\div 4\%$.

Датчики прямой зарядки представляют собой генераторы тока и состоят из эмиттера и коллектора. Эмиттер представляет собой проволоку диаметром 0.5 мм и длиной до 200 мм. Изолятор изготавливается из кварцевой трубки, а коллектор – из нержавеющей трубки диаметром 1,3 мм. В качестве эмиттера используется материал (в частности – родий), который при облучении нейтронами дает радиоактивный изотоп, распадающийся с образованием заряженных β -частиц. Уходя с эмиттера, β -частицы заряжают его положительно, создавая разность потенциалов между эмиттером и собирающим β -частицы заземленным коллектором. Протекающий электрический ток будет пропорционален плотности потока нейтронов в месте установки детектора.

Детекторы расположены на защитном экране вдоль его оси так, что эмиттеры и линии связи находятся по разные стороны экрана, толщина которого такова, что исключается влияние электронов, возникающих в эмиттере, на линии связи соседних детекторов. Вся сборка помещается в герметичный чехол, который обеспечивает защиту детекторов от воздействия теплоносителя. Сигналы детекторов передаются к измерительному комплексу с помощью кабелей.

По сравнению с другими типами ВРК-датчиков ДПЗ обладают следующими преимуществами:

- Малые габариты позволяют разместить в реакторе большое количество датчиков, для получения детальной картины распределения энерговыделения;
- ДПЗ не требуют источника питания, имеют высокую надежность, срок службы не менее компании реактора;
- ДПЗ технологичны при изготовлении, имеют хорошую воспроизводимость параметров и невысокую стоимость.

Наряду с этим ДПЗ имеют и серьезные недостатки:

- небольшой выходной сигнал (единицы микроампер);
- большую постоянную времени (около **1 сек**);
- зависимость параметров от температуры теплоносителя, выгорания, обогащения соседних ТВС, концентрации борной кислоты в теплоносителе и т. д.

Температуру теплоносителя (массовый замер) измеряют на выходе из ТВС в верхнем объеме реактора, а также в горячих и холодных точках циркуляционных петель. Так как подогрев теплоносителя в активной зоне ВВЭР составляет **30–40 °С** при средней температуре **300 °С**, то требуемая погрешность не должна превышать **0.3°С**. На выходе из ТВС в специальные чехлы устанавливают хромель-алюмелевые термопары с неизолированным спаем, диаметр которых, включая и оболочку из нержавеющей стали, не превышает 3 мм, что обеспечивает простоту и надежность конструкции датчика и минимальное влияние радиационного нагрева. В холодных и горячих точках циркуляционных петель устанавливают специальные датчики повышенной точности – платиновые термометры сопротивления, позволяющие увеличить точность измерения температуры теплоносителя и определить поправки к термопарным измерениям.

Контроль за работой ТВС в реакторе в условиях эксплуатации осуществляется с помощью системы ВРК, работа которой основана на измерении температуры теплоносителя на входе в реактор и выходе из ТВС, а также на измерении распределения потока нейтронов по объему активной зоны. Как правило, результаты измерения этих подсистем выражаются в виде коэффициентов неравномерности энерговыделения по ТВС (**Kq**) и коэффициентов неравномерности энерговыделения по высоте активной зоны (**Kz**). Совокупность этих двух подсистем позволяет контролировать распределение тепловой и нейтронной мощности по всему объему активной зоны. Сравнение результатов измерения коэффициентов неравномерности с заранее установленными пределами безопасной эксплуатации ТВС по этим параметрам характеризует степень безопасной и надежной эксплуатации ТВС и является основной задачей контроля ТВС в реакторе.

Первая подсистема измеряет температуру теплоносителя на выходе из 210 рабочих ТВС; она получила название «массовый замер» (МЗ). Датчики МЗ – термопары, установленные в блоке замера температуры. Датчики расположены с учетом симметрии загрузки активной зоны и обеспечивают контроль за остальными 102 рабочими ТВС.

Измеряемые температуры теплоносителя на выходе из рабочих ТВС совместно с измерением температуры теплоносителя в петлях позволяют

по упрощенным моделям определить коэффициенты неравномерности, которые используются в формулах для определения мощности ЯР:

$$K_{qi} = \frac{1 + [(t_{i\text{вых}} - T_{\text{вых}})]}{\Delta_{tp-ra} * K_{np}},$$

где $T_{\text{вых}}$ – средняя температура на выходе из активной зоны; Δ_{tp-ra} – разность температур на выходе из реактора и на входе в реактор; $K_{np} = 0,93$ – коэффициент протечек.

В условиях эксплуатации допустимый коэффициент неравномерности, контролируемый по температуре на выходе из ТВС, определяет мощность активной зоны в целом. При этом ограничивать мощность активной зоны может температура теплоносителя на выходе как из центральных ТВС, так и из периферийных.

Неравномерность энерговыделения по высоте активной зоны оценивается другой подсистемой внутриреакторного контроля, основанной на показаниях β -эмиссионных нейтронных детекторов (датчиков прямого заряда), которые расположены в сухих каналах по оси ТВС в их центральных трубках. В реакторах ВВЭР-440 число сухих каналов составляет от 12 (реакторный блок В-230) до 36 (реакторный блок В-213); эти каналы монтируются после перегрузки топлива при сборке реактора. В каждом из каналов по высоте активной зоны установлено 7 датчиков прямого заряда. Эти датчики измеряют в местах установки плотность потока нейтронов, которая затем пересчитывается в энерговыделение.

Коэффициент неравномерности распределения плотности потока тепловых нейтронов по высоте активной зоны определяется выражением:

$$K_Z = \frac{I_{\text{max}}}{\bar{I}},$$

где \bar{I} и I_{max} – средний и максимальный токи детекторов прямой зарядки в измерительном канале.

Для блока В-230:
$$\bar{I} = [(I_2 + I_3 + \dots + I_6) + \frac{(I_1 + I_2)}{2}].$$

Для блока В-213:
$$\bar{I} = \frac{(I_0 + I_1 + \dots + I_8)}{9},$$

где $I_0 = I_1 / 2.405$; $I_8 = I_7 / 2.405$ – экстраполированные значения токов ДПЗ на границах активной зоны.

Использование при эксплуатации реакторов температурных полей МЗ и показаний датчиков прямой зарядки позволяет контролировать

допустимую тепловую мощность ТВС и симметричность тепловыделения в активной зоне. Разброс результатов индивидуальных измерений температуры по симметричным ТВС может быть обусловлен двумя основными факторами: изменением состояния активной зоны (ошибочная загрузка ТВС, падение или «застревание» стержней СУЗ); или нарушением в работе отдельных каналов измерения температуры системы внутриреакторного контроля.

Согласно «Технологическому регламенту...» при работе реактора на мощности должны быть работоспособны не менее 75 % датчиков температуры на выходе из кассет активной зоны от их общего числа (210) с обязательным охватом работоспособными датчиками температуры всех групп симметрии активной зоны и не менее 2/3 измерительных каналов нейтронных датчиков прямого заряда от их общего числа (36). Если это условие не выполняется, то мощность реактора должна быть снижена до 50 % от допустимой.

1.1.2. Автоматическое регулирование мощности реакторной установки В-320

В общем случае, дополнительно к компактности и относительной простоте реакторной установки, АЭС с реакторами типа ВВЭР обладают очень важной чертой – простотой управления и хорошей маневренностью. Известно, что любая реакторная установка обладает свойством **саморегулирования**, имея в виду обратно пропорциональную зависимость между реактивностью и температурой активной зоны. Но в ходе изучения этого вопроса было обращено внимание на то, что полное саморегулирование мощности энергетической реакторной установки при изменении нагрузки турбогенераторов может иметь место лишь для реакторов с низкотемпературными или высокообогащенными тепловыделяющими элементами, обладающими достаточно малым **мощностным эффектом реактивности**.

При наличии достаточно большого (больше $1E-4$) отрицательного температурного коэффициента реактивности, можно было бы обойтись без внешней системы поддержания мощности при меняющихся значениях нагрузки (внешний регулятор в этом случае необходим только для компенсации эффекта отравления и других эффектов реактивности). Но из-за мощностного эффекта реактивности процесс управления при смене нагрузки оказывается более сложным и требует вмешательства регулятора нейтронной мощности.

Для лучшего понимания процесса саморегулирования рассмотрим реальную ситуацию, связанную с уменьшением мощности турбогенератора. Этот процесс сопровождается уменьшением отбора пара из парогенераторов, в результате чего давление пара в парогенераторах начина-

ет расти из-за избыточного (в начале процесса) подвода тепла со стороны первого контура.

Рост давления (и соответственно температуры насыщения) в парогенераторе уменьшает температурный напор в нем, и следовательно, уменьшает отвод тепла из первого контура, что при неизменной мощности реактора приводит к увеличению температуры теплоносителя 1-го контура и появлению отрицательной реактивности.

Если мощностной эффект реактивности не учитывать, то мощность реактора должна уменьшаться, и конечное равновесное состояние будет достигнуто при первоначальном значении средней температуры в первом контуре, и новой мощности реактора, соответствующей отбору тепла из парогенератора.

Давление в парогенераторе будет при этом возрастать по мере повышения температуры насыщения, обеспечивающего уменьшение температурного напора в парогенераторе соответственно новому значению мощности. Весь процесс имеет характер затухающих колебаний.

При увеличении нагрузки процесс идет соответствующим образом с противоположным изменением параметров.

Постоянная времени процесса определяется соотношением полной теплоемкости системы (первый контур и парогенераторы) и тепловой мощности, т. е. характерным временем разогрева или охлаждения всей системы. Скорость затухания колебательного процесса характеризуется значением температурного коэффициента реактивности.

Здесь необходимо отметить, что из-за наличия в трубопроводе первого контура транспортного запаздывания (сдвига во времени) между моментом изменения температуры теплоносителя на выходе парогенератора и на входе реактора возможно появление неустойчивости (незатухающих колебаний мощности) в случае большой абсолютной величины отрицательного температурного коэффициента реактивности.

Для реакторов ВВЭР топливная загрузка выполнена из двуокиси урана и обладает значительным отрицательным мощностным эффектом реактивности, связанным с высокой рабочей температурой двуокиси урана и большим ее изменением при изменениях мощности. Высокая скорость изменения температуры топлива обусловлена крайне низким значением теплопроводности спеченной двуокиси урана. Это свойство является чрезвычайно важным для безопасности ВВЭР, так как обеспечивает надежное ограничение мощности при любых возможных аварийных ситуациях. В то же время значительный мощностной эффект ограничивает возможности саморегулирования реакторной установки.

Рассмотрим снова процесс уменьшения нагрузки турбогенератора для реакторов типа ВВЭР с учетом этого мощностного коэффициента

реактивности. Здесь уже конечное равновесное состояние устанавливается не при первоначальном значении температуры теплоносителя, а при том, которое обеспечивает в новых условиях приведение реактивности к нулю.

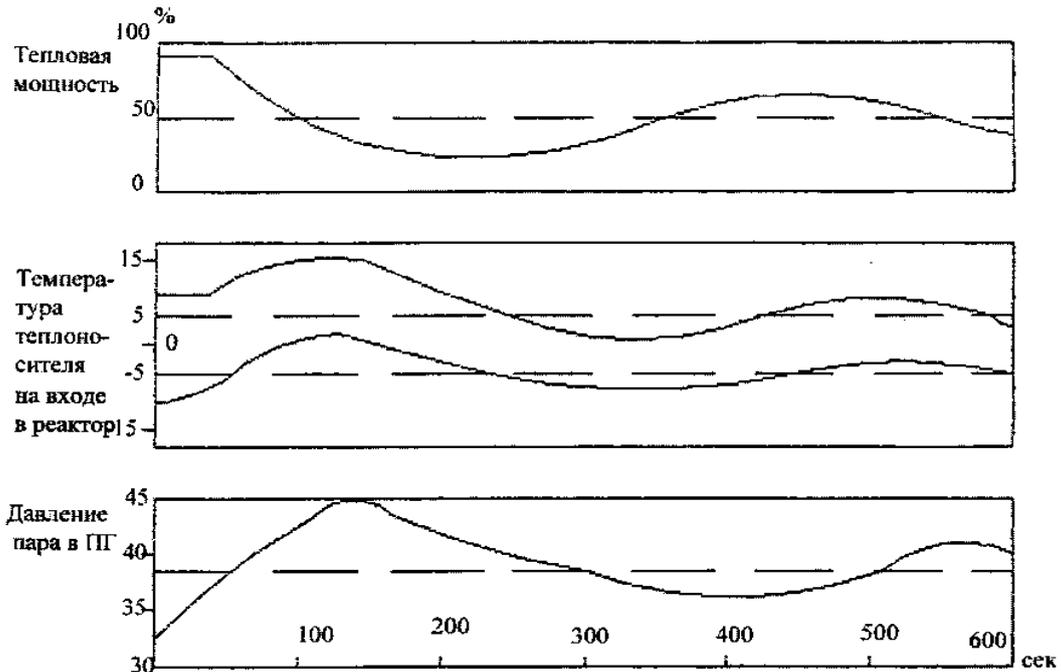
Увеличение температуры воды в первом контуре, происходящее вслед за увеличением давления пара, вызывает (при отрицательном температурном коэффициенте реактивности) уменьшение мощности, в результате чего уменьшается температура топлива и высвобождается положительная реактивность, компенсирующая отрицательную реактивность, связанную с увеличением температуры воды. Стабилизация процесса происходит при значении мощности, соответствующем новому значению нагрузки, а температура первого контура возрастает до уровня, обеспечивающего полную взаимную компенсацию температурного и мощностного эффектов реактивности.

Вслед за повышением температуры теплоносителя первого контура, происходит дополнительное возрастание давления пара (обеспечивающее необходимое для новой мощности значение температурного напора).

Повышение температуры воды в первом контуре определяется соотношением абсолютных значений температурного и мощностного коэффициентов реактивности. Процесс идет апериодически, поскольку постоянная времени реакторной установки (по изменению температуры теплоносителя – примерно 50 с) много больше постоянной времени тепловыделяющих элементов (по изменению температуры двуокси урана – примерно 5 с).

Таким образом, в процессе саморегулирования, значительные отклонения давления пара в парогенераторах, а также отклонения температуры 1-го контура от номинальных значений, приводящие к отклонениям давления в первом контуре, могут вывести параметры реакторной установки за безопасные пределы, и поэтому регулятор нейтронной мощности реакторной установки в любом случае становится необходим. Процессы саморегулирования для ВЭР-1000 изображены на рис. 1.06.

В связи с этим естественно возникает вопрос об оптимальной программе управления. Как можно видеть на примере саморегулирования, изменение мощности и нагрузки связано с изменением всех параметров реакторной установки. Задача состоит в том, чтобы, поддерживая значения всех параметров (давлений и температур) в безопасных пределах, сохранить при изменениях режимов такое соответствие между ними, которое предъявляет наименьшие требования к системе регулирования, в наименьшей степени нагружает оборудование и достаточно удобно для контроля или ручного управления реакторной установкой в эксплуатации.



Процесс саморегулирования при уменьшении паровой нагрузки со 100% до 50% (без учета мощностного коэффициента реактивности и при $K_{тс}=1 \cdot 10^{-4}$)

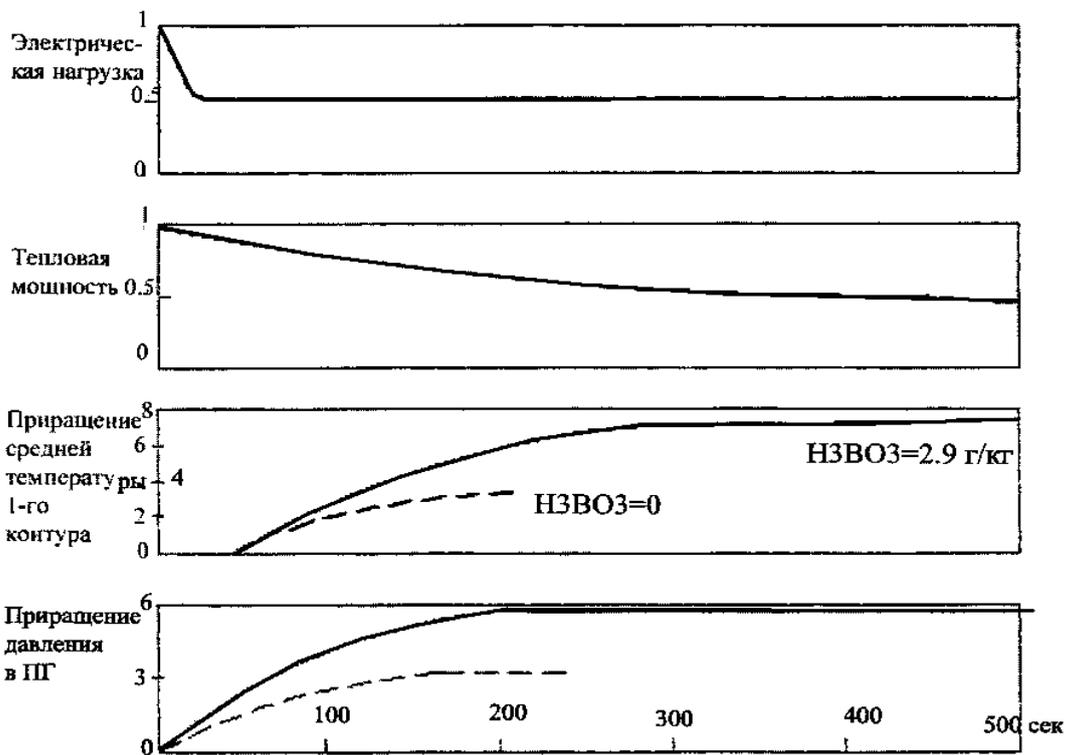


Рис. 1.06. Изменение параметров реактора ВВЭР-1000 в процессе саморегулирования при резком сбросе нагрузки со 120 до 60 Мвт

Принципиально возможны несколько программ управления. Рассмотрим некоторые из них.

Программа управления по постоянной средней температуре 1-го контура (Tsp-const). Эта программа управления обладает следующими достоинствами:

- в максимальной степени используется саморегулирование реакторной установки, т. е. свойство поддерживать неизменной среднюю температуру теплоносителя при неизменной нагрузке, тем самым уменьшается необходимость использования регулятора нейтронной мощности и снижаются требования к его эффективности;
- обеспечиваются наиболее стабильные температурные условия эксплуатации оборудования первого контура, что, безусловно, повышает его надежность;
- облегчается выполнение требований к системе компенсации объема и поддержанию рабочего давления в первом контуре.

С другой стороны, при уменьшении нагрузки возрастает давление пара в парогенераторе, что заставляет изготавливать парогенераторы на давление, существенно превышающее номинальное и равное давлению насыщения при средней температуре первого контура.

Вторым проявлением этого недостатка является увеличение перепада давления на дроссельных клапанах турбины при малых нагрузках.

Изучение реакторной установки как объекта регулирования, ее способности к саморегулированию, показало прежде всего полезность для оптимального протекания процесса значительной по величине зоны нечувствительности регулятора.

В пределах зоны нечувствительности изменение параметров реакторной установки происходит за счет процессов саморегулирования, тем самым малые возмущения стабилизируются без участия автоматического регулятора, что облегчает работу регулятора и стабилизирует режим работы реакторной установки. В этих условиях, когда вмешательство регулятора связывается лишь со значительными возмущениями, становятся ненужными малые скорости воздействия на процесс, принцип пропорционального регулирования вырождается. В результате, в качестве оптимального для ВВЭР можно считать релейный принцип регулирования с постоянной скоростью движения органа регулирования и с достаточной большой зоной нечувствительности (до 2 %).

В настоящее время парогенераторы значительной паропроизводительности рассчитываются на определенные изменения рабочего давления. Естественно, в этом случае возникают трудности при увеличении давления, возникающего при регулировании реактора по программе «**Tsp – const.**».

Удовлетворяет требованиям прочности парогенератора только программа регулирования, обеспечивающая большие отклонения давления

пара выше номинального, т. е. программа «**P – const**». Использование в качестве регулируемого параметра непосредственно давления пара в парогенераторе улучшает быстродействие системы регулирования.

Основным недостатком такой программы управления является переменность температуры 1-го контура при изменениях нагрузки.

Одновременно повышаются требования к эффективности и быстродействию регулятора мощности реактора, так как при уменьшении мощности приходится компенсировать не только реактивность, высвобождающуюся из-за отрицательного мощностного эффекта, но и реактивность от уменьшения температуры теплоносителя (при отрицательном температурном эффекте).

Естественно, что непостоянство температуры теплоносителя 1-го контура не позволяет считать и эту программу управления оптимальной.

Лучше было бы работать по *компромиссной программе*, поддерживая постоянное давление пара во 2-м контуре при малых нагрузках и поддерживая постоянной среднюю температуру 1-го контура при больших нагрузках, но это зависит от возможности парогенератора работать при давлениях выше номинального. Положение точки изменения программы регулирования зависит от возможного увеличения давления пара в парогенераторах и от ожидаемого диапазона частых уменьшений нагрузки.

Естественно, что предполагаемое в этой компромиссной программе некоторое увеличение температуры теплоносителя 1-го контура в области малых нагрузок ухудшает тепловой режим активной зоны в этой области и снижает допустимые уровни мощности.

При рассмотрении процесса регулирования мощности реакторной установки необходимо учитывать и скорость ее изменения. Очень быстрое снижение мощности реактора в режиме автоматического управления сопряжено с трудностями выполнения требований ядерной безопасности.

Большая скоростная эффективность органов автоматического управления чревата возможностью быстрого неконтролируемого введения положительной реактивности и поэтому не допускается. Это делает необходимым введение в схему регулирования устройств быстрого сброса избыточного пара из парогенератора в конденсаторы турбин (**БРУ-К**) при большом сбросе нагрузки. На тот случай, если нет возможности направить пар в конденсаторы турбин, предусмотрены редуцирующие устройства сброса пара в атмосферу (**БРУ-А**). Таким образом, редуцирующие устройства для сброса избыточного пара стали одним из важных средств автоматического регулирования блока.

Для регулирования мощности ВВЭР, работающих в режиме базовой нагрузки, используют *программу регулирования с поддержанием постоянного давления пара в парогенераторах «P-const»*.

При регулировании реактора допускается изменение нагрузки блока со скоростью около $3 \div 5$ % в минуту.

В принципе АЭС может работать в режиме переменных нагрузок, используя для таких режимов систему борного регулирования. Происходит это следующим образом. При плановом, например, сбросе мощности регулятор АРМ отключается, задается сигнал изменения уставки, и стержни управляющей группы идут вниз. Одновременно в активную зону вводится необходимое количество борной воды, чтобы обеспечить снижение мощности с заданной скоростью без перемещения стержней. Когда мощность достигает необходимого уровня, включается регулятор АРМ, и после некоторого колебательного процесса устанавливается этот уровень.

Структурная схема системы управления мощностью реактора ВВЭР-1000 изображена на рис. 1.07. В систему регулирования мощности энергоблока входят:

- регулятор АРМ-5М;
- электрогидравлическая система регулирования турбины ЭГСР;
- быстродействующие редуцирующие устройства сброса пара в конденсаторы турбин БРУ-К и в атмосферу БРУ-А;
- устройство РОМ-2, для ограничения тепловой мощности в зависимости от количества включенных насосов (ГЦН).

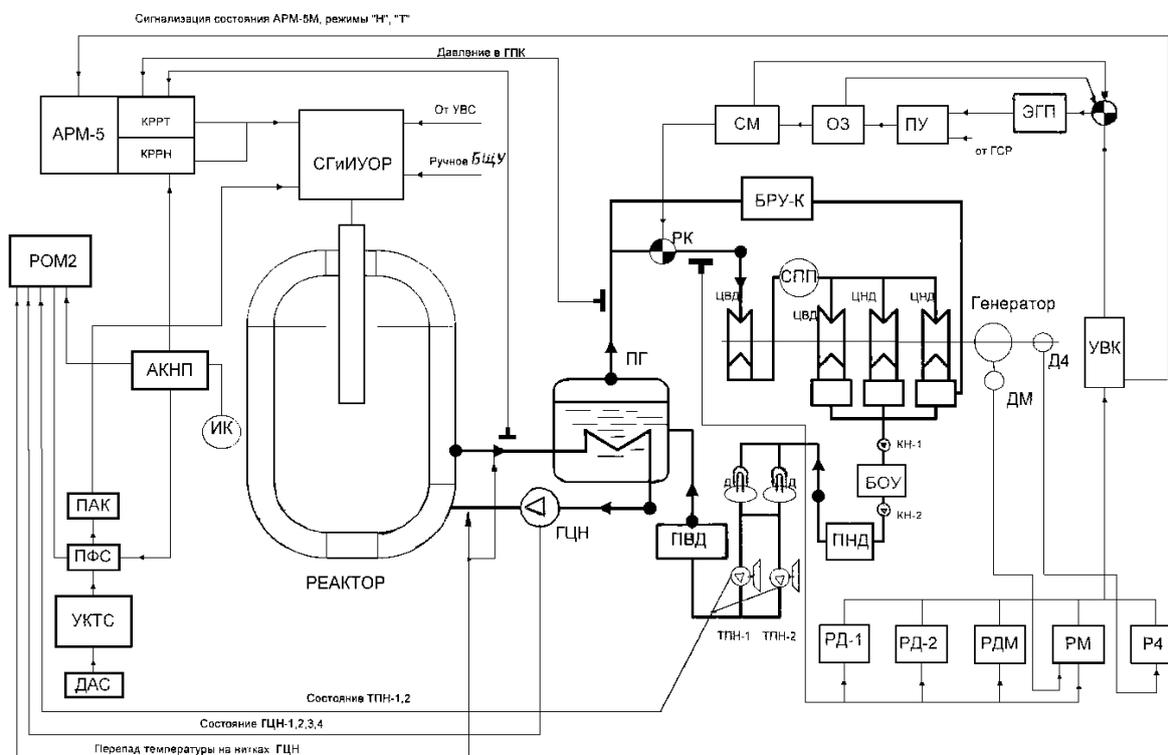


Рис. 1.07. Структурная схема системы управления мощностью реактора ВВЭР-1000

Таким образом, система автоматического регулирования мощности реактора ВВЭР-1000 состоит из двух контуров регулирования, включаемых поочередно при смене режимов работы установки.

Автоматический регулятор мощности АРМ-5С

Регулирующее устройство АРМ-5С является составной частью системы регулирования мощности энергоблока В-1000 с реакторной установкой В-320 и предназначено для поддержания мощности реактора в соответствии с мощностью турбогенератора или стабилизации мощности реактора на заданном уровне.

Для выполнения указанных функций в комплект регулятора АРМ-5С входят два регулятора:

- канал регулятора реактора по теплотехническому параметру (**КРРТ**);
- канал регулятора реактора по нейтронной мощности (**КРРН**).

Каждый регулятор состоит из трех автономных каналов, т. е. регулятор трижды резервируется для повышения надежности.

Выходной сигнал каждого регулятора формируется по принципу «два из трех», то есть достаточно сработать двум каналам любого из регуляторов, чтобы прошел сигнал от АРМ в схему управления органами регулирования реактора.

Регулятор реактора по нейтронной мощности (**КРРН**) предназначен для стабилизации нейтронного потока реактора на заданном уровне и обеспечивает режим «Н» – астатическое поддержание нейтронной мощности реактора.

Регулятор реактора по теплотехническому параметру (**КРРТ**) предназначен для стабилизации теплотехнического параметра (давление во втором контуре) на заданном уровне и обеспечивает режим «Т» – астатическое поддержание теплотехнического параметра по второму контуру (**P-const**) с воздействием на стержни управления реактора. В регуляторе АРМ-5С предусмотрены автоматические переходы из режима «Н» в режим «Т» по сигналу превышения давления в парогенераторе от заданного уровня на **1,5 кГс/см**.

В режим «Н» устройство АРМ-5С переходит также при поступлении в него сигнала аварийной защиты **ПЗ-1**. Включение АРМ-5С на автоматическое управление в режим «Н» в данном случае осуществляется сразу после снятия сигнала **ПЗ-1**.

При уменьшении периода разгона реактора до **40 с**, а также при появлении сигнала аварийной защиты **ПЗ-2** регулятор АРМ-5С формирует сигнал запрета на увеличение мощности реактора. После снятия **ПЗ-2** АРМ-5С остается в выбранном режиме. Появление запрета на увеличе-

ние мощности реактора сигнализируется лампой «Запрет Б» на пульте управления и сигнализации (ПУС), а также лампами «Запрет Б» в блоках УК8 каждого канала.

При достижении давления в 1-м контуре 155 кГс/см формируется запрет на уменьшение мощности реактора. Появление запрета сигнализируется лампой «Запрет М» на ПУС, а также сигналами «Запрет М» в блоках УК8.

Регулирующее устройство АРМ-5С включает в себя две механически связанные панели с габаритами 600×1800×750, установленные в помещении СУЗ, и пульт управления и сигнализации, (ПУС), установленный на БЩУ.

Регулирующее устройство АРМ-5С выдает сигналы в систему ЭГСР о режимах работы и об автоматическом переходе из режима «Н» в режим «Т». Сигналы формируются в блоках БС каждого канала.

Согласно техническим условиям устройство АРМ-5С должно поддерживать нейтронную мощность в диапазоне 3–110 % $N_{ном}$, а давление во 2-м контуре в диапазоне 57÷67 кГс/см.

Точность поддержания заданного значения нейтронной мощности составляет $\pm 0,5$ % от $N_{ном}$.

Точность поддержания заданного значения давления во 2-м контуре составляет $\pm 0,25$ кГс/см.

В режиме «Т» заданное значение давления во 2-м контуре должно составлять $60,5 \pm 0,5$ кГс/см.

Технические характеристики АРМ-5С и его состав:

- напряжение питания однофазное 220 в, 50 Гц, от одной системы надежного питания по трем вводам;
- потребляемая мощность 700 ВА

входные сигналы:

- от комплекта АКНП (по текущему значению нейтронной мощности) 0÷5 В
- от датчиков давления (преобразованный сигнал) 0÷5 мА
- зона нечувствительности регулятора КРРН +2 % от $N_{ном}$
- зона нечувствительности регулятора КРРТ $\pm 0,5$ кГс/см
- количество каналов 3
- режим работы длительный.

Канал регулятора реактора по нейтронному потоку (КРРН)

Канал КРРН (рис. 1.08) содержит три блока: блок усилителей У5, блок сравнения СН2 и блок пороговый П6-1. Используются также блоки БУР и УК8, которые являются общими для каналов КРРН и КРРТ.

На структурных схемах блоки управления (**БУР**, **УК-8**) не показаны. Показаны только входы и выходы этих блоков, используемые для управления каналами.

Сигналы положительной полярности, пропорциональные нейтронной мощности, поступают от АКНП на входы **a1**, **a2**, **a3**, **a4** суммирующего усилителя **ИС1**. С выхода блока **У5** сигнал поступает в блок логарифматора **ЛГ** на входе канала **КРРТ** (рис. 11). Коэффициент усиления суммирующего усилителя **ИС1** в блоке **У5** устанавливается резистором **R7**.

В блоке **СН2** сигнал с выхода **У5** поступает на вход усилителя **ИС1** с переменным коэффициентом усиления, усиливается и сравнивается на входе усилителя **ИС2** с постоянным заданным значением мощности, которое устанавливается резистором **R9**.

Выходной сигнал усилителя **ИС2**, пропорциональный отклонению нейтронной мощности от заданного значения, усиливается на усилителе **ИС3** и поступает в блок **П6-1**. Блок **П6-1** преобразует аналоговый сигнал, поступающий на его вход, в трехпозиционный дискретный сигнал (отклонение «меньше», отклонение «больше»). Этот сигнал возвращается в блок **СН2** на входы **b1**, **b2**, где управляет регистром блока, изменяющим коэффициент усиления усилителя **ИС1**.

При включении устройства АРМ-5С в автоматический режим **КРРН** транзистор **T14** в блоке **БУР** запирается.

При этом на контакт **a4** блока **П6-1** подается сигнал нулевого уровня, а с контакта **a5** блока **П6-1** снимается сигнал нулевого уровня.

Если в процессе работы реактора в устройство АРМ-5С поступает сигнал о запрете увеличения мощности реактора по каким-либо причинам, например, при срабатывании ПЗ-2, то после обработки сигнала в блоке управления каналами **УК8** на контакт **b2** блока **П6-1** поступает сигнал нулевого уровня. Этот сигнал запрещает прохождение воздействия в схему управления приводами **СУЗ** на увеличение мощности реактора.

Выключение канала **КРРН** из автоматического режима производится либо снятием сигнала нулевого уровня с контакта **a4** блока **П6-1**, либо подачей на контакт **a5** блока **П6-1** нулевого сигнала.

Чувствительность канала **КРРН** по нейтронному потоку устанавливается резистором **R12** блока **СН2**.

Канал регулятора реактора по теплотехническому параметру (КРРТ)

Канал регулятора **КРРТ** (рис. 1.09) содержит шесть блоков: блок логарифматора **ЛГ**, необходимый для компенсации нелинейности реактора, блок динамический **Д2**, блок сравнения **СД2**, блок усилителей **У6** и два пороговых блока **П6-2** и **П6-3**.

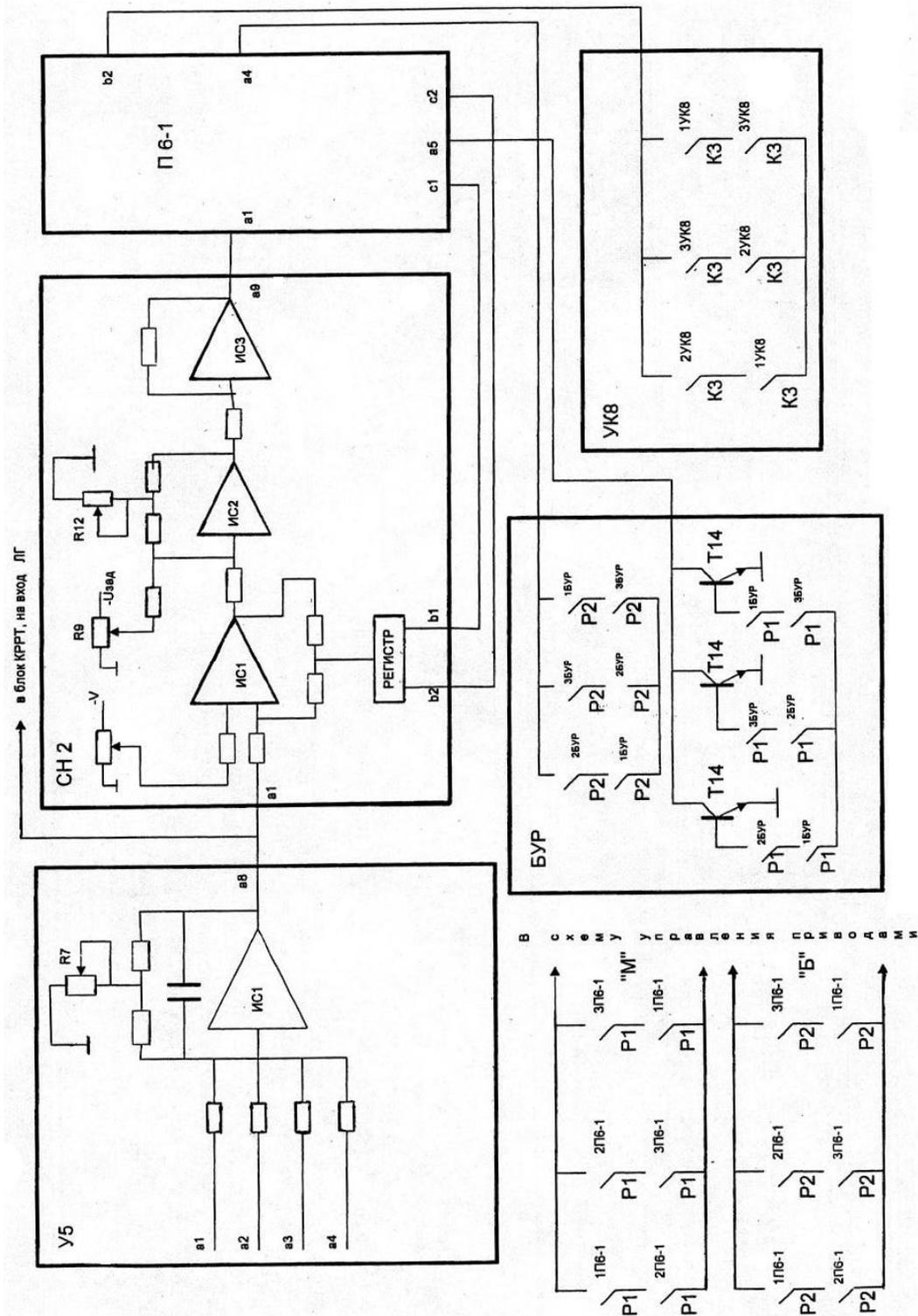


Рис. 1.08. Канал АРМ-5С по нейтронному потоку (КРРПН)

Сигналы положительной полярности, пропорциональные давлению, поступают от датчиков с нормированным выходным сигналом через контакты **а2** и **а1** блока **У6** на суммирующий усилитель **ИС1**. С выхода усилителя блока **У6** сигнал, пропорциональный среднему

значению давления, поступает в блок сравнения **СД2** на усилитель **ИС2**, где сравнивается с заданным значением давления. Сигнал заданного значения давления поступает с усилителя **ИС1** этого же блока, имеющего переменный коэффициент усиления.

Выходной сигнал, пропорциональный отклонению давления от заданного значения, с усилителя **ИС2** блока **СД2** усиливается на усилителе **ИС3** и поступает на контакт **а1** блока **П6-3**, где преобразуется в трехпозиционный сигнал. Чувствительность регулятора по давлению устанавливается резистором **Р17** блока **СД2**. Блок **П6-3** используется для управления регистром блока **СД2** и для управления блоком **П6-2** (контакт **а4**).

Контакты реле **Р1** и **Р2** блока **П6-2** используются в блоке **Д2** для управления обратной связью. Выходной сигнал с усилителя **ИС2** блока **СД2** через контакт **а8** поступает в блок **У6** на контакт **а3** и, далее через устройство ограничения, на суммирующий усилитель **ИС2**, где сравнивается с сигналом, поступающим на контакт **а4** из динамического блока **Д2**.

То есть происходит сравнение сигналов нейтронной мощности и отклонения от заданного давления пара. Сигнал, пропорциональный нейтронной мощности, поступает на контакт **а1** логарифмирующего блока **ЛГ** из блока **У5** регулятора **КРРН** и после логарифмирования – на контакт **а2** блока **Д2**, смещение характеристики логарифматора производится резистором **Р3**, а изменение крутизны – резистором **Р1** блока **ЛГ**.

Усилители **ИС2** и **ИС3** блока **Д2** охвачены сильной отрицательной обратной связью с выхода **ИС3** на вход усилителя **ИС1** через контакт реле **Р1** и резистор, и слабой отрицательной обратной связью через резистор **Р26** и контакт реле **Р2**.

Сильная обратная связь предусматривается для увеличения помехоустойчивости устройства **АРМ-5С**. Наличие этой связи приводит к тому, что большие возмущения по нейтронной мощности, поступающие на вход блока **Д2**, не вызывают срабатывания канала **КРРТ**. Размыкается сильная обратная связь при срабатывании блока **П6-2** (отклонение давления на $\pm 0,5$ кГс/см в режиме «Т» и отклонение давления на 1,5 кГс/см в режиме «Н»), т. е. при включении реле **Р1** и **Р2** этого блока.

На контактах реле блока **П6-2** собраны сборки «два из трех». Две сборки (одна на контактах реле **Р1**, вторая – на контактах реле **Р2**) используются в схеме управления приводами **СУЗ** для увеличения или уменьшения мощности реактора (на схеме не показаны), а две другие – для управления обратными связями в блоках **Д2**.

При срабатывании блока **П6-2** сигнал нулевого уровня с выхода блока **П6-2** **в3** или **в6** поступает в блок **Д2** и включает реле **Р2**. Один контакт этого реле используется для отключения слабой отрицательной обратной связи, второй – для подачи питания на катушку реле **Р1**.

Зона нечувствительности блока П6-3 меньше, чем у блока П6-2, поэтому к моменту срабатывания реле блока П6-2, реле блока П6-3 уже включено, и с контакта в6 или в3 блока П6-3 в блок Д2 поступает сигнал нулевого уровня, включающий реле Р1 блока Д2.

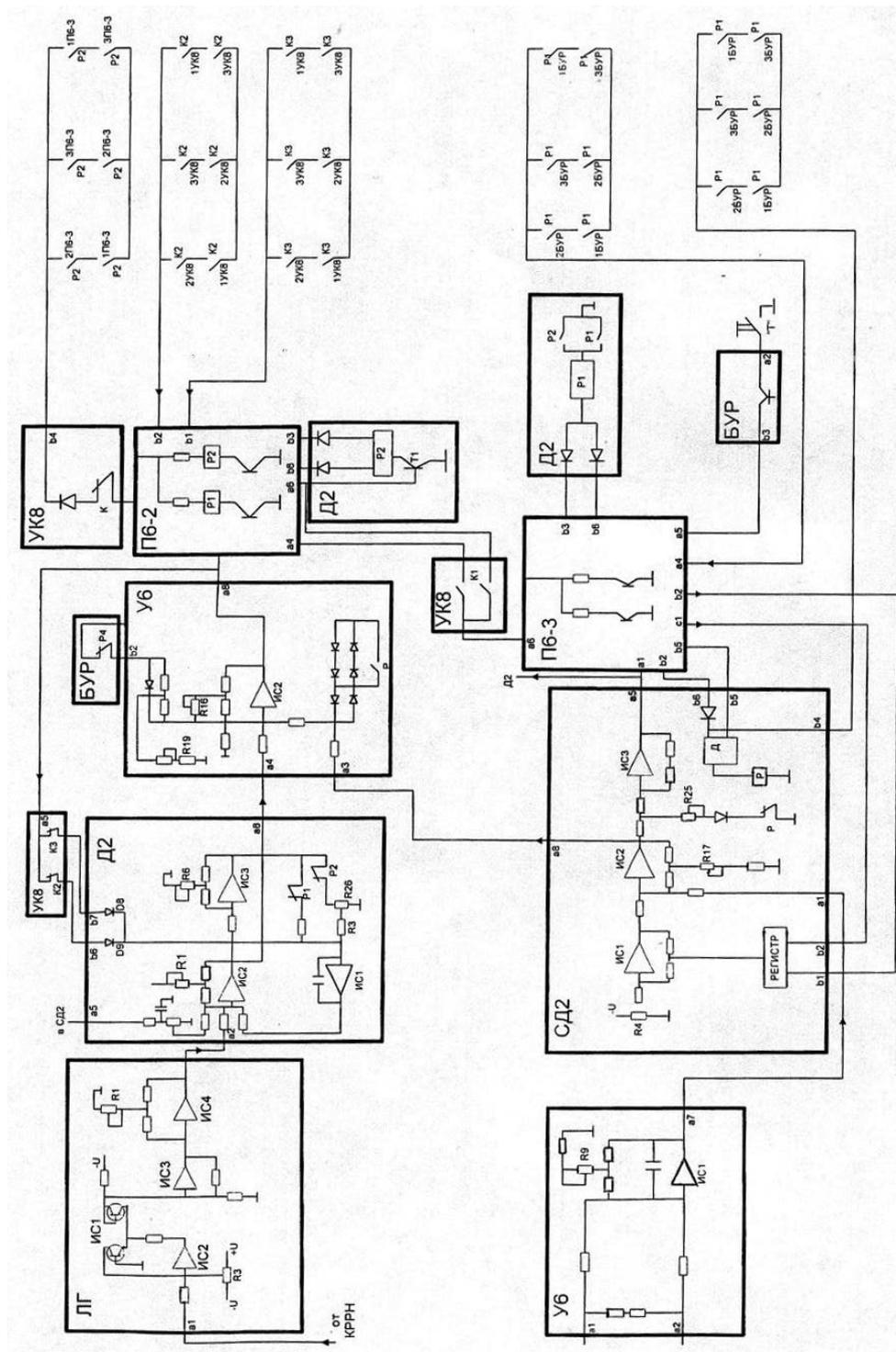


Рис. 1.09. Канал АРМ-5С по теплотехническому параметру (KRPT)

Контакт этого реле разрывает сильную отрицательную обратную связь. Она остается разомкнутой в течение отработки процесса возмущения, так как второй контакт реле **Р1** включен в цепь самоблокирования реле. Слабая отрицательная обратная связь размыкается только при подаче в систему СУЗ управляющего воздействия.

В соответствии с описанным алгоритмом работы блока **Д2** в статике сигнал на его контакте **а8** равен нулю. При обработке возмущения по давлению этот сигнал изменяется пропорционально изменению нейтронной мощности во время движения регулирующих стержней до величины, численно равной минус половине сигнала от давления.

Соотношение между нейтронной мощностью и давлением (% мощности /1 кГс/см), есть величина, на которую необходимо изменить мощность реактора при отклонении давления на 1 кГс/см для снятия выходного сигнала блока **П6-2**. Она устанавливается резистором **Р1** в блоке **Д2**.

После остановки стержней управления сигнал на контакте **а8** блока **Д2** уменьшается в результате замыкания слабой отрицательной обратной связи усилителей **ИС1...ИС3** блока. Постоянная времени интегратора устанавливается резистором **Р26** (регулировка длительности паузы). Длительность импульса на изменение мощности определяется величиной зоны возврата порогового блока **П6-2** и коэффициентов усиления усилителя **ИС2** блока **Д2**.

Включение на автоматическое управление реактором канала **КРРТ** в режиме «Т» производится путем подачи на контакт **а4** блока **П6-3** сигнала нулевого уровня с контактов блока **БУР**.

После установки задатчика блока **СД2** на фактический уровень параметра на контакте **а6** блока **П6-3** появляется сигнал нулевого уровня, который через контакт реле **К1** блока **УК8** поступает на контакт **а4** блока **П6-2**. Канал **КРРТ** включен на управление реактором после того, как на контакте **а6** блока **П6-2** появляется сигнал нулевого уровня.

Если при работе устройства АРМ-5С в режиме автоматического управления реактором на вход устройства поступает сигнал запрета увеличения или уменьшения мощности реактора по каким-либо причинам, то после обработки сигналов в блоке **УК8** в канал **КРРТ** через контакты реле **К2** или **К3** поступают сигналы нулевого уровня. При включении в блоке **УК8** реле **К2**, на котором формируется сигнал запрета на уменьшение мощности реактора, с контакта **а2** блока **УК8** в блок **П6-2** на контакт **в2** поступает нулевой сигнал, запрещающий прохождение сигнала в схему управления приводами СУЗ на уменьшение мощности.

Для того, чтобы интегратор блока **Д2** отслеживал за изменениями регулируемого параметра, с целью безударного включения канала на управление реактором в сторону уменьшения мощности при снятии за-

прещающего сигнала, усилители **ИС1**, **ИС2** блока **Д2** и **ИС2** блока **У6** охвачены сильной, нелинейной отрицательной обратной связью с контакта **а8** блока **У6** через контакт реле **К2** блока **УК8** и диод **Д9** блока **Д2** на вход усилителя **ИС1** блока **Д2**.

При увеличении давления сигнал отклонения давления от заданного уровня положительной полярности поступает из блока **СД2** через контакт **а3** блока **У6** на суммирующий усилитель **ИС2**, с его выхода через нелинейную обратную связь на вход интегратора **ИС1** в блоке **Д2** и с контакта **а8** блока **Д2** на второй вход суммирующего усилителя **ИС2** блока **У6**.

При уменьшении давления сигнал на входе **а3** блока **У6** вызывает увеличение мощности реактора, так как нелинейная отрицательная обратная связь в этом случае не работает – диод **Д9** в блоке **Д2** заперт.

При включении в блоке **УК8** реле **К3**, на котором формируется сигнал запрета на увеличение мощности реактора, с контакта **в5** блока на контакт **в1** блока **П6-2** поступает нулевой сигнал, запрещающий прохождение сигнала в схему управления приводами **СУЗ** на увеличение мощности. В этом случае также включается сильная нелинейная отрицательная обратная связь с контакта **а8** блока **У6** через контакт реле **К3** блока **УК8**, диод **Д8** блока **Д2** и вход усилителя **ИС1** блока **Д2**. Эта связь действует только при уменьшении давления. При увеличении давления отрицательная обратная связь не действует, так как диод **Д8** заперт.

В устройстве **АРМ-5С** предусмотрен автоматический переход из режима «Н» в режим «Т» при превышении давления заданного уровня.

При работе устройства **АРМ-5С** в режиме «Н» в каналы **КРРТ** из блока **БУР** поступают сигналы на включение в рабочий режим на контакт **а4** блоков **П6-1** и **П6-3**. После балансировки задатчиков каналы включаются в рабочий режим, но в блок **П6-2** разрешение на работу не поступает, так как в блоке **УК 8** реле **К1** включено и контакты реле, включенные между контактами **в5** и **в6** блока **УК8**, разомкнуты. Кроме того, на контакты **в4** и **в5** блока **СД2** поступает сигнал нулевого уровня из блока **БУР** (контакт **в5**) и **П6-3** (контакт **в6**), которые через включенную схему «Д», выполненную на трансформаторах **Т1...Т3**, включают реле **Р**. Контакт реле подключает ко входу усилителя **ИС3** делитель, который позволяет уменьшать коэффициент усиления усилителя **ИС3**, увеличивая уровень сигнала отклонения давления от заданного, при котором срабатывает блок **П6-3**. Величина этого уровня регулируется резистором **R25** блока **СД2**.

При увеличении давления до уровня срабатывания **П6-3** в них включаются реле **Р2**. Со сборки «два из трех», собранной на контактах реле **Р2** с контактов **в6** блоков **П6-3** поступает сигнал через замкнутый контакт реле **К1** блока **УК8** на контакт **а3** блока **П6-2**, разрешая тем самым каналу

КРРТ производить разгрузку реактора по давлению, реле **Р** в блоке **СД2** включается, так как со входа **в4** блока **СД2** снялся нулевой сигнал. Дели- тель на входе усилителя **ИС3** блока **СД2** отключается. Разгрузка реактора будет продолжаться до тех пор, пока не включится реле **Р2** блоков **П6-3**, т. е. давление не будет равно заданному. Тогда с контакта **а3** блока **П6-2** снимается разрешающий сигнал нулевого уровня и включится реле **К1** блока **УК8**. В этом случае разрешающий сигнал поступает на контакт **а4** блока **П6-2** через контакт реле **К1** блока **УК8** с контакта блока **П6-3**. После этого блок **П6-2** включается в рабочий режим.

Устройство разгрузки и ограничения мощности реактора РОМ-2

Измерение нейтронной мощности реактора производится косвенным образом по измерению нейтронов утечки ионизационными камерами, рас- положенными в сухой защите реактора. Как известно, показания системы АKNП при этом отличаются нестабильностью и зависят от распределения нейтронного потока по высоте реактора и множества других факторов. Но тепловая мощность реактора при этом остается постоянной.

Практически всегда при работе реактора наблюдается несоответ- ствие между тепловой и нейтронной мощностью. Но регулирование мощности и аварийная защита реакторной установки производятся по величине нейтронной мощности. Причина кроется в том, что как изме- рение, так и управление по тепловой мощности являются инерционны- ми, медленнодействующими процессами.

При расчете режимов всей реакторной установки в целом всегда исходят из величины тепловой мощности. В основном она вычисляется по параметрам расхода и температуры первого и второго контуров. По- этому и ограничения на режим работы АЭС, в частности от числа рабо- тающих тепловых петель реактора, т. е. от числа включенных ГЦН и ТПН, устанавливаются также по величине тепловой мощности.

Устройство разгрузки и ограничения мощности **РОМ-2** служит для поддержания допустимого уровня тепловой мощности реактора в зави- симости от числа работающих ГЦН и ТПН, а также от частоты напря- жения питания ГЦН.

Устройство **РОМ-2** состоит из трех идентичных независимых ка- налов, каждый из которых является автономным и выполнен в виде от- дельной панели. Выходные цепи прибора объединены по принципу «2 из 3» вне устройства.

Принцип работы **РОМ-2** основан на непрерывном сравнении нейтронной мощности **Нн** с заданным ее значением **Нзад**, значение ко- торой формируется в зависимости от числа включенных ГЦН и ТПН, и уменьшается ступенчато при отключении каждого ГЦН на 25 % и каж-

дого ТПН на 50 %. Далее работа прибора рассматривается при отключении ГЦН.

Сигнал нейтронной мощности непрерывно корректируется по значению тепловой мощности N_T , определяемой как $N_T = n * \Delta t_{cp}$, где Δt_{cp} – средний перепад температур на циркуляционных петлях, а n – число включенных ГЦН. То есть с уставкой $N_{зад}$ сравнивается скорректированное значение нейтронной мощности $N_{нк}$.

Рассмотрим два алгоритма работы **РОМ-2** – алгоритм разгрузки мощности реактора и алгоритм корректировки мощности.

Алгоритм разгрузки

Сигнал скорректированной нейтронной мощности $N_{нк}$ сравнивается с сигналом уставки $N_{зад}$ на входе операционного усилителя. Если $N_{нк} > N_{зад}$, то разностный сигнал с выхода усилителя поступает на вход порогового устройства. Если этот сигнал превысит зону нечувствительности устройства, то оно срабатывает, и на его выходе появляется сигнал разгрузки. Этот сигнал поступает в систему защиты **ПЗ-1** и вызывает разгрузку реактора, перемещая вниз стержни управления. Та же последовательность справедлива, если $N_{зад}$ скачком уменьшается на 25 % при отключении одного ГЦН, или на 50 % при отключении одного ТПН.

Алгоритм корректировки

Сигнал нейтронной мощности N_n поступает на вход операционного усилителя, имеющего переменный коэффициент усиления. Коэффициент усиления изменяется автоматически специальной схемой, управляемой сигналами извне. Снимаемый с выхода усилителя сигнал уже скорректированной нейтронной мощности $N_{нк}$ сравнивается с сигналом тепловой мощности N_T на другом операционном усилителе. При равенстве этих сигналов сигнал на выходе усилителя отсутствует. При возникновении разбаланса появляется сигнал, который усиливается и поступает на вход порогового устройства. На выходе порогового устройства появляется дискретный сигнал – логическая «единица». Этот сигнал поступает на вход элемента задержки, имеющего выдержку времени 50 с. Введение задержки позволяет исключить корректировку сигнала нейтронной мощности во время незначительных переходных процессов.

Если разность между сигналами $N_{нк}$ и N_T сохраняется более **50с**, то элемент задержки выдает сигнал на корректировку. Этот сигнал включает схему, которая изменяет коэффициент усиления усилителя. При этом, если N_T неизменна, то $N_{нк}$ будет изменяться до тех пор, пока не сравняется с N_T .

Ни один из алгоритмов не имеет абсолютного приоритета. Если выполняется алгоритм разгрузки, то выполнение алгоритма корректировки блокируется до окончания процесса разгрузки и наоборот.

Устройство РОМ-2 состоит из трех независимых каналов, размещенных на трех одинаковых панелях. Все основные блоки выполнены по блочному принципу. Блоки содержат в себе модули, выполненные на печатных платах. В панель РОМ-2 входят следующие блоки:

- блок формирования сигналов **ФС-2**;
- блок усиления **У4**;
- блок сравнения мощности **СМ**;
- пороговые блоки **П-1, П-2, П-3**, логический блок **Л-2/3-2-0**;
- блок мажоритарной обработки входных сигналов **БМВС**;
- блок временной задержки **БВ-2**;
- блок питания и блок контроля.

В панелях РОМ-2 установлены также нормирующие преобразователи **НП-5-Б1**, преобразующие сигналы от встречно включенных термоэлектрических преобразователей в пропорциональные унифицированные сигналы постоянного тока 0÷5 ма. Питание устройства производится постоянным током от источников питания +24В, -24В, +12В, -12В.

Внешними сигналами каждой панели РОМ-2 являются:

- 4 аналоговых сигнала, пропорциональных перепаду температур в циркуляционных петлях реактора, от малоинерционных хромель-копелевых термопар **ТХК-2076** (0÷3мв);
- 4-аналоговых сигнала, пропорциональные плотности нейтронного потока из комплекта АКНП (0÷5в);
- 4 дискретных сигнала по отключению ГЦН;
- 2 дискретных сигнала по отключению ТПН;
- 1 дискретный сигнал по снижению частоты переменного тока в сети питания ГЦН до 49 Гц.

Дискретные сигналы по отключению ГЦН и ТПН поступают с контактов панелей УКТС, а сигнал о снижении частоты в сети питания ГЦН – с соответствующих панелей ПФС-3 в виде напряжения 24 В постоянного тока. Выходными сигналами каждой панели РОМ-2 являются контакты выходного реле **К1**, которые поступают на панели ПФС-3 комплекта ПЗ-1. Сигналом разгрузки мощности является размыкание контактов реле **К1**. Результирующий сигнал разгрузки ПЗ-1 формируется в панелях ПФС-3 по мажоритарному принципу «два из трех».

Рассмотрим основы функционирования устройства РОМ-2. Структурная схема одного комплекта РОМ-2 представлена на рис. 13.

Величина скорректированного уровня нейтронной мощности $N_{нк}$ определяется соотношением

$$N_{нк} = K_1 * K_p * N_n,$$

где K_1 – коэффициент усиления 1 каскада У4, K_p – коэффициент усиления 1 каскада СМ.

Следует отметить, что K_p величина непостоянная. Если в течение 50 с сохраняется разбаланс между $N_{нк}$ и N_t , приведший к срабатыванию порогового устройства блока П-1, то по истечению этого времени происходит изменение K_p и значение $N_{нк}$ стремится к N_t с точностью

$$N_{нк} - N_t = \frac{U_{возвр}}{K_{1СМ} * K_{СМ}},$$

где $U_{возвр}$ – напряжение, при котором пороговый блок П-1 устанавливается в исходное состояние, $K_{см1}$, $K_{см}$ – коэффициенты усиления 2 и 3 каскада блока СМ.

Этот процесс называется перезаписью регистра. Если же разбаланс между $N_{нк}$ и N_t держится менее 50 с, то корректировка $N_{нк}$ по N_t не происходит.

Величина $N_{нк}$ непрерывно сравнивается с уставкой $N_{зад}$, значение которой зависит от числа работающих ГЦН и ТПН и от частоты переменного тока в сети питания ГЦН. Значения уставок соответствуют следующим уровням ограничения тепловой мощности реактора (в % от $N_{ном}$):

- 103 % $N_{ном}$, если работают 4-е ГЦН и 2-а ТПН;
- 78 % $N_{ном}$, при 3-х работающих ГЦН и 2-х ТПН;
- 53 % $N_{ном}$, при 2-х работающих ГЦН или 1-м ТПН.

При снижении частоты переменного тока в сети питания ГЦН до 49 Гц величина уставки автоматически уменьшается на 10 % от соответствующего значения.

Разгрузка мощности реактора осуществляется на 3 % ниже уровня ограничения мощности.

Сигналы, пропорциональные перепаду температур в циркуляционных петлях реактора ΔT (номинальное значение $U_{ном} = -3.0 \pm 0.2 В$) через нормирующие преобразователи поступают в блок ФС-2, где на основе этих сигналов и сигналов по отключению ГЦН и снижению частоты переменного тока в сети питания ГЦН происходит формирование сигнала N_t , пропорционального тепловой мощности реактора, по формуле:

$$N_t = \Delta T_{cp} * K_2,$$

где ΔT_{cp} – средний перепад температур на петлях

К2 – коэффициент пропорциональности, значение которого зависит от количества находящихся в работе **ГЦН** и частоты переменного тока в сети питания **ГЦН**.

Сигнал ΔT_{cp} формируется на усилителе **A1** блока **ФС-2**. Далее этот сигнал поступает на вход усилителя **A2**, коэффициент усиления которого равен единице при всех работающих **ГЦН** и частоте переменного тока выше **49 Гц** в сети питания **ГЦН** и автоматически уменьшается до необходимого значения при отключении каждого **ГЦН** (размыкаются контакты соответствующего реле **К5÷К8**), а также при снижении частоты до **49 Гц** (реле **К11**). При снижении частоты переменного тока значение коэффициента **К2** должно быть уменьшено на **6 %**. Это осуществляется замыканием контактов реле **К11** в цепи обратной связи усилителя **A2** блока **ФС-2**.

Таким образом, с выхода усилителя **A2** снимается сигнал **Nт**, пропорциональный тепловой мощности реактора, который поступает на вход усилителя **A2** блока **СМ**.

Величина сигналов, пропорциональных ΔT , контролируется пороговыми блоками **1ПЗ...4ПЗ**, выходы которых соединены с управляющими входами блока **ФС-2** от термопар. Если возникает неисправность входной цепи, то это не сказывается на величине сигнала ΔT_{cp} , так как срабатывают компараторы соответствующего блока **ПЗ**, выходным сигналом которого в блоке **ФС-2** отключается неисправная входная цепь. Критерием неисправности служит величина входного сигнала, выходящая за установленные пределы **0.4÷4 в**.

Усилитель **A3** блока **ФС-2** используется для формирования заданного значения нейтронной мощности **Nзад** в зависимости от количества включенных **ГЦН** и **ТПН** и от частоты питания **ГЦН**. Для ограничения тепловой мощности до **103 % N_{ном}** служит потенциометр **R33**. Для установки **Nзад** на уровне **53 % N_{ном}** служит потенциометр **R34**. Сигнал **Nзад** поступает далее на вход усилителя **A2** блока **У4**. Сигналы, пропорциональные плотности нейтронного потока, из комплекта **АКНП** поступают на вход усилителя **A1** блока **У4**, где происходит их усреднение по величине. Номинальное значение сигналов **АКНП** равно **U_{ном}=5.0±0.28В**. Полученный сигнал, пропорциональный нейтронной мощности **Nн**, подается на вход усилителя **A1** блока **СМ**, который имеет переменный коэффициент усреднения. Коррекция коэффициента усиления усилителя производится посредством изменения двоичного кода, записанного в цифровом регистре, от которого зависит величина

сопротивления обратной связи усилителя (этот процесс называют перезаписью регистра). Запуск регистра на перезапись и его останов осуществляется сигналами управления из блока П1.

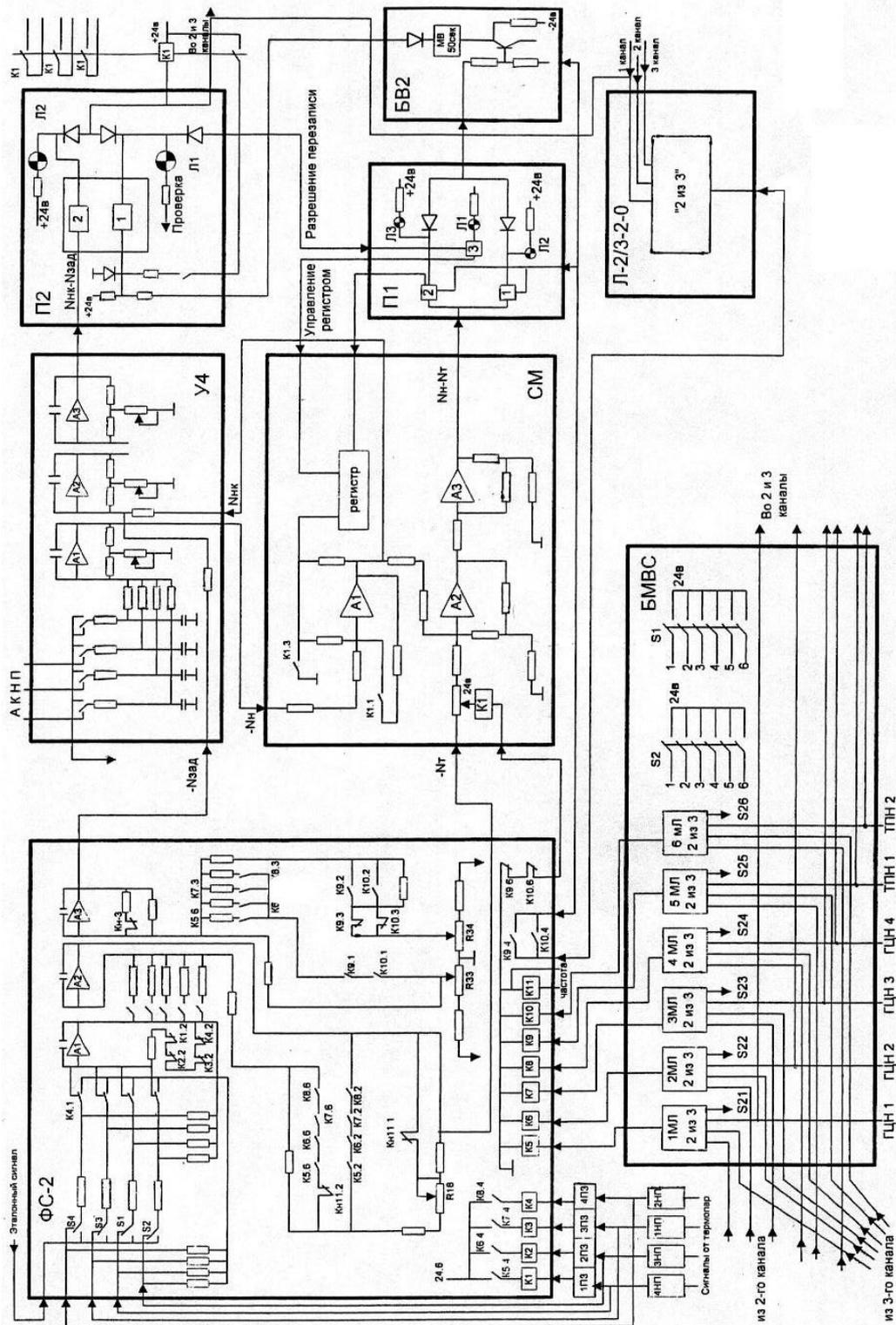


Рис. 1.10. Структурная схема устройства РОМ-2

Выходной сигнал усилителя А1 блока СМ пропорционален значению скорректированного значения нейтронной мощности $N_{нк}$. Он подается на вход усилителя А2, который формирует сигнал, пропорциональный разности ($N_{нк}-N_t$). Далее этот сигнал поступает на компараторы 1 и 2 порогового блока П1, который фиксирует появление разбаланса между $N_{нк}$ и N_t (зона нечувствительности равна $1\%N_t$). В нормальном установленном состоянии $N_{нк}$ и N_t примерно равны между собой и напряжение на выходе усилителя А3 блока СМ недостаточно для срабатывания компараторов блока П-1 (лампы Л2 и Л3 не горят).

На усилителях А2 и А3 второго порогового блока У4 происходит последовательное усиление разностного сигнала ($N_{нк}-N_t$), который затем передается на компаратор 2 блока П2, управляющий состоянием выходного реле К1. Будем считать нормальной работой случай, когда величина $N_{нк}$ несколько меньше уставки $N_{зад}$. В этом случае выходное реле находится под током и его контакты замкнуты (лампа Л2 блока П2 горит).

Рассмотрим основные режимы работы устройства РОМ-2.

1. Величина сигнала $N_{нк}$ сравнялась с уставкой N_t (рис. 1.11 А)

Устройство срабатывает в следующей последовательности:

- срабатывает компаратор 2 блока П-2 (гаснет лампа Л2 блока П-2);
- обесточивается выходное реле панели РОМ-2, реле К1, его контакты размыкаются;
- выдается сигнал разгрузки мощности реактора в панели ПФС-3 системы аварийной защиты ПЗ-1;
- если с другой панели РОМ-2 поступает такой же сигнал, то по принципу «два из трех» осуществляется снижение мощности реактора до уровня, определяемого числом работающих ГЦН и ТПН, а также частотой питания ГЦН.

После этого устройство РОМ-2 возвращается в исходное состояние в следующей последовательности событий:

- компаратор 2 блока П-2 возвращается в исходное состояние (зажигается лампа Л2 блока П2);
- включается выходное реле К1, его контакты замыкаются;
- сигнал аварийной защиты ПЗ-1 снимается.

Если разбаланс между $N_{нк}$ и N_t выходит за пределы зоны нечувствительности устройства ($\pm 1\%$ от номинального значения N_t), то РОМ-2 автоматически осуществляет корректировку $N_{нк}$ по N_t . Процессы корректировки рассматриваем для каждого возможного варианта появления разбаланса, больше чем 1% от номинального значения N_t , длящегося более 50 с.

2. Увеличение нейтронной мощности относительно тепловой, т. е. $N_{нк} - N_t > 0$ (рис. 1.11 В).

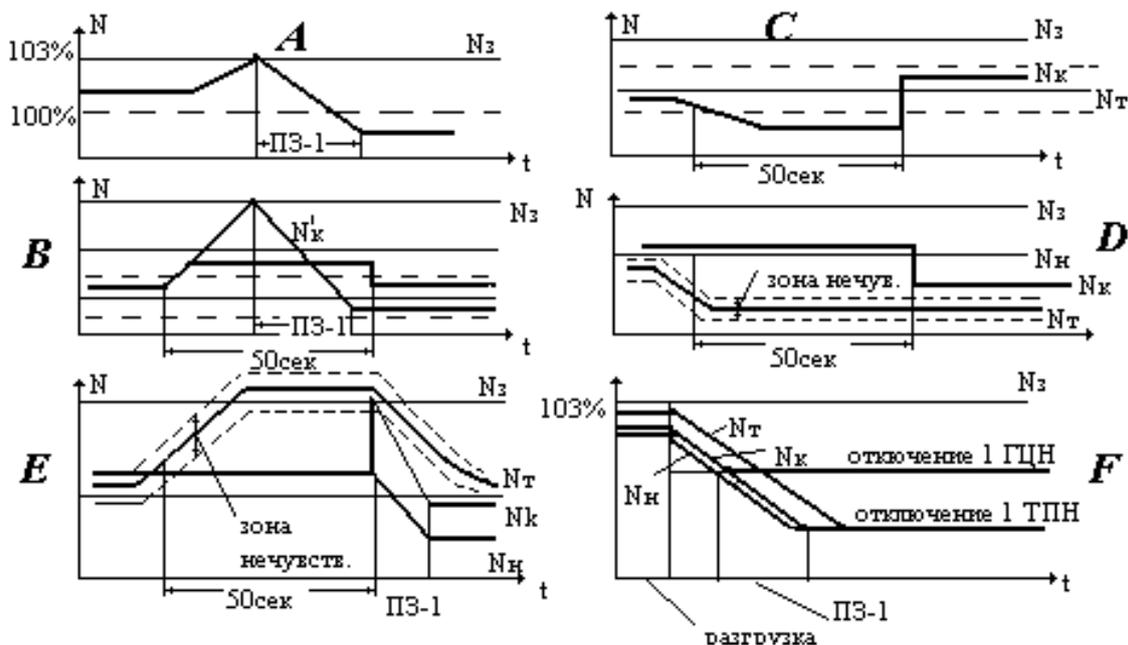


Рис. 1.11. Режимы работы РОМ-2

В случае увеличения нейтронной мощности увеличивается и значение $N_{нк}$. Появляется разбаланс $N_{нк}-N_{т}>0$ и происходит процесс перезаписи регистра в следующей последовательности:

- срабатывает компаратор 1 порогового устройства бока П1 (зажигается лампа 2 блока П1);
- через 50 с срабатывает блок БВ2, вызывая срабатывание компаратора блока П2 (зажигается лампа Л1 блока П2, сигнализируя о разрешении на перезапись и подхвате выходного реле К1);
- по сигналу разрешения с выхода блока П2 срабатывает компаратор 3 блока П1 (гаснет лампа Л1 блока П1), запуская на перезапись регистр блока СМ;
- регистр блока СМ изменяет усиление усилителя А1 блока СМ до тех пор, пока значение $N_{нк}$ не сравняется с $N_{т}$ (в данном случае $N_{нк}$ уменьшается);
- при исчезновении разбаланса компаратор 1 блока П1 возвращается в исходное состояние (гаснет лампа Л2 блока П1) и перезапись регистра прекращается;
- блок БВ2 возвращается в исходное состояние;
- компаратор 1 блока П2 возвращается в исходное состояние, снимая подхват выходного реле (лампа Л2 блока П2 гаснет);
- компаратор 3 блока П1 возвращается в исходное состояние (зажигается лампа Л1 блока П1).

В случае увеличения нейтронной мощности и соответственно $N_{нк}$ до 103 % за время менее 50 с, происходит срабатывание реле К1 и по

двум из трех устройств РОМ-2 проходит сигнал аварийной защиты ПЗ-1 до съема сигнала отключения К1.

3. Уменьшение нейтронной мощности реактора относительно тепловой (рис. 11.С).

В этом случае уменьшается $N_{нк}$, появляется разбаланс $(N_{нк}-N_{т}) < 0$ и происходит процесс перезаписи регистра в следующей последовательности:

- срабатывает компаратор 2 порогового блока П-1 (зажигается лампа 3 блока П1), запуская в работу блок времени БВ2;
- повторяются операции, описанные выше.

При этом регистр изменяет коэффициент усиления А1 блока СМ до тех пор, пока значение $N_{нк}$ не сравнивается со значением $N_{т}$ (в данном случае значение $N_{нк}$ возрастает).

При исчезновении разбаланса между $N_{нк}$ и $N_{т}$ компаратор 2 блока П1 возвращается в исходное состояние (гаснет лампа ЛЗ блока П1) и перезапись регистра прекращается.

4. Уменьшение тепловой мощности реактора $N_{т}$ относительно нейтронной мощности $N_{н}$ (рис. 1.11.Д).

В этом случае происходит процесс перезаписи регистра, совершенно аналогичный вышеописанному. В результате этого процесса значение $N_{нк}$ уменьшается и увеличивается абсолютная величина разности $(N_{нк}-N_{зад})$, чем обеспечивается большой запас до срабатывания выходного реле К1.

5. Увеличение тепловой мощности реактора $N_{т}$ относительно нейтронной мощности $N_{н}$ (рис. 1.11.Е).

В этом случае происходит процесс перезаписи регистра, аналогичный п.2. Если в результате перезаписи значение $N_{нк}$ превышает значение уставки $N_{зад}$, то по окончании перезаписи происходит срабатывание панели устройства РОМ-2 в последовательности пункта 1.

Аналогичные процессы происходят в двух других каналах РОМ-2, но из-за погрешностей в настройке каналов эти процессы в каналах могут проходить несинхронно.

В каждой панели РОМ-2 имеется логический блок Л-2/3-2-0. Один его вход соединен с выходом блока П2, а на два других входа приходят сигналы с выходов пороговых блоков П2 других панелей. Если сигнал разгрузки прошел хотя бы по двум каналам из трех, блок Л-2/3-2-0 срабатывает и на его выходе появляется сигнал, запрещающий перезапись регистра в блок СМ данной панели. Такая блокировка исключает возможность перезаписи регистра до тех пор, пока не закончится процесс разгрузки и не установится новое исходное состояние.

Рассмотрим работу устройства **РОМ-2** в переходных режимах (отключение **ГЦН**, **ТПН**, снижение частоты тока в сети питания **ГЦН**) (рис. 1.11*F*). Для обработки входных дискретных сигналов по отключению **ГЦН** и **ТПН** служит блок **БМВС**. В этом блоке каждый входной сигнал проходит через модуль задержки, который исключает срабатывание **РОМ-2** при кратковременных переходных процессах. Затем сигнал поступает на вход соответствующего логического модуля **МЛ**. На два других входа каждого модуля **МЛ** поступают соответствующие сигналы из блоков **БМВС** других каналов **РОМ-2**. В свою очередь и в данном канале **РОМ-2** сигналы после модуля задержки поступают не только в свои модули **МЛ**, но и выводятся в два других канала. Логические модули **МЛ** формируют сигнал на выходе при наличии двух сигналов на входе, т. е. осуществляется обработка по принципу «два из трех».

Обработанные сигналы по отключению **ГЦН** и **ТПН**, а также снижению частоты питания поступают в блок **ФС-2**.

При отключении любого **ГЦН** в блоке **ФС-2** обесточивается одно из реле **К5-К8**, соответствующее этому **ГЦН**, и размыкаются контакты этого реле во входной цепи усилителя **А3**, формирующего значение **Нзад**. При этом величина уставки **Нзад** скачкообразно уменьшается до **78 %** от номинального значения и, если величина **Ннк** оказывается больше значения **Нзад**, происходит срабатывание устройства **РОМ-2** в последовательности, описанной в п.1.

При отключении любого **ТПН** в блоке **ФС-2** обесточиваются соответствующие реле **К9** или **К16**, и его контакты подключают к усилителю **А3** входную цепь с потенциометром **Р34**, и отключают цепь с потенциометром **Р33**, напряжение уставки **Нзад** оказывается равным **53 %** от номинального значения. Если при этом величина **Ннк** оказывается больше **Нзад**, то происходит срабатывание устройства в последовательности, описанной в п.1. Данная входная цепь рассчитана так, что при отключении двух **ТПН** величина уставки **Нзад** уменьшается до **10 %** от номинального значения.

При снижении частоты в сети питания **ГЦН** до **49 Гц** в блоке **ФС-2** обесточивается реле **К11** и замыкаются его контакты в цепи обратной связи усилителя **А3**. Уровень ограничения тепловой мощности реактора при этом уменьшается на **10 %** от установившегося значения для данного количества работающих **ГЦН** и **ТПН**.

При выходе реактора на мощность (около **10 %** от номинальной мощности) устройство **РОМ-2** автоматически переходит в нормальный рабочий режим, при этом лампы на блоках **ПЗ** гаснут и зажигаются лампы **Л1** блоков.

При отключении **1ГЦН** или **1ТПН** после срабатывания аварийной защиты **ПЗ-1**, от **РОМ-2**, если **N_т** будет превышать **N_{зад}**, то последует вновь корректировка **N_н** по **N_т** (через 50 с), что может привести к превышению **N_{нк}** над **N_{зад}** и в таком случае повторно работает **РОМ-2** аналогично п.1.

Шаговый электромагнитный привод

Привод органов регулирования (ОР) реактора ВВЭР-1000 представляет собой электромагнитный исполнительный механизм (**ШЭМ**), обеспечивающий вертикальное возвратно-поступательное шаговое перемещение или удержание штанги, сцепленной с кластером.

Привод состоит из следующих основных узлов (транспортных сборок): прочного плотного чехла, обеспечивающего герметичность системы, блока электромагнитов, блока перемещения, преобразователя перемещения, датчика положения **ЛД-2**, штанги. На рис. 1.12 представлена схема привода **ШЭМ**, поясняющая его работу

Режим перемещения привода обеспечивается подачей форсирующих импульсов тока, коммутируемых в определенной последовательности на катушки электромагнитов привода, в результате чего связанная с подвижными полюсами подвижная защелка перемещает штангу, а защелка фиксирующего блока удерживает ее между перемещениями. Режим стоянки привода обеспечивается подачей импульса тока на фиксирующий электромагнит, в результате чего удерживающая защелка обеспечивает удержание штанги. Тянущий и запирающий электромагниты в это время обесточены, подвижная защелка открыта (расцеплена со штангой).

В режиме аварийной защиты **A3** все три электромагнита обесточиваются, защелки открываются и штанга с кластером свободно падает вниз в активную зону.

В исходном состоянии штанга с кластером подвешена на кулачки удерживающей защелки фиксирующего блока. Тянущий и запирающие электромагниты обесточены. Неподвижный полюс запирающего электромагнита, подвижный полюс запирающего магнита имеют рабочие зазоры 20 мм и 12 мм. На рис. 1.13 приведена временная диаграмма работы привода.

Перемещение штанги с кластером вверх на один шаг происходит в следующем порядке:

- *возбуждается запирающий электромагнит* тянущего блока. Подвижный полюс запирающего электромагнита перемещается на величину **12 мм**, запорная втулка подвижного узла закрывает кулачки подвижной защелки;

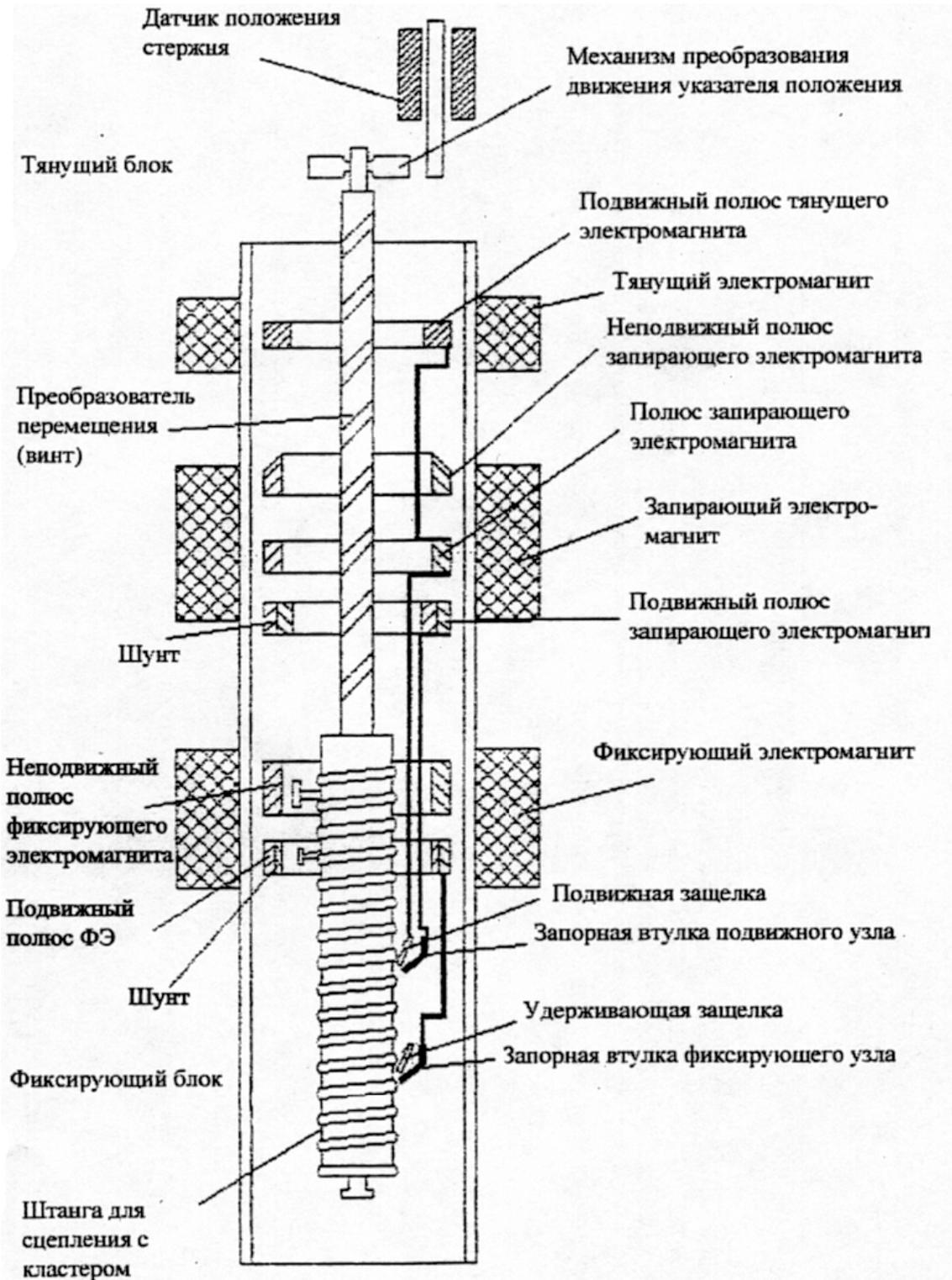
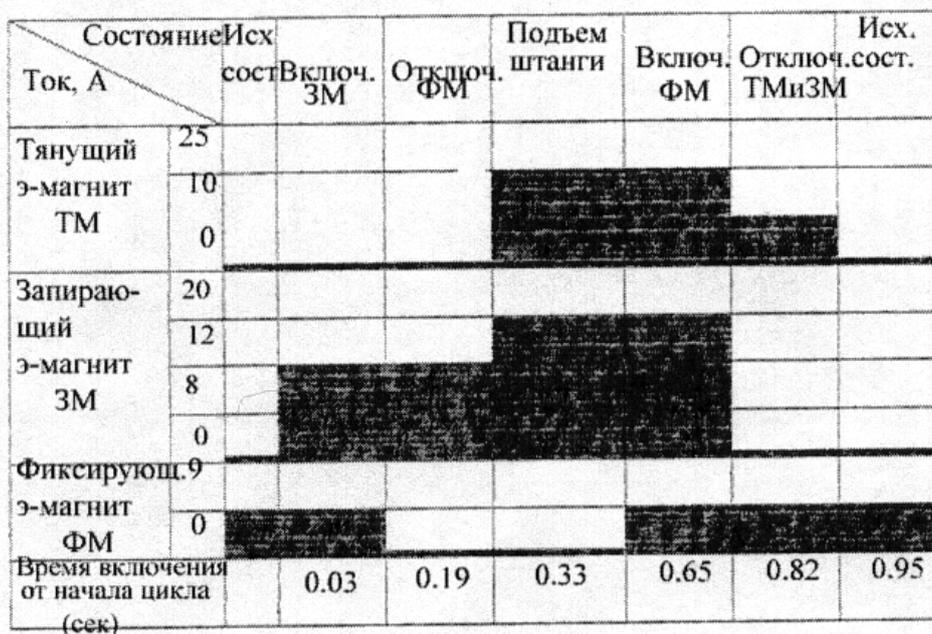


Рис. 1.12. Конструкция ШЭМ

- обесточивается фиксирующий электромагнит. Подвижный полюс фиксирующего электромагнита, связанный с запорной втулкой фиксирующего узла, перемещается вниз (свободное падение) на

ход **15** миллиметров и открывает удерживающую защелку. Штанга с кластером повисает на подвижной защелке;

Ход привода вверх на один шаг



Ход привода вниз на один шаг

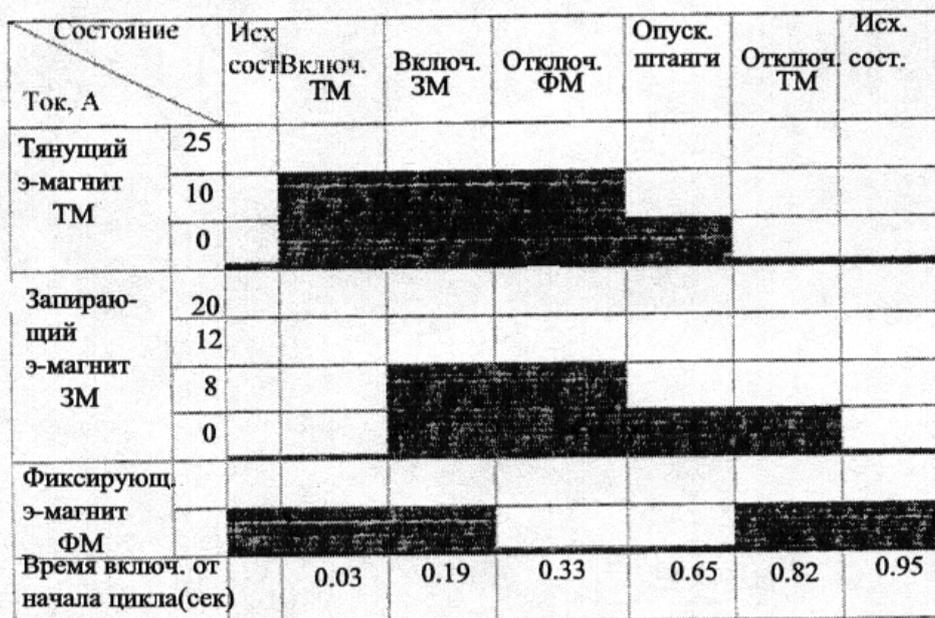


Рис. 1.13. Временная диаграмма токов ШЭМ

- подается возбуждение на тянущий электромагнит и подвижная защелка (с закрытыми кулачками) со штангой и кластером перемещается вверх на ход **20** мм;

- *снижается ток на запирающем электромагните.* Возбуждается фиксирующий электромагнит. При перемещении подвижного полюса фиксирующего электромагнита с запорной втулкой фиксирующего узла на ход 12 мм происходит закрытие кулачков удерживающей защелки. Так как ход подвижного полюса фиксирующего электромагнита равен 15 мм, то дальнейшее перемещение подвижного полюса происходит вместе с удерживающей защелкой (с закрытыми кулачками) на величину 1,5 мм до момента контакта рабочей поверхности кулачков со штангой. Оставшиеся 1,5 мм хода подвижного полюса происходит вместе со штангой, при этом в подвижной защелке тянущего блока обеспечивается гарантированный зазор 1,5 мм между кулачками подвижной защелки и рабочей поверхностью штанги;
- *снижается ток на тянущем электромагните, на фиксирующем электромагните устанавливается ток удержания.* Обесточивается запирающий электромагнит тянущего блока, подвижный полюс запирающего электромагнита с запорной втулкой подвижного узла перемещается вниз (свободное падение) на ход 12 мм, происходит открытие кулачков подвижной защелки;
- *снижается ток на тянущем электромагните.* Подвижный полюс тянущего электромагнита, полюс запирающего электромагнита с открытыми кулачками подвижной защелки перемещается вниз на ход 20 миллиметров. Одновременно на 20 мм опустится вниз подвижный полюс запирающего электромагнита с запорной втулкой подвижного узла. Перемещение происходит под действием собственного веса при сниженном токе в тянущем электромагните. Обесточивается тянущий электромагнит. Таким образом, привод приведен в исходное состояние.

Перемещение штанги с кластером вниз на один шаг происходит в следующем порядке:

- *возбуждается тянущий электромагнит,* подвижный полюс тянущего электромагнита вместе с открытыми кулачками подвижной защелки, полюсом запирающим электромагнита, подвижным полюсом запирающего электромагнита и запорной втулкой подвижного узла перемещается вверх на величину хода 20 мм;
- **возбуждается запирающий электромагнит,** подвижный полюс запирающего электромагнита перемещается на величину хода 12 мм, при этом запорная втулка подвижного узла закрывает кулачки подвижной защелки;
- **обесточивается фиксирующий электромагнит.** Подвижный полюс фиксирующего электромагнита перемещается вниз (свободное

падение) на ход 15 мм и открывает кулачки удерживающей защелки. Штанга повисает на кулачках подвижной защелки;

- **снижается возбуждение запирающего электромагнита** до значения тока, при котором запирающий электромагнит не может удерживать полюс запирающего электромагнита и подвижный полюс запирающего электромагнита, и подвижная защелка с подвешенной штангой с кластером перемещается (свободное падение) вниз на ход 20 мм;
- **обесточивается тянущий электромагнит.** Возбуждается фиксирующий электромагнит. Происходит закрытие кулачков удерживающей защелки, кулачки ее контактируют с рабочей поверхностью штанги и поднимает штангу на 1,5 мм. Обеспечивается гарантированный зазор между кулачками подвижной защелки и рабочей поверхностью штанги;
- **обесточивается запирающий электромагнит,** происходит открытие подвижной защелки. Привод принимает исходное положение.

Контроль положения штанги привода СУЗ производится с помощью преобразователя перемещения, представляющего винт, вращающийся при перемещении штанги. Вращательное движение преобразователя перемещения (винта) передается через муфту на датчик положения ЛД-2. Внутри корпуса ЛД-2 находится 12 индукционных катушек и бронзовый магнитный шунт, который перемещается внутри датчика ЛД-2, получая свое вертикальное перемещение через муфту от преобразователя перемещения (винта). Катушки ЛД-2 расставлены по высоте датчика на одинаковом расстоянии, обеспечивающем индикацию положения ОР (штанги ШЭМ) через 350 мм и остановку в конечных положениях.

Технические данные привода ШЭМ

- скорость перемещения регулирующего органа в режиме регулирования $20 \pm 1,5$ мм/с
- время падения штанги с кластером при АЗ $1,5 \div 4$ с
- рабочий ход 3500 ± 40 мм
- масса регулирующего органа (кластера) 25 кг
- потребляемая мощность в режим перемещения 2 кВт
- шаг перемещения штанги 20 ± 2 мм
- запас хода по штанге от срабатывания нижнего конечного выключателя при входе вниз 60 ± 20 мм
- сопротивление изоляции электрооборудования привода при $t = 20$ С 50 Мом
при рабочих условиях 0,5 Мом
- сила тока

а) фиксирующий электромагнит ток удержания	9 А
б) запирающий электромагнит:	
• ток удержания	8,5 А
• ток включения	12 А
• ток форсирования	20 А
в) тянущий электромагнит	
• ток демпфирования	10±0,5 А
• ток форсирования	25 А
• напряжение питания датчика положения при 50 Гц	180 В
• расход охлаждающего воздуха при $t = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$	400 м ³ /ч
• масса привода	550 кг
• расчетное землетрясение	9 баллов
• температура воды в ЛД-2 не более	250 °С

1.1.3. Выравнивание распределения потока по высоте активной зоны

В реакторах с большой активной зоной типа ВВЭР-1000 и РБМК могут возникать значительные ксеноновые колебания. Для таких реакторов одновременно с регулированием интегральной мощности необходимо управление распределением нейтронного поля. Работа реактора на номинальной мощности, рассчитанной по средней плотности потока нейтронов, и соответствующему ему энерговыделению, сама по себе еще не гарантирует безопасной работы активной зоны. Решая задачу поддержания энерговыделения в допустимых рамках, определяемых теплоотводом, основное внимание необходимо обращать на проблемы, связанные с неравномерностью энерговыделения по активной зоне реактора.

Практические ограничения теплового режима реактора, которые определяют допустимые условия его эксплуатации, связаны прежде всего с ограничениями:

- по величине теплового потока от ТВЭЛа;
- по температуре топлива (конструктивных элементов ТВЭЛа);
- по температуре теплоносителя.

Предельные значения этих параметров достигаются прежде всего в наиболее энергонапряженных областях активной зоны, условия в которых тем более отличаются от средних условий в реакторе, чем больше неравномерность энерговыделения. Неравномерность распределения энерговыделения в активной зоне характеризуется коэффициентами неравномерности энерговыделения, знание которых необходимо для определения допустимой тепловой мощности реактора.

Ниже рассмотрены основные причины возникновения неравномерности (с разделением на группы, удобные для анализа) и некоторые практические способы ее уменьшения.

Макрораспределение энерговыделения.

Макрораспределение энерговыделения в активной зоне реактора характеризуется коэффициентами неравномерности K_z – коэффициент неравномерности энерговыделения по высоте активной зоны и K_q – коэффициент неравномерности энерговыделения по кассетам. Коэффициенты неравномерности энерговыделения определяются как отношение максимального значения энерговыделения к среднему значению по данному измерению:

$$K_i = \frac{Q_i^{\max}}{Q_i}.$$

По определению коэффициент неравномерности энерговыделения по кассетам равен:

$$K_{qi} = \frac{Q_{TBCi}^{\max}}{Q_{TBC}},$$

где Q_{TBCi}^{\max} Q_{TBCi} – максимальная и средняя мощности ТВС в активной зоне (обычно индексом i конкретизируется местоположение ТВС в активной зоне, т. е. ее координата).

Согласно «Технологическому регламенту эксплуатации» значение K_q не должно превышать 1,5.

Снижение неравномерности энерговыделения по активной зоне, а значит, и уменьшение K_i , позволяет снимать с нее большую тепловую мощность без превышения ограничений.

На практике снижение неравномерности энерговыделения по кассетам достигается специальным распределением топлива по активной зоне (физическое профилирование), при котором обеспечиваются более высокие размножающие свойства топлива в зонах с пониженным энерговыделением (вблизи границ активной зоны) и пониженные размножающие свойства в зонах с повышенным энерговыделением (в центральной области активной зоны). Вся активная зона разбивается на ряд концентрических областей (например, для ВВЭР-440 выделяют 3 зоны с топливом 1,6; 2,4 и 3,6 % обогащения) и топливо с более высокими размножающими свойствами (большим обогащением) помещается во внешнюю область, а с более низкими размножающими свойствами

ми (меньшим обогащением либо частично выгоревшие ТВС) – в центральные зоны.

Теоретически возможно применение физического профилирования по высоте активной зоны путем набора твэлов из топливных таблеток различного обогащения. На практике, в ядерной энергетике, этот метод, так же как и другие виды профилирования для уменьшения K_z , применения не нашел ввиду экономической нецелесообразности.

Помимо упомянутых целенаправленных мер, на уменьшение неравномерности энерговыделения влияют некоторые эффекты саморегулирования в активной зоне, связанные с неравномерным по зоне проявлением мощностного эффекта реактивности, отравления ксеноном – 135 и выгорания топлива. Более интенсивно эти процессы происходят в областях с более высокой мощностью (т. е. там, где больше нейтронный поток), что приводит к большему снижению размножающих свойств топлива в этих областях. Эффект «самовыравнивания» поля в ходе эксплуатации приводит к дополнительному снижению неравномерности энерговыделения. Макрораспределение мощности, определяемое свойствами топлива по активной зоне, подвергается значительным искажениям за счет влияния органов СУЗ, которые являются наиболее сильным источником неравномерности энерговыделения в реакторах типа ВВЭР.

Во время работы реактора на мощности все кассеты автоматического регулирования, за исключением 6-й регулирующей группы, взведены и находятся на верхних концевых выключателях и, следовательно, практически не вносят искажения в распределение нейтронного потока. Наличие жидкого поглотителя (борное регулирование) позволяет оставить 6-ю группу в промежуточном положении, обеспечивающем наиболее равномерное распределение плотности потока нейтронов по высоте и радиусу активной зоны.

При работе ВВЭР на номинальной мощности энергонапряженность активной зоны настолько велика, что перекося нейтронного поля при введении в активную зону отдельных сборок или группы стержней может привести к недопустимому росту температуры в отдельных ТВС. Учитывая, что тепловая мощность пропорциональна интегралу плотности потока нейтронов по всему объему активной зоны, можно принять, что мощность реактора пропорциональна и его радиальной составляющей, т. е. площади, ограниченной кривой радиальной составляющей нейтронного потока. Поэтому при погружении кассеты автоматического регулятора в активную зону и неизменной тепловой мощности реактора, нейтронный поток в противоположном от опустившейся кассеты районе должен вырасти так, чтобы площадь, ограниченная кривой распределения нейтронного потока при номинальной мощности и полностью извле-

ченных кассетах автоматического регулирования, осталась неизменной. При этом энерговыделение в ТВС, расположенных в районе нейтронного потока Φ_1^{\max} , увеличится, а соответственно возрастет (и, возможно, превысит допустимые значения) температура теплоносителя на выходе из этих кассет. Поэтому для каждого типа реакторов рассчитывается и затем экспериментально проверяется зона регулирования рабочей группы органов регулирования СУЗ. При этом однако необходимо помнить, что высота подъема регулирующей группы автоматического регулятора должна быть достаточной для отработки возникающих во время работы возмущений по реактивности (т. е. дифференциальная эффективность группы стержней должна быть достаточно большой). В реакторах ВВЭР-440 такой оптимальный интервал рабочего положения 6-й регулирующей группы находится в пределах 150–200 см. В этом интервале дифференциальная эффективность 6-й группы стержней составляет $1,2 \cdot 10^{-4}$ 1/см, а скоростная эффективность (рабочая скорость перемещения стержней – 2 см/с) $\sim 2,4 \cdot 10^{-4}$ 1/с.

В качестве дополнительного средства уменьшения высотной неравномерности энерговыделения может быть использовано неравномерное размещение по высоте кассеты выгорающего поглотителя. Этот метод был применен в реакторах ВВЭР-365 (2-й блок НВАЭС) и ВВЭР-440 3-го блока НВАЭС.

Микрораспределение энерговыделения.

Рассмотренные выше неравномерности энерговыделения характеризуют собой «макрополе». На них накладываются локальные отклонения энерговыделений от средних значений в данном районе.

Микрораспределение энерговыделения в активной зоне реактора характеризуется коэффициентом K_k , описывающим неравномерность мощности ТВЭЛ в кассете.

По определению коэффициент неравномерности мощности в кассете равен:

$$K_{ki} = \frac{Q_{ki}^{\max}}{Q_k},$$

где Q_{ki}^{\max} , Q_k – максимальная и средняя мощность ТВЭЛ в данной кассете.

Появление микронеравномерности в основном связано с избыточным (по сравнению со средним в данном районе) замедлением нейтронов из-за локального повышения концентрации замедлителя нейтронов. Для активной зоны ВВЭР это выражается в наличии водяных зазоров

между кассетами. Эти конструкционные зазоры в 3 мм между чехлами ТВС необходимы для свободного извлечения (установки) кассет при перегрузке топлива. Теплоноситель (он же замедлитель), который проходит через эти зазоры, вызывает избыточное замедление и относительно малое поглощение нейтронов. Это значит, что на границе кассета-теплоноситель существует локальный всплеск тепловых нейтронов, а значит, и локальный всплеск энерговыделения на периферийных твэлах. Наибольшая неравномерность возникает в углах кассеты, где образуются наибольшие локальные скопления «избыточной» воды.

Неравномерность энерговыделения по твэлам внутри ТВС обусловлена также влиянием соседних ТВС, имеющих иное обогащение или выгорание.

Особенно высока энергонапряженность твэлов в ТВС, расположенных на границе активной зоны, поскольку они одной или несколькими гранями обращены к воде. Наличие достаточно больших концентраций бора в теплоносителе в начальный период работы между перегрузками снижает величину всплеска потока нейтронов у периферии активной зоны. Для того, чтобы еще более снизить энергонапряженность твэлов периферийных ТВС, в конструкцию всех ВВЭР введен так называемый «граненый пояс», обеспечивающий достаточное поглощение тепловых нейтронов вблизи границы крайнего ряда рабочих кассет. Ухудшение свойств отражателя, связанное с установкой граненого пояса, приводит к сокращению кампании реактора на 2 %. При отсутствии граненого пояса тепловая мощность реактора в значительной степени ограничивается допустимой энергонапряженностью твэлов в периферийных ТВС.

Одним из возможных способов снижения микронеравномерности энерговыделения, вызванной вышеуказанными причинами, является профилирование свойств тепловыделяющих элементов в кассете. Уменьшение обогащения топлива в периферийных (и особенно в угловых) твэлах позволяет снизить максимум энерговыделения.

Применение твэлов 2-х обогащений позволяет снизить коэффициент неравномерности в кассете ВВЭР-440 на 7 %.

На данный момент, ввиду усложнения технологии изготовления и эксплуатации ТВС, признано экономически нецелесообразным применение на ВВЭР-440 рабочих кассет с профилированием твэлов. Эта мера реализована в активной зоне ВВЭР-1000, так как увеличение обогащения и размеров ТВС в нем приводит к еще большему увеличению коэффициента K_k .

На практике расчет коэффициента K_k производится на ЭВМ с использованием специальных прикладных программ. Расчет производится для каждого топливного цикла, и результат приводится в нейтронно-физических характеристиках кассет соответствующей топливной загрузки.

Как правило, в эксплуатации вместо коэффициента K_k чаще используют произведение коэффициентов $K_k \cdot K_q$, так как эта величина описывает неравномерность энерговыделения по твэлам ТВС с учетом неравномерности энерговыделения между самими ТВС. Таким образом, произведение $K_k \cdot K_q$ описывает макронеравномерность энерговыделения с наложенной на нее микронеравномерностью, что весьма важно при проведении расчета по определению допустимой тепловой мощности ЯР.

Согласно «Технологическому регламенту эксплуатации» значение $K_k \cdot K_q$ не должно превышать 1,75.

Коэффициент неравномерности энерговыделения по объему активной зоны

Неравномерность энерговыделения по объему активной зоны описывается соответствующим коэффициентом K_v , который определяется как:

$$K_v = K_{qi} * K_{Zi},$$

где K_{qi} – радиальный коэффициент неравномерности энерговыделения по активной зоне; K_{Zi} – коэффициент неравномерности энерговыделения по высоте активной зоны.

Согласно «Технологическому регламенту по эксплуатации» значение K_v не должно превышать 2,5.

На практике часто используется коэффициент неравномерности энерговыделения для локального теплового потока, который определяется как:

$$K_o = K_q * K_Z * K_K * K_{инж},$$

где K_q – учитывает неравномерность энерговыделения по кассетам; K_Z – учитывает неравномерность энерговыделения по высоте активной зоны; K_K – учитывает неравномерность энерговыделения по твэлам внутри ТВС (определяется расчетом на ЭВМ по специальной программе); $K_{инж}$ – учитывает запас на неточность инженерного расчета и технические допуски изготовления активной зоны (константа, равная 1,15).

Из формулы следует, что коэффициент K_o характеризует собой энерговыделение в одной, наиболее энергонапряженной точке активной зоны.

Аксиальный офсет

Для реакторов ВВЭР-1000 более существенны высотные ксеноновые колебания энерговыделения, радиальные быстро затухают. Оптимальное распределение по радиусу обеспечивается на стадии проектирования путем определенного расположения регулирующих органов и радиального профилирования активной зоны выбором топливной за-

грузки. Оперативное управление заключается в управлении интегральной мощностью и распределением энерговыделения по высоте активной зоны, которое принято описывать **аксиальным офсетом** распределения энерговыделения. **Аксиальный офсет равен процентному отношению разности мощностей верхней и нижней половин активной зоны к полной мощности:**

$$OFST = \frac{100(Q_{niz} - Q_{ver})}{Q_{sum}}$$

В настоящее время управление аксиальным офсетом ведется вручную, но имеются все предпосылки успешной автоматизации этого процесса. Основным способом обеспечивающий совместное управление мощностью реактора и аксиальным офсетом, заключается в перемещении групп рабочих органов с переменной величиной дистанции между ними (то есть относительным перемещением групп стержней). Движение групп стержней в одном направлении с неизменной дистанцией вносит необходимое изменение реактивности. Изменение дистанции влияет на офсет. Комбинируя оба вида перемещения групп стержней – с постоянной и переменной дистанцией – можно обеспечить одновременное управление мощностью и офсетом. При этом в работе будут участвовать только две группы стержней: группа автоматического управления мощностью и группа укороченных стержней для подавления ксеноновых колебаний. Изменение дистанции между группами стержней выполняет оператор вручную. Общую глубину погружения групп в активную зону оператор корректирует с помощью ручного борного регулирования.

Юркевичем Г.П. [16] предложен способ автоматического управления мощностью реактора ВВЭР, обеспечивающий одновременное регулирование интегральной мощности и распределения энерговыделения по активной зоне. На рис. 1.14 представлена структурная схема такой системы.

Сигналы датчиков ВРК поступают в устройство выбора органа регулирования (управляющего стержня) из зон управления с минимальным энергонапряжением и максимальным энергонапряжением. После выбора зон с наибольшим максимальным и минимальным энергонапряжением и выбора привода стержней, которые наиболее сильно влияют на изменение плотности нейтронного потока в этих зонах, подается сигнал на разрешение включения привода стержня автоматического управления мощностью. Если с блока превышения разности максимального и минимального энерговыделений БФ поступает сигнал на ввод отрицательной реактивности, то в зоне с максимальной энергонапряженностью приводится в действие стержень управления. Происходит снижение

энергонапряженности в зоне максимального энергонапряжения. Если с блока БФ поступает сигнал на ввод положительной реактивности, то включается привод стержня в зоне минимальной энергонапряженности.

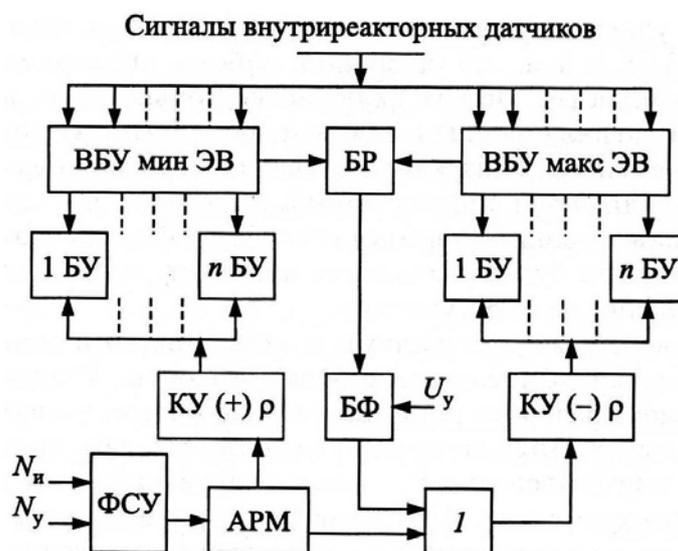


Рис. 1.14. Схема регулирования мощности и управления распределением энерговыделения активной зоны: ВБУ макс ЭВ – устройство выбора блока управления реактивностью на участке максимального энерговыделения; ВБУ мин ЭВ – устройство выбора блока управления реактивностью на участке минимального энерговыделения; БР – блок разности между максимальным и минимальным энерговыделением; БФ – блок формирования сигнала превышения разности между максимальным и минимальным энерговыделением над заданным значением U_y ; КУ (+) ρ – канал управления автоматического регулятора мощности (АРМ) введением положительной реактивности; КУ (-) ρ – канал управления АРМ введением отрицательной реактивности; 1 БУ – блок управления первым приводом органа изменения реактивности; n БУ – блок управления n-м приводом органа изменения реактивности; I – логическое устройство ИЛИ

Таким образом, в каждый момент времени включается на автоматическое управление только один привод, но действует он только в направлении выравнивания энергонапряженности активной зоны.

В рассмотренном способе регулирования мощности все стержни управления одновременно выполняют функции автоматического регулирования интегральной мощности и управление распределением энерговыделения и подавления ксеноновых колебаний.

Сигналы датчиков ВРК непосредственно не участвуют в регулировании мощности реактора, они осуществляют только выбор привода, которым будет управлять автоматический регулятор мощности. В про-

цессе регулирования интегральной мощности такой регулятор не ухудшает, а только способствует максимальному выравниванию распределения энерговыделения по объему активной зоны. Важным качеством данного способа является обеспечение автоматического перевода реактора с одного уровня мощности на другой без ухудшения распределения энерговыделения. Система адаптивна к любым видам и свойствам регулирующих органов и автоматически не допускает такого распределения энерговыделения, при котором поддержание офсета и заданного уровня мощности требует введения реактивности разного знака.

Если по каким-либо причинам система не позволяет добиться хорошей точности поддержания аксиального офсета, то можно применить регулятор офсета с помощью укороченных стержней, перемещаемых от верха до низа активной зоны с помощью автоматического привода. Укороченный стержень не выходит за пределы активной зоны, находится всегда в центре реактора, поэтому на регулирование интегральной мощности практически не влияет.

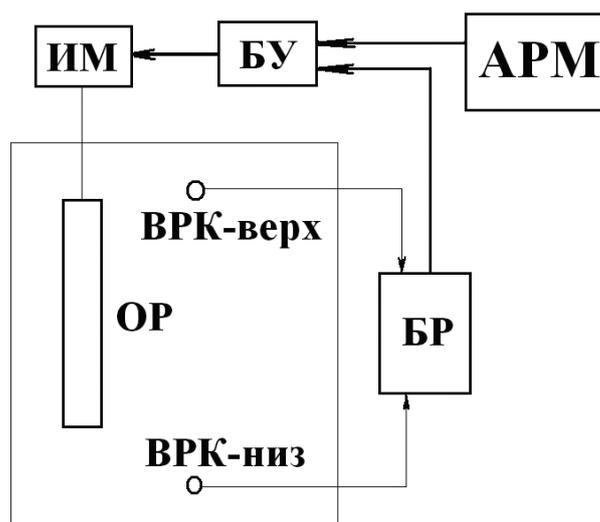


Рис. 1.15. Схема автоматического поддержания аксиального офсета

Управление исполнительным механизмом ИМ укороченного стержня осуществляется по разности сигналов верхнего и нижнего ВРК-датчиков, поступающих на блок разности БР. Исполнительный механизм перемещает стержень в сторону того детектора, у которого сигнал превышает сигнал другого детектора.

При работе автоматического регулятора мощности по прямому назначению по его сигналу выдается запрещение на управление механизмом укороченного органа. Это необходимо для предотвращения одновременной работы обоих регуляторов, что может привести к возникновению колебаний в канале регулирования мощности. Изменение

параметров ВРК –детекторов не влияет на управление автоматическим регулятором мощности, однако изменение чувствительности детекторов влияет на величину разброса распределения энерговыделения. Поэтому необходимо, чтобы все сигналы с детекторов, поступающие в устройство определения значения энерговыделения, имели одинаковые масштабы по отношению к плотности нейтронов. Это можно сделать на этапе комплектации детекторов с предварительными усилителями сигналов с датчиков. До поставки на объект выходные сигналы усилителей нормируются по величине и спектру нейтронного потока.

1.2. Система автоматического управления мощностью реактора РБМК

Система автоматического управления мощностью реактора РБМК является в настоящее время единственной в России системой многосвязного регулирования мощности, работающей в постоянной промышленной эксплуатации. Наряду с управлением средней мощностью реактора в ее задачи входит и управление распределением мощности по радиусу активной зоны. Выравнивание распределения потока по высоте активной зоны производится вручную с помощью укороченных поглощающих стержней, входящих в активную зону снизу. Поскольку по принципу организации эта система является МОСАР без функционального разделения сепаратных каналов, рассмотрим коротко ее структуру и возможности.

В связи с необходимостью автоматического регулирования распределения мощности по радиусу активной зоны, структура системы управления реактором РБМК является наиболее сложной из СУЗ всех отечественных реакторов. Фактически алгоритм управления требует реализации системы в трех режимах:

- автоматическое регулирование баковое суммарное (АРБС),
- автоматическое регулирование баковое локальное (АРБЛ),
- автоматическое регулирование выравнивающее (АРВ).

Так как имеются существенные различия в структуре СУЗ различных реакторных блоков РБМК, то дальнейшее изложение соответствует структуре СУЗ 3-й очереди Смоленской АЭС.

Регулятор АРБС является регулятором разогрева активной зоны и работает в диапазоне мощностей $(0.3 \div 10(20) \% N_{\text{НОМ}})$. Управляющий сигнал вырабатывается усреднением показаний четырех боковых ионизационных камер, находящихся в баке водяной защиты реактора. Этот сигнал подается на привод, перемещающий синхронно четыре стержня, равномерно распределенные по активной зоне. В работе участвует только одна группа из 4-х стержней. Другая такая же группа находится в горячем резерве и включается сразу же при отказе первой. Датчики и

стержни двух групп чередуются. Точность регулирования мощности в режиме АРБС не превышает 5 % от установленного уровня.

Регулятор АРБЛ является первым выравнивающим регулятором системы в диапазоне мощностей от 5 до 100 % $N_{\text{ном}}$. Точность регулирования составляет 1 % от установленного уровня. Здесь в работе участвуют 8 локальных регуляторов (ЛАР) обеих групп, выведенных из синхронизма. Управляющий сигнал вырабатывается по показаниям датчика в баке водяной защиты, расположенного напротив стержня. Таким образом вместо системы регулирования интегральной мощности, усредненной по объему активной зоны, мы имеем здесь многосвязную систему регулирования реактора, реализованную по алгоритму зонного регулирования. Систем состоит из восьми идентичных замкнутых контуров регулирования, осуществляющих и регулирование средней мощности реактора и регулирование распределения мощности по радиусу реактора.

Второй выравнивающий режим АРВ является дублирующим для АРБЛ. Регуляторы АРВ и АРБЛ взаимно резервируют друг друга, при работе одного из них, второй находится в «горячем» резерве и автоматически включается при неисправности первого.

В режиме АРВ управляющий сигнал на каждый локальный регулятор ЛАР вырабатывается от четырех внутриреакторных датчиков, расположенных в зоне управления вокруг стержня. В этом режиме в работе участвуют все девять локальных регуляторов – восемь периферийных и один центральный. Регулятор АРВ работает в диапазоне мощностей от 10 % до 100 % $N_{\text{ном}}$. Точность регулирования так же, как при АРБЛ – 1 % $N_{\text{ном}}$.

СУЗ обеспечивает оператору возможность ручного управления всеми стержнями, при этом скорость ввода стержней – 0.4 м/с, скорость вывода стержней из зоны – 0.4 м/с, а для стержней АР – 0.2 м/с.

При полном обесточивании СУЗ гарантируется полное заглушение реактора путем ввода всех стержней СУЗ (кроме УСП) в активную зону из любого промежуточного положения до нижних концевых выключателей.

Контроль нейтронного потока при «холодном» пуске реактора в диапазоне $10^{-12} \div 5 \cdot 10^{-8} N_{\text{ном}}$ осуществляется четырьмя каналами контроля скорости счета с подвесками камер деления КНТ-31, расположенных в каналах отражателя.

Контроль нейтронного потока в логарифмическом масштабе в диапазоне от $5 \cdot 10^{-10}$ до $10^{-4} N_{\text{ном}}$ осуществляется тремя каналами контроля скорости счета с подвесками камер деления КНК-15, расположенными в каналах БИК.

Контроль нейтронного потока в логарифмическом масштабе в диапазоне $10^{-8} \div (5 \cdot 10^{-2} \div 10^{-1}) N_{\text{ном}}$ осуществляется 4-мя каналами с подвесками камер КНК-56, расположенными в баке водяной защиты (в кана-

лах со свинцом). Кроме того, данными каналами осуществляется контроль за периодом разгона реактора в диапазоне от 120 до 18 с.

Контроль за периодом разгона реактора в пределах от 120 до 18 с.

в диапазоне мощности $(5 \cdot 10^{-3} \div 10^{-2}) \div 1.25 N_{\text{ном}}$ осуществляется тремя каналами, в каждом из которых суммируется информация от четырех подвесок с камерами КНК-56 и КНК-53М.

Контроль нейтронного потока в линейном масштабе в диапазоне $10^{-7} \div 1.25 N_{\text{ном}}$ осуществляется 4-мя каналами БИК КНК-53М с помощью реактиметра и подключенного к реактиметру самописца мощности.

Регулирование нейтронной мощности реактора в диапазоне от 0.3 до 10 % $N_{\text{ном}}$ осуществляется в режиме АРБС по суммарному сигналу группы из четырех каналов БИК с КНК-53М.

Регулирование нейтронной мощности реактора в диапазоне от 5 до 100 % $N_{\text{ном}}$ осуществляется в режиме АРБЛ по локальному принципу по информации от восьми каналов БИК с КНК-53М.

Регулирование нейтронной мощности и стабилизация заданного распределения радиального поля энерговыделения реактора в диапазоне от 10 до 100 % $N_{\text{ном}}$ осуществляется девятью локальными регуляторами по сигналам девяти групп (в каждой по 4 датчика) внутризонных датчиков, расположенных в топливных технологических каналах.

Как указывалось выше, возможности управления распределением потока в этой системе ограничиваются только режимом стабилизации формы распределения.

ГЛАВА 2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МНОГОМЕРНОГО УПРАВЛЯЕМОГО ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА

Многогрупповые диффузионные приближения уравнения Больцмана описывающие кинетику ядерного реактора, в частности двухгрупповое приближение, используемое в большинстве практических случаев, мало пригодны для получения динамических характеристик многомерного управляемого реактора. Поэтому уравнение динамики нейтронного поля обычно получают, используя одногрупповое уравнение диффузии [3]. Несмотря на то, что эта модель дает неверные результаты вблизи границы реактора с отражателем, ею широко пользуются для оценки распределения потока нейтронов в переходных и стационарных состояниях. Такое приближение оказывается вполне приемлемым для исследования систем управления нейтронным полем, поскольку оно позволяет получать пространственно-зависимые динамические характеристики, в частности пространственно-зависимые передаточные функции и передаточные матрицы реактора, используемые при проектировании системы управления нейтронным полем.

2.1. Одногрупповая модель кинетики реактора

Для вывода пространственно-зависимых уравнений нейтронного поля достаточно хорошей точностью обладает одногрупповая диффузионная модель:

$$M^2 \nabla^2 \Phi(r, t) - \Phi(r, t) [1 - (1 - \beta) K_\infty] + \frac{1}{\Sigma_a} \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i(r, t) = l \frac{\partial \Phi(r, t)}{\partial t}; \quad (2-1)$$

$$\frac{\partial C_i(r, t)}{\partial t} = \beta_i K_\infty \Sigma_a \Phi(r, t) - \lambda_i C_i(r, t), \quad (2-2)$$

где M^2 – площадь миграции нейтронов; λ_i и C_i – параметры групп запаздывающих нейтронов; $l = \frac{1}{\nu \Sigma_a}$ – время жизни нейтронов; Σ_a – макроскопическое сечение поглощения нейтронов.

Применим ее для составления баланса нейтронов в произвольном объеме активной зоны V [4]. Пусть плотность нейтронов в точке с координатами \bar{r} составляет $N(t, \bar{r})$, а количество нейтронов в объеме V равно $\int N(t, \bar{r}) d\bar{r}$. Тогда скорость изменения во времени количества

нейтронов в объеме V равна: $\frac{\partial}{\partial(t)} \int_{\nu} N(t, \bar{r}) d\bar{r}$. Это изменение количе-

ства нейтронов состоит из следующих частей [3]:

1. Часть нейтронов уходит из объема V через его поверхность S . Этот поток пропорционален градиенту плотности нейтронов. Через 1 см^2 поверхности уходит $D * \text{grad}N(t, \bar{r})$ нейтронов, а скорость этого изменения в объеме V равна: $D * \int_S \text{grad}N(t, \bar{r}) dS$.

По теореме Остроградского-Гаусса этот поверхностный интеграл можно заменить на объемный:

$$D * \int_S \text{grad}N(t, \bar{r}) dS = D * \int_{\nu} \nabla^2 N(t, \bar{r}) d\bar{r},$$

где $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial(t)^2} + \frac{\partial^2}{\partial(t)^2} + \frac{\partial^2}{\partial(t)^2}$ – лапласиан.

2. Часть нейтронов поглощается в объеме V . Если время жизни нейтронов обозначить l , то скорость этого поглощения равна:

$$\frac{1}{l} * \int_{\nu} N(t, \bar{r}) d\bar{r}.$$

3. Вследствие деления в объеме V рождается $K(t, \bar{r})$ нейтронов. Скорость размножения нейтронов равна:

$$\frac{K}{l} * \int_{\nu} N(t, \bar{r}) d\bar{r}.$$

4. Часть нейтронов деления в данный момент времени еще находится в связанном состоянии и должна быть вычтена из общего баланса. Так как общий выход этих запаздывающих нейтронов равен β , то эта скорость составляет:

$$\frac{\beta * K}{l} \int_{\nu} N(t, \bar{r}) d\bar{r}.$$

5. Учтем 6 групп ядер-излучателей запаздывающих нейтронов, образовавшихся в предшествующий момент. Общее число этих ядер в объеме V равно:

$$\int_{\nu} \sum_i C_i(t, \bar{r}) d\bar{r}.$$

Уравнение радиоактивного распада этих ядер имеет вид:

$$\frac{\partial}{\partial(t)} C_i(t, \bar{r}) = -\lambda_i C_i(t, \bar{r}).$$

Поэтому скорость испускания запаздывающих нейтронов ядрами-излучателями равна:

$$\int_{\nu} \sum_i \lambda_i C_i(t, \bar{r}) d\bar{r}.$$

Таким образом, для объема V получаем уравнение баланса нейтронов в виде:

$$\frac{\partial}{\partial(t)} \int_{\nu} N d\bar{r} = D * \int_{\nu} \nabla^2 N d\bar{r} - \frac{1}{l} \int_{\nu} N d\bar{r} + \frac{K}{l} * \int_{\nu} N d\bar{r} - \frac{\beta * K}{l} * \int_{\nu} N d\bar{r} + \int_{\nu} \sum_i \lambda_i C_i d\bar{r}.$$

Так как равенство справедливо для любых объемов, то равны и подинтегральные выражения для плотностей потока в единице объема:

$$\frac{\partial}{\partial(t)} N = \frac{K-1}{l} * N - \frac{\beta * K}{l} * N + D * \nabla^2 N + \sum_i \lambda_i C_i;$$

$$\frac{\partial}{\partial(t)} C_i = \frac{K * \beta_i}{l} * N - \lambda_i C_i.$$

Выделяя из последнего уравнения $\lambda_i C_i$ и подставляя в первое уравнение, получаем:

$$l \frac{\partial}{\partial(t)} N = (K-1) N + M^2 \nabla^2 N - l \sum_i \frac{\partial}{\partial(t)} C_i; \quad (2-3)$$

$$l \frac{\partial}{\partial(t)} C_i = K * \beta_i N - l * \lambda_i C_i, \quad (2-4)$$

где $M^2 = l * D$ – площадь миграции нейтронов.

Уравнение стационарного нейтронного поля получаем из (2-1), приравнивая нулю все производные по времени:

$$\nabla^2 N(\bar{r}) + \frac{K-1}{M^2} N(\bar{r}) = 0, \quad (2-5)$$

где $\frac{K-1}{M^2} = B^2$ – материальный параметр, который определяет форму распределения потока в критическом реакторе.

Линеаризация уравнения динамики нейтронного поля

Уравнения нейтронного поля в одногрупповом приближении являются нелинейными, поэтому для получения динамических характеристик реактора они еще непригодны. Прежде, чем приступить к их линеаризации, сделаем следующее замечание. Первое уравнение нейтронного поля является пространственно-зависимым, а второе – точечным, то есть переменные C_i считаются одинаково изменяющимися во всех точках пространства. Поэтому коэффициент размножения K можно принять равным единице. Действительно, для точечного реактора конечных размеров переход к эффективному времени жизни нейтронов дает:

$$l = \frac{l^*}{K},$$

тогда

$$\frac{\partial}{\partial(t)} C_i = \frac{\beta_i}{l^*} N - \lambda_i C_i. \quad (2-6)$$

Так как K близок к единице, то замена l на l^* больших ошибок не вызовет. Поэтому второе уравнение нейтронного поля можно оставить в виде (2-4).

Линеаризуем уравнения методом малых отклонений. Вводим переменные в виде: $K = K_0 + \delta K$; $N = N_0 + \delta N$; $C_i = C_{i0} + \delta C_i$; и подставляем в уравнения поля:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial(t)} (N_0 + \delta N) &= \frac{K_0}{l} N_0 + \frac{\delta K}{l} N_0 - \frac{1}{l} N_0 + \frac{K_0}{l} \delta N + \frac{\delta K}{l} \delta N - \frac{1}{l} \delta N + \\ &+ \frac{M^2}{l} \nabla^2 (N_0 + \delta N) - \sum_i \frac{\partial}{\partial(t)} (C_{i0} + \delta C_i); \\ \frac{\partial}{\partial(t)} (C_{i0} + \delta C_i) &= \frac{\beta_i}{l} N_0 + \frac{\beta_i}{l} \delta N - \lambda_i (C_{i0} + \delta C_i). \end{aligned} \quad (2-7)$$

Исключаем члены стационарного состояния:

$$\frac{\partial}{\partial(t)} N_0 \equiv 0 = \frac{K_0}{l} N_0 - \frac{1}{l} N_0 + \frac{M^2}{l} \nabla^2 N_0 - \sum_i \frac{\partial}{\partial(t)} C_{i0};$$

$$\frac{\partial}{\partial(t)} C_{i0} \equiv 0 = \frac{\beta_i}{l} N_0 - \lambda_i C_{i0}$$

и окончательно получаем линеаризованные уравнения нейтронного поля:

$$\frac{\partial}{\partial(t)} \delta N = \frac{\delta K}{l} N_0 + \frac{K_0 - 1}{l} \delta N + \frac{M^2}{l} \nabla^2 \delta N - \sum_i \frac{\partial}{\partial(t)} \delta C_i; \quad (2-8)$$

$$\frac{\partial}{\partial(t)} \delta C_i = \frac{\beta_i}{l} \delta N - \lambda_i \delta C_i. \quad (2-9)$$

Решая уравнения (2-8) и (2-9) методом разложения по собственным функциям, можно получить пространственно-зависимые передаточные функции реактора и элементы передаточной матрицы многомерного управляемого реактора.

Решение уравнения нейтронного поля методом гармоник

Решаем уравнения (2-8) и (2-9) методом разложения по собственным функциям. В качестве возмущаемых функций берем собственные функции волнового уравнения реактора:

$$\nabla^2 \psi_j + B^2 \psi_j + \mu_j^2 \psi_j = 0; \quad j = 0, 1, 2, \dots, \infty, \quad (2-10)$$

где ψ_j – собственные функции (гармоники); μ_j – собственные числа.

Собственные функции одномерного реактора представляют собой гармоники вида:

$$\psi_j(z) = \sqrt{\frac{2}{H}} \text{Sin}(j+1) \frac{\pi * z}{H}, \quad (2-11)$$

где H – ширина пластины бесконечной длины, а собственные числа можно вычислить по формуле:

$$\mu_j^2 = \left[(j+1)^2 - 1 \right] * \frac{\pi^2}{H^2}. \quad (2-12)$$

Для цилиндрического реактора собственные функции вычисляются гораздо сложнее, они представляют собой произведения функции Бесселя (по радиусу) и двух гармоник (по высоте и азимуту). Эти функции и их собственные числа обычно имеются в справочных таблицах. Собственные функции обладают свойством ортогональности и нормировки на единицу, т. е.

$$\int_V \psi_j(\vec{r})^* \psi_n(\vec{r}) dr = \begin{cases} 0 & \text{если } j \neq n \\ 1 & \text{если } j = n \end{cases} \quad (2-13)$$

В общем случае собственные функции определяются на ЭВМ. Однако для стационарных распределений, выровненных по радиусу и высоте, они приближаются к гармоникам одномерного реактора и ими можно пользоваться для анализа распределений потока вплоть до 50 % степени выравнивания [4].

Поскольку весь бесконечный ряд гармоник не участвует в решении, а используются лишь первые номера гармоник, поясним картину возмущения нейтронного поля по радиусу для первых номеров гармоник (рис. 2.01).

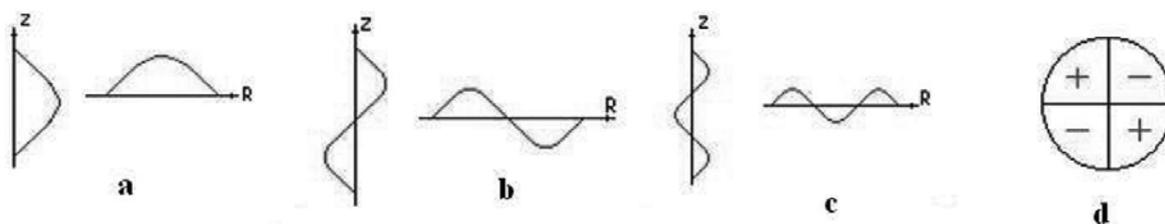


Рис. 2.01. Первые гармоники распределения нейтронного потока по высоте и радиусу активной зоны

Невозмущенное распределение потока по оси или по радиусу представляет собой полупериод колебаний на высоту или диаметр активной зоны соответственно и носит название соответственно нулевой высотной или нулевой азимутальной гармоники. Возмущения потока по высоте с противоположными по знаку отклонениями от равномерного распределения вверху и внизу активной зоны носят названия первой высотной гармоники. Возмущения потока по первой азимутальной гармонике дают ту же картину по радиусу активной зоны. Возмущения по второй азимутальной гармонике дают перемежающиеся по знаку отклонения потока по квадрантам. Возмущения по третьей азимутальной гармонике (или по второй высотной) дают противоположные по знаку отклонения в центре и на периферии и т. д. [5]

Передаточная функция реактора по гармоникам

Найдем решение уравнений (2-8) и (2-9) нейтронного поля как отношение возмущений нейтронного потока j -й гармоники к изменению коэффициента размножения по j -й гармонике.

Для этого переменные уравнений (2-8)–(2-9) представим в виде бесконечного ряда гармоник:

$$\delta N(t, \bar{r}) = \sum_{n=1}^{\infty} \delta N_n(t) * \psi_n(\bar{r}); \quad (2-14)$$

$$\delta K(t, \bar{r}) = \sum_{n=1}^{\infty} \delta K_n(t) * \psi(\bar{r});$$

$$\delta C_i(t, \bar{r}) = \sum_{n=1}^{\infty} \delta C_i(t) * \psi_n(\bar{r}).$$

Далее проводим следующие преобразования:

1. Переменные (2-14) подставляем в уравнения (2-8)–(2-9).
2. Проводим замену: $\nabla^2 \psi_n + \frac{\delta K - 1}{M^2} \psi_n = -\mu_n^2 \psi_n$ (на основании (2-10)).
3. Умножаем все члены уравнений на ψ_j и интегрируем по объему реактора, учитывая свойство ортогональности (2-13).
4. Преобразуем уравнения по Лапласу.

В результате получаем систему уравнений вида:

$$p \delta N_j(p) = \frac{\bar{N}}{l} \delta K_j(p) - \frac{M^2 \mu_j^2}{l} \delta N_j(p) - p \sum_{i=1}^6 \delta C_{ij}(p); \quad (2-15)$$

$$p \delta C_{ij}(p) = \frac{\beta_i}{l} \delta N_j(p) - \lambda_i \delta C_{ij}(p).$$

Здесь $\bar{N} = \int_v N_0(\bar{r}) * \psi_j^2(\bar{r}) dr$ – среднее значение начальной, невозмущенной плотности потока.

Из второго уравнения находим: $\delta C_{ij}(p) = \frac{\beta_i \delta N_j(p)}{l(p + \lambda_i)}$ и подставляем в первое уравнение:

$$p\delta N_j(p) = \frac{\bar{N}}{l} \delta K_j(p) - \frac{M^2 \mu_j^2}{l} \delta N_j(p) - \frac{p}{l} \sum_i \frac{\beta_i}{p + \lambda_i} \delta N_j(p).$$

Отсюда находим передаточную функцию реактора для j -й гармоники:

$$W_j(p) = \frac{\delta N_j}{\delta K_j}(p) = \frac{\bar{N}}{l} \left\{ \frac{1}{p \left[1 + \sum_i \frac{\beta_i}{l(p + \lambda_i)} \right] + \frac{M^2 \mu_j^2}{l}} \right\}. \quad (2-16)$$

Часто ее записывают в безразмерном виде, имея в виду коэффициент передачи:

$$\frac{\delta N_j / \bar{N}}{\delta K_j / \beta}(p) = \frac{\beta}{M^2 \mu_j^2} \left\{ \frac{1}{\frac{l}{M^2 \mu_j^2} p \left[1 + \sum_i \frac{\beta_i}{l(p + \lambda_i)} \right] + 1} \right\}.$$

Для нулевой гармоники ($\mu_j = 0, j = 0$) получаем:

$$W_0(p) = \frac{\delta N / \bar{N}}{\delta K_0 / \beta} = \frac{\beta}{lp \left[1 + \sum_i \frac{\beta_i}{l(p + \lambda_i)} \right]}, \quad (2-17)$$

то есть передаточную функцию реактора в точечном приближении.

Можно записать ее для реактора с одной усредненной группой запаздывающих нейтронов:

$$W_j(p) = \frac{\beta}{\mu_j^2 M^2} * \frac{\frac{1}{\lambda} p + 1}{\frac{l}{\mu_j^2 M^2} p^2 + \left(\frac{\beta}{\lambda \mu_j^2 M^2} + \frac{1}{\lambda} \right) p + 1}.$$

Или, расписав знаменатель через сомножители:

$$W_j(p) = \frac{\beta}{\mu_j^2 M^2} * \frac{(T_0 p + 1)}{\left(T_j' p + 1\right) * \left(T_j'' p + 1\right)}, \quad (2-18)$$

где постоянные времени равны:

$$T_0 = \frac{1}{\lambda}; \quad T_j' = \frac{l}{\beta + \mu_j^2 M^2}; \quad T_j'' = \frac{1}{\lambda} \left(1 + \frac{\beta}{\mu_j^2 M^2}\right).$$

Обратим внимание, что для всех гармоник, кроме нулевой, передаточная функция является статической.

Величина $\mu_j^2 M^2$ соответствует относительной утечке нейтронов из реактора для j -й гармоники и зависит от соотношения между размерами реактора – диаметром и длиной миграции нейтронов, так как μ_j^2 обратно пропорционально квадрату геометрического размера активной зоны – D . В случае малых реакторов, у которых $\left(\frac{D}{M}\right)^2 < 100$, для любых j можно пренебречь величиной β по сравнению с утечкой $\mu_j^2 M^2$. Для больших реакторов $\left(\frac{D}{M}\right)^2 > 100$, и это пренебрежение справедливо, начиная с третьей гармоники ($j=3$). Тогда для высших гармоник ($j>3$) передаточная функция (2-13) упрощается:

$$W_j(p) \approx \frac{\beta}{\mu_j^2 M^2} * \frac{1}{\frac{l}{\mu_j^2 M^2} p + 1}. \quad (2-19)$$

Очевидно, что эта передаточная функция отражает высокочастотные процессы в перераспределении потока в предположении, что отсутствует эффект запаздывающих нейтронов.

Реакция нейтронного потока на локальные возмущения реактивности вычисляется суммированием всех гармоник. Так как с ростом индекса гармоники коэффициент ее усиления быстро уменьшается, то обычно достаточно учитывать первые две-три гармоники.

Анализ полученных передаточных функций позволяет представить некоторую качественную картину пространственной кинетики ре-

актора. При локальном введении реактивности вначале происходит быстрое перераспределение потока за счет высших гармоник в течение (3-5) постоянных времени передаточной функции (19), что составляет доли секунды. Дальнейшее изменение потока в каждой точке активной зоны происходит по законам точечной кинетики с установившейся формой распределения.

Передаточная матрица реактора по гармоникам

Используем теперь методы пространственной кинетики реактора для построения его математической модели, пригодной для проектирования системы управления нейтронным полем.

При управлении нейтронным полем реактор необходимо рассматривать как многосвязный объект, состоящий из большого числа зон управления, каждая из которых описывается своей передаточной функцией. Кроме этого необходимо учитывать передаточные функции взаимной связи между зонами управления. Весь этот комплекс передаточных функций образует передаточную матрицу реактора $\overline{H}(p)$:

$$\overline{H}(p) = \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} & \dots & H_{1n} \\ H_{21} & H_{22} & \dots & H_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ H_{n1} & H_{n2} & \dots & H_{nn} \end{bmatrix}. \quad (2-20)$$

Она связывает вектор выходных отклонений нейтронного потока от базового значения с вектором входных изменений коэффициента размножения в зонах управления.

Элементы матрицы $\overline{H}_{ij}(p)$ можно рассчитать, используя численные методы расчета уравнений пространственной кинетики для каждой выделенной зоны управления. Однако численное решение этой задачи сложно и требует больших затрат машинного времени. Трудность здесь в том, что уравнения пространственной кинетики реактора являются жесткими уравнениями [29], решение которых представляет собой сумму экспонент с большим разбросом показателей этих экспонент. Мгновенные нейтроны практически мгновенно воздействуют на поток в окружающих областях, а действие запаздывающих нейтронов более продолжительно. Поэтому программы расчета должны иметь очень малый шаг дискретизации по времени для точного расчета поведения мгновенных нейтронов и большой общий временной интервал

решения для учета эффектов, вызванных запаздывающими нейтронами. Точность этих методов зависит от числа выбранных зон управления. Методов численного расчета пространственно-временных уравнений реактора сейчас существует достаточно много [3], но все они нуждаются в доработке для использования их в настройке систем автоматического управления нейтронным полем. Поэтому понятен интерес к аналитическому решению этой задачи. Получим элементы передаточной матрицы реактора, используя решение уравнений нейтронного поля методом гармоник.

Снова разложим в ряд переменные N и K по системе ортонормированных собственных функций, только основную гармонику выделим отдельно из ряда:

$$N = N_0(p) * \psi_0(r) + \sum_{j=1}^{\infty} N_j(p) * \psi_j(r); \quad (2-21)$$

$$K = K_0(p) * \psi_0(r) + \sum_{j=1}^{\infty} K_j(p) * \psi_j(r).$$

Проведем все те же преобразования, что мы делали для получения пространственной передаточной функции реактора.

Теперь допустим, что в какой-то зоне управления m произошло изменение коэффициента размножения на величину K_m . Тогда, заменяя в выражении (2-21) пространственную координату r на соответствующие индексы зон управления, найдем ответное изменение потока в соседней зоне управления i , учитывая определение передаточной функции:

$$N_i(p) = \bar{N} * W_0(p) * K_{0m} * \psi_{0i} + \sum_{j=1}^{\infty} \bar{N} * W_j(p) * K_{jm} * \psi_{ji}, \quad (2-22)$$

где $K_{0m} = K_m(p) * \psi_{0m} * \psi_{0m} * V_m$ – амплитуда нулевой гармоники реактивности, возбужденной в зоне m от локального изменения $K_m(p)$;

$K_{jm} = K_m(p) * \psi_{0m} * \psi_{jm} * V_m$ – амплитуда j -й гармоники реактивности в зоне m ; ψ_{ji} и ψ_{0i} – собственные функции j -й и нулевой гармоники

в зоне i ; V_m – объем m -й зоны управления; $\bar{N} = \frac{N_0}{\psi_0}(r)$ – среднее значение амплитуды основной гармоники;

Учитывая значения K_{jm} и K_{0m} , перепишем (2-22) в виде:

$$N_i(p) = \frac{N_{0i}}{\psi_{0i}} * W_0(p) * K_m * \psi_{0m}^2 * V_m * \psi_{0i} + \\ + \sum_{j=1}^{\infty} \frac{N_{0m}}{\psi_{0m}} * W_j(p) * K_m * \psi_{jm} * \psi_{0m} * V_m * \psi_{ji}.$$

Тогда элемент $H_{im}(p)$ передаточной матрицы может быть представлен в виде:

$$H_{im}(p) = \frac{N_i}{K_m}(p) = \\ = N_{0i} W_0(p) \psi_{0m}^2 V_m + \sum_{j=1}^{\infty} N_{0m} W_j(p) \psi_{ji} \psi_{jm} V_m. \quad (2-23)$$

Можно записать (2-23) в безразмерном виде, поделив его на $\delta K_m = K_m \psi_{0m}^2 V_m$ и заменяя $\frac{N_{0m}}{N_{0i}} = \frac{\psi_{0m}}{\psi_{0i}}$:

$$H_{im}(p) = \frac{N_i / N_{0i}}{\delta K_m / \beta}(p) = W_0(p) + \sum_{j=1}^{\infty} \frac{\psi_{ji} * \psi_{jm}}{\psi_{0i} * \psi_{0m}} W_j(p). \quad (2-24)$$

Выражение (2-24) определяет все элементы матрицы $\bar{H}(p)$.

Виды адиабатических матриц реактора

Таким образом, передаточная матрица реактора может быть представлена в общем виде как матричный ряд:

$$\bar{H}(p) = \bar{A}_0 * W_0(p) + \sum_{j=1}^{\infty} \bar{A}_j W_j(p). \quad (2-24)$$

Если все датчики и регулирующие стержни расположены в области с выровненным потоком и все зоны управления идентичны, то есть $N_{0i} = N_{0m}$; и $\psi_{0m} = \psi_{0i}$, то матрица реактора является симметричной и $H_{im}(p) = H_{mi}(p)$. На практике этот случай имеет место при регулировании радиального распределения.

Изложенный метод получил название адиабатического, а передаточная матрица типа (2-24) – адиабатической матрицы [4].

Практически используются несколько видов адиабатических моделей. Рассмотрим их в порядке возрастания их точности.

1. Нулевая адиабатическая модель:

$$\bar{H}(p) \approx \bar{H}_0(p) = \bar{A}_0 * W_0(p). \quad (2-25)$$

Все элементы матрицы интегральной мощности \bar{A}_0 равны единице, а матрица распределения мощности вообще не учитывается.

2. Первая адиабатическая модель:

$$\bar{H}(p) \approx \bar{H}_1(p) = \left(\overline{A_0 + A^1} \right) * W_0(p). \quad (2-26)$$

где $\overline{A^1} = \sum_{j=1}^{\infty} A_j$ – матрица формы распределения; $\left(\overline{A_0 + A^1} \right)$ – статическая числовая матрица.

Эта модель хорошо описывает установившееся значение распределения мощности, динамика же изменения профиля поля описывается поведением нулевой гармоники.

3. Вторая адиабатическая модель:

$$\bar{H}(p) \approx \bar{H}_2(p) = \bar{A}_0 * W_0(p) + \overline{A^1}. \quad (2-27)$$

Эта модель учитывает тот факт, что перераспределение мощности происходит практически мгновенно по сравнению со временем регулирования.

4. Третья адиабатическая модель:

$$\bar{H}(p) \approx \bar{H}_3(p) = \bar{A}_0 * W_0(p) + \overline{A^1} * W_1(p); \quad (2-28)$$

используется для реакторов с неустойчивым распределением по первой гармонике. Здесь $W_1(p)$ – передаточная функция реактора по первой гармонике.

5. Наиболее точная четвертая адиабатическая модель:

$$\bar{H}(p) \approx \bar{H}_4(p) = \bar{A}_0 * W_0(p) + \overline{A^1} * W_1(p) + \sum_{j=2}^{\infty} A_j. \quad (2-29)$$

Во всех этих моделях видно стремление упростить вычисление матрицы формы распределения потока $\overline{\sum_{j=1}^{\infty} A_j}$ и обойтись учетом меньшего количества гармоник.

Практически важно то, что матрицы $\overline{A_0}$ и $\overline{\sum_{j=1}^{\infty} A_j}$ можно определить на работающем реакторе достаточно оперативно. В определенной зоне управления производится единичное перемещение стержня и отклик на него регистрируется датчиками внутриреакторного контроля, установленными в технологических каналах реактора на различном удалении от точки возмущения. Если при этом опыте регулятор интегральной мощности реактора отключен, то мы находим элементы матрицы $\overline{A_0}$, а если регулятор не отключать, то получим элементы матрицы $\overline{\sum_{j=1}^{\infty} A_j}$.

2.2. Конечно-разностные модели кинетики многомерного ядерного реактора

В задачах теории поля рассматриваются объекты, описываемые уравнениями в частных производных. В зависимости от характера поля вид уравнения различный [6].

Поля, не имеющие внутри источников и стоков потенциала, описываются уравнением Лапласа:

$$\nabla^2 \varphi = 0 \text{ или } k_1 \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + k_2 \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + k_3 \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = 0.$$

Поля, имеющие внутри стоки потенциала, описываются уравнением Поккельса: $\nabla^2 \varphi = k * \varphi$;

Поля с притоком потенциала извне описывают уравнением Пуассона:

$$\nabla^2 \varphi = -k * \varphi.$$

Поля с запасенными внутри источниками потенциала описывают уравнением Фурье: $\nabla^2 \varphi = k * \frac{\partial \varphi}{\partial t}$.

Хорошо известны методы решения этих уравнений методами конечных разностей или конечных элементов. Однако решение этими способами уравнений полей сложной геометрии даже для быстродействующих ЭВМ представляет собой сложную задачу, которая не может быть решена в реальном времени при высоком требовании к точности решения.

А между тем практика ищет модели и методы решения реального времени, на которых можно было бы отлаживать алгоритмы систем управления этими полями.

Такая ситуация сложилась в атомной энергетике при разработке систем управления реактора РБМК, первого большого отечественного реактора. Так как физическое моделирование такого сложного реактора представляется неэкономичным, то требуются модели реактора, работающие с достаточной точностью в реальном времени, пригодные и для лабораторной отладки систем управления и для создания тренажеров реального времени для обучения персонала управления.

В США интерес к таким моделям проявляли с построением первых реакторов. Известны модели, построенные по методу электрических сеток, которые позволяли получать стационарное распределение потока нейтронов в сечении активной зоны [7]. В России первый патент на сеточную модель ядерного реактора получила кафедра ЭАФУ ФТФ Томского политехнического института в 1962 г. [8]. Эта модель, в отличие от американской, уже позволяла получать картину распределения нейтронного поля в динамике.

Принципы построения сеточных моделей полей известны с 1940 г. Они кратко состоят в следующем.

1. На реальное поле объекта накладывается сетка с электрически соединенными узлами пересечений. Размеры ячеек и их форма определяются требованиями точности моделирования и принципиального значения не имеют.

2. Участки поля, заключенные внутри ячеек выбрасываются, тем самым анизотропное распределение потенциала в поле заменяется на строго регламентированное распределение по направлению линий сетки.

3. Ребра ячеек сетки заменяются электрическими сопротивлениями, величина которых рассчитывается методом векторных площадей [6] так, чтобы учесть проводимость поля в направлении ребра ячейки с учетом проводимости вырезанных участков поля.

4. Границы таким образом созданной электрической сетки подключают к регулируемому источнику потенциала (например, земли) для создания граничных условий существования потенциала внутри сетки.

Рассмотрим в качестве примера сеточные модели полей, описываемых уравнениями Лапласа, Пуассона, Поккельса и Фурье. Рассмотрим точку с координатами $(0,0)$ в двумерном поле Лапласа $\nabla^2 \varphi(x, y) = 0$

Мы можем найти потенциал в этой точке через конечные разности таким образом:

$$\frac{\varphi_1 - \varphi_0}{h} + \frac{\varphi_2 - \varphi_0}{h} + \frac{\varphi_3 - \varphi_0}{h} + \frac{\varphi_4 - \varphi_0}{h} = 0,$$

где $\varphi_1 \varphi_2$ – потенциалы в соседних точках по оси X, $\varphi_3 \varphi_4$ – потенциалы в соседних точках по оси Y, h – шаг дискретизации поля, φ_0 – потенциал в исследуемой точке.

Этому физическому полю ставим в аналогии данный сеточный узел.(рис. 2.02)

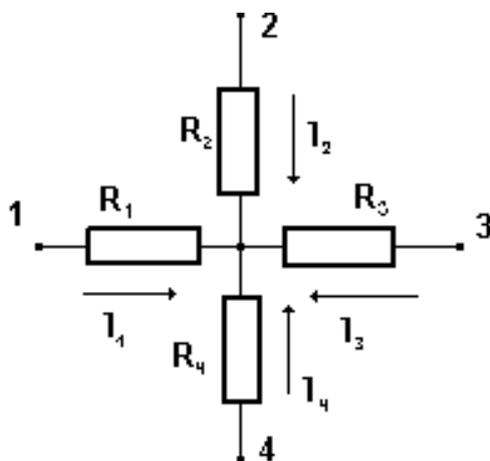


Рис. 2.02. Ячейка сеточной модели поля, описываемого уравнением Лапласа

Обозначим токи в ветвях узла через $I_1 I_2 I_3 I_4$.

Тогда сумма токов в узле 0 будет равна

$$\frac{V_1 - V_0}{R} + \frac{V_2 - V_0}{R} + \frac{V_3 - V_0}{R} + \frac{V_4 - V_0}{R} = 0;$$

то есть имеем полную аналогию уравнениям поля.

Аналогично можно получить ячейки моделей полей Пуассона, Поккельса и Фурье. Можно видеть, что в модели поля Поккельса каждый узел имеет сопротивление утечки потенциала на землю. В модели поля Пуассона, наоборот, в каждый узел модели подается извне потенциал внешнего источника. В модели поля Фурье каждый узел модели связан с точкой земли через емкость.(рис. 2.03)

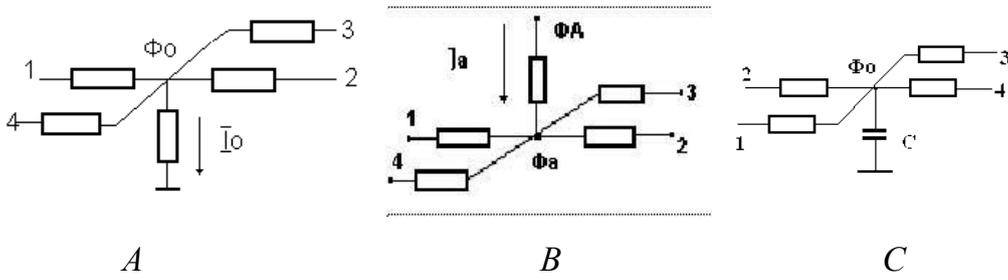


Рис. 2.03. Ячейки моделей полей, описываемых уравнениями Поккельса (а), Пуассона (в), Фурье (с)

Сеточная модель стационарного реактора с отражателем

Рассмотрим возможность применения моделей Лапласа, Пуассона, Поккельса и Фурье для построения сеточной модели ядерного реактора. Вначале рассмотрим решение этой задачи для стационарного реактора, состоящего из активной зоны и отражателя.

В общем виде уравнения стационарного реактора в одногрупповом приближении имеют следующий вид:

$$\nabla^2 \Phi_a(x, y) + B^2(x, y) \Phi_a(x, y) = 0; \quad (2-30)$$

$$\nabla^2 \Phi_o(x, y) - \lambda^2(x, y) \Phi_o(x, y) = 0, \quad (2-31)$$

где Φ_a – поток нейтронов в активной зоне, Φ_o – поток нейтронов в отражателе.

Уравнения (2-30) и (2-31) решаются с учетом граничных условий:

$$\Phi_a = \Phi_o;$$

$$\frac{\partial \Phi_a}{\partial m} = a \frac{\partial \Phi_o}{\partial m},$$

где $a \cong 1$, \mathbf{n} – направление нормали к границе раздела двух сред.

Уравнение (2-30) является в этом случае уравнением Пуассона, а уравнение (2-31) – уравнением Поккельса.

Для уравнения Поккельса, описывающего стационарное распределение потока в отражателе, сеточная модель будет соединением ячеек вида (рис. 2.03а)

Ток утечки i_o можно определить из уравнения Кирхгофа для данной ячейки:

$$i_o = -\frac{\lambda^2 h^2}{R} \Phi_o = -\frac{\Phi_o}{R_o}. \quad (2-32)$$

Уравнение (2-30), наоборот, характеризуется притоком энергии в каждую точку поля, то есть его сеточная модель должна состоять из ячеек вида (рис. 2.03b). Притекающий ток может быть найден как:

$$i_a = \frac{B^2 h^2}{R} (\Phi_A - \Phi_a). \quad (2-33)$$

То есть в каждую точку модели активной зоны необходимо подавать ток i_a , пропорциональный потенциалу Φ_a в этой точке.

Для моделирования стационарных состояний реактора такие модели вполне приемлемы и известны давно [7]. Для нестационарных состояний, когда потоки Φ_a и Φ_o меняются во времени, а уравнения (1-30) и (1-31) становятся уравнениями Фурье, использование только резистивных ячеек модели приводит к необходимости периодически изменять все подводимые в узлы модели токи i_a , чтобы в любой момент времени они соответствовали изменяющимся во времени потенциалам Φ_a узлов модели. Для этого необходимо иметь на каждую точку модели перенастраиваемые источники тока.

Сложность управления моделью в этом случае заставляет переходить к RC-сеткам, а для притекания тока в узлы модели использовать схемы «обратного сопротивления», которые представляют собой схемы генераторов тока. Рассмотрим работу такой схемы, состоящей из двух операционных усилителей [9]. Покажем, что схема является генератором тока, то есть ток на выходе у нее в достаточно широких пределах не зависит от выходного напряжения, следовательно, и от нагрузки. Схема имеет дополнительные управляющие напряжения U_A и U_B . Находим значение тока I на выходе схемы (рис. 2.04).

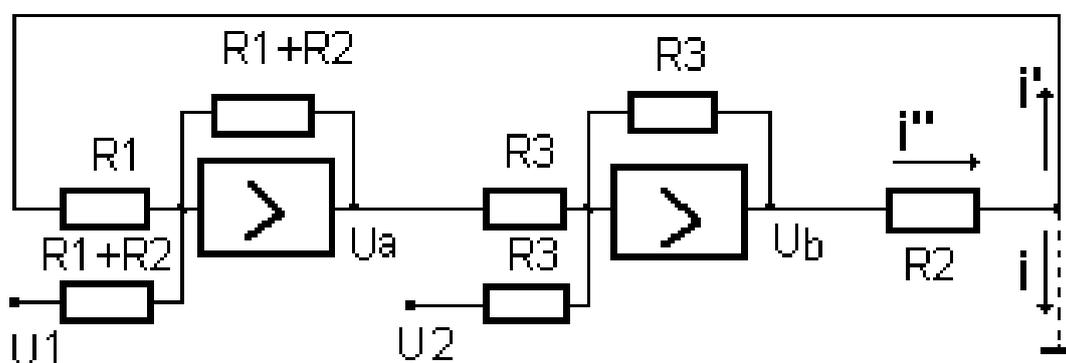


Рис. 2.04. Схема отрицательного сопротивления для моделирования притекания тока

Напряжения на выходе усилителей U_1 и U_2 будут равны:

$$U_1 = -U_a - U\left(1 + \frac{R}{R}\right);$$

$$U_2 = U_b - U_1 = U_a - U_b + U\left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right).$$

Ток, притекающий к выходу схемы, то есть к узлу сеточной модели через сопротивление R_2 будет равен

$$I_{R2} = I + I^1 = \frac{U_2 - U}{R_2} = \frac{U_A - U_B + U \frac{R_2}{R_1}}{R_2};$$

но $I^1 = \frac{U}{R_1}$ тогда:

$$I = I_{R2} - I^1 = \frac{U_A - U_B + U \frac{R_2}{R_1}}{R_2} - \frac{U}{R_1} = \frac{U_A R_1 - U_B R_1}{R_1 R_2} = \frac{U_A}{R_2} - \frac{U_B}{R_2}.$$

Таким образом, ток на выходе схемы

$$I = \frac{1}{R_2} (U_A - U_B)$$

не зависит от потенциала U на выходе схемы, и схема является генератором тока.

Оказывается такая схема, выполняющая функцию отрицательного сопротивления, оказывается более удобной для использования в сеточных моделях ядерных реакторов, чем установка множества самостоятельных источников тока на каждый узел модели. Действительно, при подключении к выходу данной схемы узла сеточной модели будет автоматически обеспечиваться к узлу приток тока I_{R2} , пропорционального потенциалу узла модели.

Используем эту схему для моделирования уравнения диффузии нестационарного реактора в одногрупповом приближении. Рассмотрим плоский реактор, утечка отсутствует.

$$M^2 \nabla^2 \Phi + (K_\infty - 1) \Phi - \sum_{i=1}^6 \frac{K_\infty p \beta_i}{p + \lambda_i} \Phi = l_0 \frac{\partial}{\partial t} \Phi, \quad (2-34)$$

где $M^2 = L^2 + \tau$ – квадрат длины миграции; τ – возраст нейтрона; L^2 – квадрат длины диффузии; p – оператор Лапласа; $l_0 = \frac{1}{\Sigma_a V}$ – время жизни нейтронов.

Запишем уравнение (1-34) в конечных разностях:

$$\frac{M^2}{h^2} (\Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3 + \Phi_4 - 4\Phi_0) + (K_\infty - 1) \Phi_0 - \sum_{i=1}^6 \frac{K_\infty p \beta_i}{p + \lambda_i} \Phi_0 = l_0 \frac{\partial}{\partial t} \Phi_0. \quad (2-35)$$

Схему ячейки сеточной модели для решения данного уравнения представим в виде (рис. 2.05). Покажем, что уравнения распределения потенциала в данной электрической схеме будут подобны уравнениям распределения нейтронного потока в ядерном реакторе, и найдем критерии подобия для расчета элементов схемы.

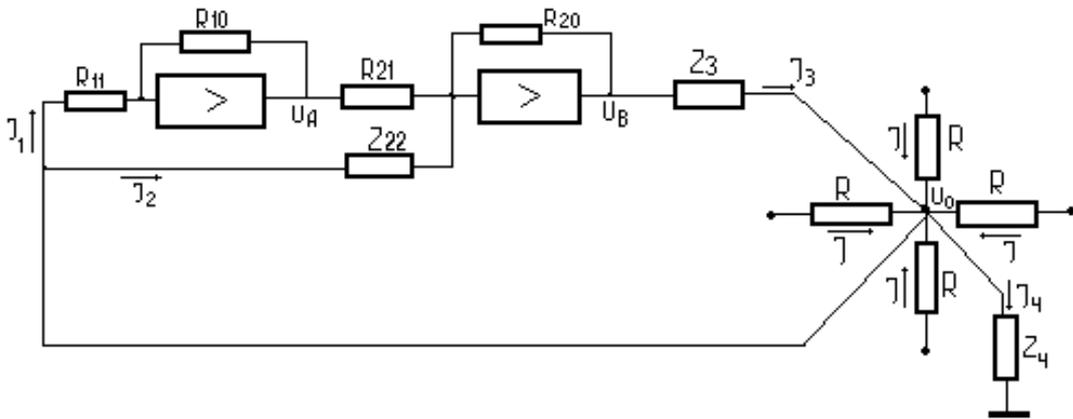


Рис. 2.05. Ячейка сеточной модели реактора в одногрупповом приближении

Составим уравнение для суммы токов в узле модели:

$$4I + I_3 - I_1 - I_2 - I_4 = 0;$$

или, записывая токи через параметры схемы:

$$\frac{1}{R} (U_1 + U_2 + U_3 + U_4 - 4U_0) + \frac{U_B - U_0}{Z_3} - \frac{U_0}{R_{11}} - \frac{U_0}{Z_{22}} - \frac{U_0}{Z_4} = 0. \quad (2-36)$$

Исключаем промежуточную переменную U_B :

$$U_B = -U_A \frac{R_{20}}{R_{21}} - U_0 \frac{R_{20}}{Z_{22}}; \quad U_A = -U_0 \frac{R_{10}}{R_{11}};$$

ПОЭТОМУ:

$$U_B = U_0 \left(\frac{R_{20}R_{10}}{R_{21}R_{11}} - \frac{R_{20}}{Z_{22}} \right).$$

Подставляя U_B в уравнение (1-36), получаем:

$$\frac{1}{R} (U_1 + U_2 + U_3 + U_4 - 4U_0) + \frac{U_0}{Z_3} \left[\frac{R_{10}R_{20}}{R_{11}R_{21}} - \frac{R_{20} + Z_3}{Z_{22}} - 1 - \frac{Z_3}{R_{11}} - \frac{Z_3}{Z_4} \right] = 0;$$

ИЛИ

$$(U_1 + U_2 + U_3 + U_4 - 4U_0) + \frac{R}{Z_3} \left[\frac{R_{10}R_{20}}{R_{11}R_{21}} - \frac{R_{20} + Z_3}{Z_{22}} - 1 - \frac{Z_3}{R_{11}} - \frac{Z_3}{Z_4} \right] = 0. \quad (2-37)$$

Исходное уравнение реактора запишем в преобразованном виде:

$$(\Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3 + \Phi_4 - 4\Phi_0) + \frac{h^2}{M^2} \left[K_\infty - 1 - K_\infty \sum_i^6 \frac{\beta_i p}{p + \lambda_i} - l_0 p \right] \Phi_0 = 0. \quad (2-38)$$

Видим, что оба уравнения (2-37) и (2-38) подобны. Находим критерии подобия:

1. $\frac{h^2}{M^2} = \frac{R}{Z_3}$; где R – базовое сопротивление сетки модели.

Отсюда определяем: $Z_3 = R \frac{M^2}{h^2}$.

Таким образом, сопротивление Z_3 должно быть активным сопротивлением.

2. Полагая, что Z_4 – емкость, находим ее значение из следующего равенства:

$$\frac{Z_3}{Z_4} = l_0 p; \quad Z_4 = \frac{1}{pC_4}; \quad C_4 = \frac{l_0 h^2}{RM^2}.$$

3. Полагаем:

$$K_\infty = \frac{R_{10}R_{20}}{R_{11}R_{21}} - \frac{Z_3}{R_{11}};$$

но имеется еще один критерий подобия для определения K_∞ :

$$K_\infty \sum_{i=1}^6 \frac{p\beta_i}{p+\lambda_i} = \frac{R_{20} + Z_3}{Z_{22}}; \text{ то есть } K_\infty = \frac{R_{20} + Z_3}{Z_{22} \sum_{i=1}^6 \frac{p\beta_i}{p+\lambda_i}}.$$

Но K_∞ – число, поэтому: $Z_{22} \sum_{i=1}^6 \frac{p\beta_i}{p+\lambda_i} = R^*$; где R^* – назовем базовым

активным сопротивлением модели. Тогда должно быть:

$$Z_{22} = \sum_{i=1}^6 \frac{p\beta_i}{p+\lambda_i} * R^*. \text{ Иначе } Z_{22} = \sum_{i=1}^6 \frac{R^*}{\beta_i} + \sum_{i=1}^6 \frac{\lambda_i R^*}{p\beta_i} = \sum_{i=1}^6 R_i + \sum_{i=1}^6 \frac{1}{C_i}. \text{ То есть } Z_{22}$$

должен быть четырехполюсником вида (рис. 2.06),

где $R_i = \frac{R^*}{\beta_i}$ и $C_i = \frac{1}{\lambda_i R_i}$. или $C_i = \frac{\beta_i}{R^* \lambda_i}$.

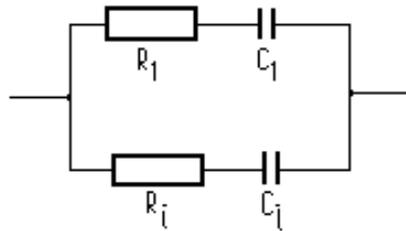


Рис. 2.06. Четырехполюсник, моделирующий протекание запаздывающих нейтронов

Методика построения модели реактора в двухгрупповом приближении

Используя те же технические средства, можно построить сеточную модель двухгруппового уравнения диффузии, дающую более точное решение. Рассмотрим методику построения такой модели на упрощенном случае стационарного распределения. Запишем уравнения диффузии в двухгрупповом приближении:

$$\begin{cases} D_1 \nabla^2 \Phi_1 - \frac{D_1}{\tau} \Phi_1 + \eta f \Sigma_2 \Phi_2 = 0; \\ D_2 \nabla^2 \Phi_2 - \Sigma_2 \Phi_2 + p \frac{D_1}{\tau} \Phi_1 = 0, \end{cases} \quad (2-39)$$

где Φ_1 и Φ_2 – потоки соответственно быстрых и тепловых нейтронов; D_1 и D_2 – коэффициенты диффузии быстрых и тепловых нейтронов; τ – возраст нейтронов; $f = \frac{(\Sigma_a)_U}{\Sigma_a}$ – коэффициент теплового использования нейтронов; $\eta = \frac{(\Sigma_f)_U}{(\Sigma_a)_U}$ – число нейтронов на акт деления, приходящееся на один нейтрон, поглощенный в топливе; p – вероятность избежать резонансного захвата; Σ_2 – макроскопическое сечение поглощения для тепловых нейтронов.

Перепишем уравнения (2-39) в конечно-разностном виде. Используем простейший одномерный случай.

$$\begin{cases} \frac{D_1}{h^2}[\Phi_1(x-h) + \Phi_1(x+h) - 2\Phi_1(x)] - \frac{D_1}{\tau}\Phi_1(x) + \Sigma_2 f \eta \Phi_2(x) = 0; \\ \frac{D_2}{h^2}[\Phi_2(x-h) + \Phi_2(x+h) - 2\Phi_2(x)] - \Sigma_2 \Phi_2(x) + \frac{p}{\tau} D_1 \Phi_1(x) = 0, \end{cases} \quad (2-40)$$

где h – шаг дискретизации.

Построим схему ячейки сеточной модели для уравнений (2-40).

Для уравнения диффузии быстрых нейтронов ячейка модели имеет вид (рис. 2.07). Если задать масштабные коэффициенты подобия K , то можно записать:

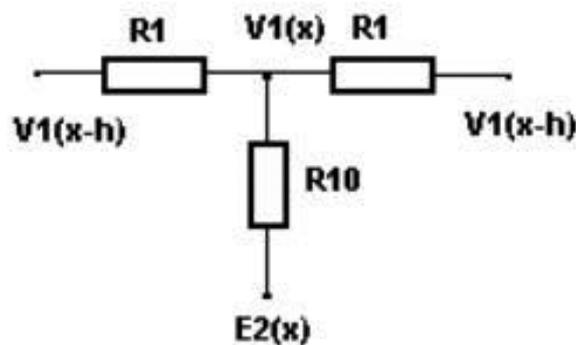


Рис. 2.07. Модель процесса диффузии быстрых нейтронов для двухгрупповой модели реактора

$$\Phi_1(x) = K_1 * V_1(x);$$

$$\Phi_2(x) = K_2 * V_2(x);$$

и уравнение Кирхгофа для данного узла модели будет иметь вид:

$$\frac{V_1(x-h) + V_1(x+h) - 2V_1(x)}{R_1} + \frac{E_2(x) - V_1(x)}{R_{10}} = 0, \quad (2-41)$$

где $E_2(x)$ – моделирует источник быстрых нейтронов, образующихся при поглощении тепловых нейтронов $\Phi_2(x)$ в топливе:

$$E_2(x) = \eta f \Phi_2(x) = \eta f K_2 V_2(x).$$

Сравнивая (2-40) и (2-41), находим критерии подобия для расчета сетки:

$$K_1 \frac{D_1}{h^2} = \frac{1}{R_1}; \quad K_1 \frac{D_1}{\tau} = \frac{1}{R_{10}}; \quad (2-42)$$

откуда находим величины сопротивлений:

$$R_1 = \frac{h^2}{K_1 D_1}; \quad R_{10} = \frac{1}{\Sigma_2} = \frac{\tau}{K_1 D_1};$$

Видно также, что масштабный коэффициент равен:

$$K_1 = \frac{\tau \Sigma_2}{D_1}. \quad (2-43)$$

Сетку тепловых нейтронов будем строить из ячеек вида (рис. 2.08). Уравнение Кирхгофа для этого узла имеет вид:

$$\frac{V_2(x-h) + V_2(x+h) - 2V_2(x)}{R_2} + \frac{E_1(x) - V_2(x)}{R_{20}} = 0, \quad (2-44)$$

где $E_1(x)$ – моделирует источник тепловых нейтронов, образующихся за счет замедления быстрых нейтронов $\Phi_1(x)$. $E_1(x) = p K_1 * V_1(x)$.

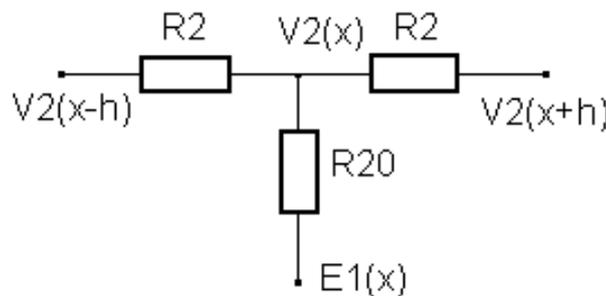


Рис. 2.08. Модель процесса диффузии для тепловых нейтронов в двухгрупповой модели реактора

Из сравнения уравнений (2-40) и (2-44) находим критерии подобия:

$$K_2 \frac{D_2}{h^2} = \frac{1}{R_2}; \quad K_2 \Sigma_2 = \frac{1}{R_{20}} = \frac{D_1}{\tau}. \quad (2-45)$$

из которых рассчитываем параметры сетки:

$$R_2 = \frac{h^2}{K_2 D_2}; \quad R_{20} = \frac{\tau}{D_1} = \frac{1}{\Sigma_2 K_2};$$

А масштабный коэффициент K_2 равен: $K_2 = \frac{D_1}{\tau \Sigma_2}$.

Объединим теперь оба узла в единый узел (рис. 1.09).

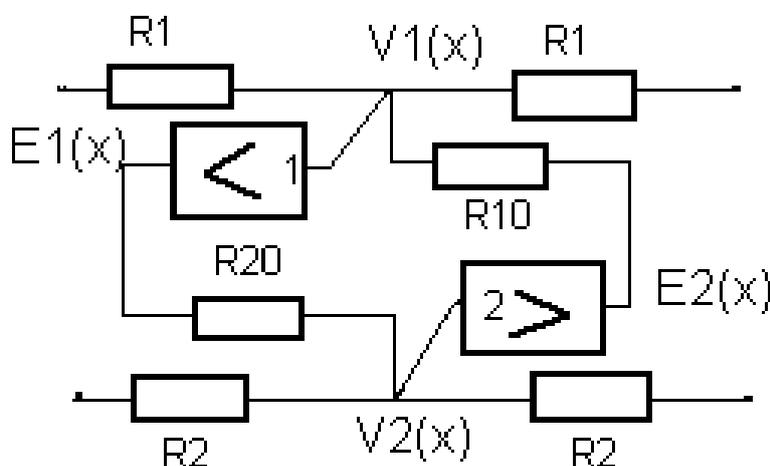


Рис. 2.09. Ячейка двухгрупповой модели реактора для активной зоны

Коэффициент усиления преобразователя 1 всегда будет меньше единицы:

$$K_I = K_1 p = \frac{\tau \Sigma_2 p}{D_1} < 1.$$

Поэтому этот элемент можно моделировать пассивной схемой – резистором. Коэффициент усиления преобразователя 2 будет всегда больше единицы, так как

$$K_2 = \frac{1}{K_1}; \quad \text{и} \quad K_{II} = K_2 \eta f = \frac{D_1}{\tau \Sigma_2} \eta f > 1.$$

поэтому этот участок схемы строится с применением активных элементов – операционных усилителей.

В качестве этих усилителей вполне может быть использована схема «отрицательного сопротивления», если на ее вход подать сигнал из узла модели тепловых нейтронов (V2), а выход соединить с узлом модели быстрых нейтронов (V1).

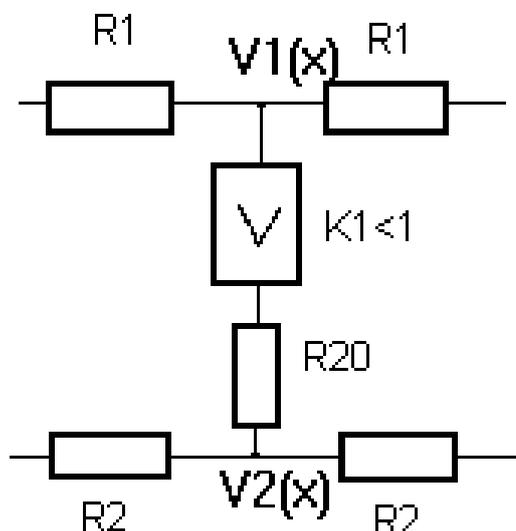


Рис. 2.10. Схема ячейки отражателя для двухгрупповой модели реактора

Потоки нейтронов в отражателе задаются аналогичными уравнениями, только произведение ηf обращается в нуль, так как $\eta=0$, а вероятность резонансного захвата $p=1$. Элемент двухгрупповой модели отражателя стационарного реактора имеет вид (рис. 2.10).

Расчет ячейки сеточной модели двухгрупповой диффузии

Рассмотрим детально расчет ячейки сеточной динамической модели реактора в двухгрупповом приближении [10]. Очевидно, на основании предыдущих рассмотрений схему ячейки модели для одного узла активной зоны можно выбрать в виде (рис. 2.11).

Двухгрупповые уравнения диффузии запишем с учетом запаздывающих нейтронов, которые произвольно отнесем к группе быстрых нейтронов. (рис. 2.11)

$$D_1 \nabla^2 \Phi_1 - \Sigma_1 \Phi_1 + \frac{(1-\beta)K\Sigma_2}{P_0} \Phi_2 + \sum_i^6 \lambda_i C_i = \frac{1}{V_1} \frac{\partial}{\partial(t)} \Phi_1; \quad (2-45)$$

$$D_2 \nabla^2 \Phi_2 - \Sigma_2 \Phi_2 + P_0 \Sigma_1 \Phi_1 = \frac{1}{V_2} \frac{\partial}{\partial(t)} \Phi_2; \quad (2-46)$$

$$\frac{\partial}{\partial(t)} C_i = K \Sigma_2 \beta_i \Phi_2 - \lambda_i C_i, \quad (2-47)$$

где P_0 – вероятность избежать резонансного захвата; $K = P_0 f \eta$ – коэффициент размножения; $\Sigma_1 = \frac{D_1}{\tau}$ – макроскопическое сечение поглощения быстрых нейтронов; $\Sigma_2 = \frac{D_2}{L^2}$ – то же для тепловых нейтронов.

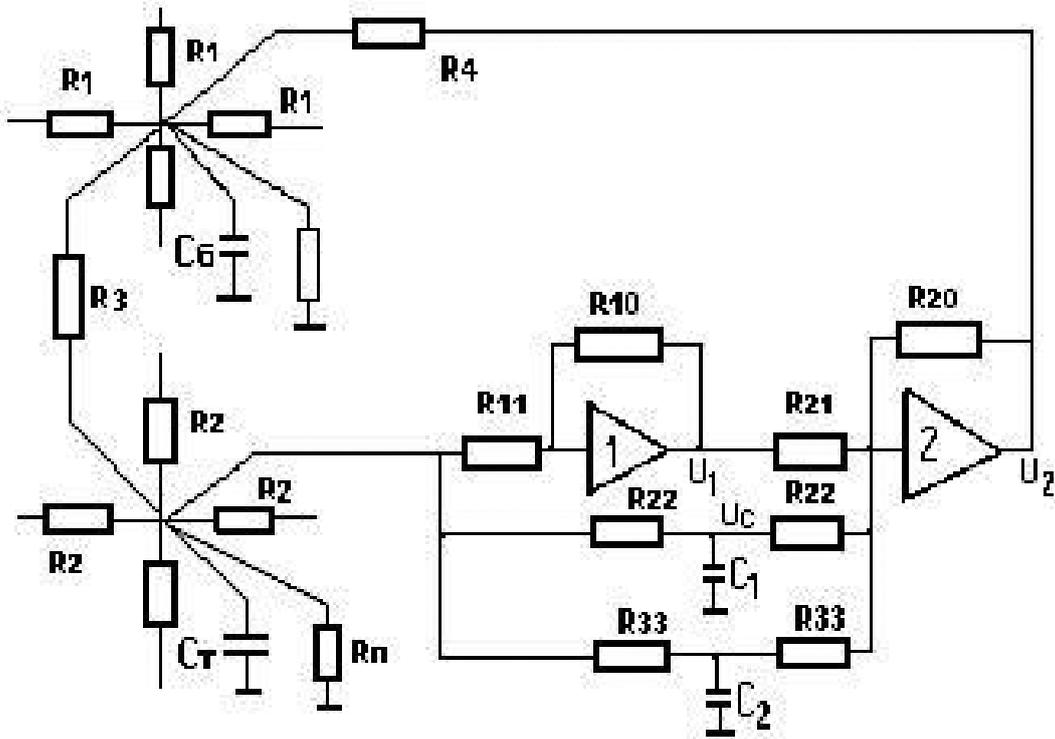


Рис. 2.11. Ячейка динамической сеточной модели ядерного реактора в двухгрупповом приближении

Избавимся от промежуточной переменной C_i , находим ее из уравнения (2-47):

$$C_i = \frac{K \Sigma_2 \beta_i}{p + \lambda_i} \Phi_2 \quad (2-48)$$

и подставляем в уравнение (2-45). Договоримся далее учитывать модель точечной кинетики с двумя усредненными группами запаздывающих нейтронов:

$$D_1 \nabla^2 \Phi_1 - \Sigma_1 \Phi_1 + \frac{(1 - \beta) K \Sigma_2}{P_0} \Phi_2 + \left(\frac{K \Sigma_2 \beta_1 \lambda_1}{p + \lambda_1} + \frac{K \Sigma_2 \beta_2 \lambda_2}{p + \lambda_2} \right) \Phi_2 = \frac{1}{V_1} \frac{\partial}{\partial t} \Phi_1; \quad (2-49)$$

$$D_2 \nabla^2 \Phi_2 - \Sigma_2 \Phi_2 + P_0 \Sigma_1 \Phi_1 = \frac{1}{V_2} \frac{\partial}{\partial(t)} \Phi_2. \quad (2-50)$$

Уравнения (2-49) и (2-50) переведем в безразмерный вид, вводя обозначения:

$$\bar{\Phi}_1 = \frac{\Phi_1}{\Phi_1^*}; \quad \bar{\Phi}_2 = \frac{\Phi_2}{\Phi_2^*}; \quad \alpha = \frac{\Phi_2^*}{\Phi_1^*}; \quad \bar{D}_1 = \frac{D_1}{D_1^*}; \quad \bar{D}_2 = \frac{D_2}{D_2^*};$$

где $\Phi_1^*, \Phi_2^*, D_1^*, D_2^*$ – произвольные базовые значения величин.

Поделим уравнение (2-49) на Φ_1^* и Φ_2^* , а уравнение (2-50) – на Φ_2^* и D_2^* , и получим в конечно-разностном виде:

$$\begin{aligned} & \left(\frac{D_1}{D_1^*} \right) \left(\bar{\Phi}_1^{-1} + \bar{\Phi}_1^2 + \bar{\Phi}_1^3 + \bar{\Phi}_1^4 - 4\bar{\Phi}_1^0 \right) - \frac{h^2}{\tau} \left(\frac{D_1}{D_1^*} \right) \bar{\Phi}_1 + \frac{(1-\beta)KD_2 h^2 \alpha}{P_0 L^2 D_1^*} \bar{\Phi}_2 + \\ & + \frac{KD_2 \beta_1 h^2 \alpha}{P_0 L^2 D_1^* \left(\frac{1}{\lambda_1} p + 1 \right)} \bar{\Phi}_2 + \frac{KD_2 \beta_2 h^2 \alpha}{P_0 L^2 D_1^* \left(\frac{1}{\lambda_2} p + 1 \right)} \bar{\Phi}_2 = \frac{1}{V_1} \frac{h^2}{D_1^*} \frac{\partial}{\partial(t)} \bar{\Phi}_1; \end{aligned} \quad (2-51)$$

$$\begin{aligned} & \left(\frac{D_2}{D_2^*} \right) \left(\bar{\Phi}_2^{-1} + \bar{\Phi}_2^2 + \bar{\Phi}_2^3 + \bar{\Phi}_2^4 - 4\bar{\Phi}_2^0 \right) - \frac{h^2}{L^2} \left(\frac{D_2}{D_2^*} \right) \bar{\Phi}_2 + \frac{D_1 h^2}{D_2^* \tau \alpha} \bar{\Phi}_1 = \\ & = \frac{1}{V_2} \frac{h^2}{D_2^*} \frac{\partial}{\partial(t)} \bar{\Phi}_2; \end{aligned} \quad (2-52)$$

В этих уравнениях принято, что

$$K = P_0 f \eta; \quad \Sigma_1 = \frac{D_1}{\tau} \quad \Sigma_2 = \frac{D_2}{\tau} \quad \Phi_1^* = \frac{1}{\alpha} \Phi_2^* \quad \Phi_2^* = \alpha \Phi_1^*$$

где α – масштабный коэффициент, устанавливающий соответствие безразмерных потоков быстрых и тепловых нейтронов.

Составим для данного узла модели уравнения Кирхгофа, запишем их также в безразмерном конечно-разностном виде. Вводим:

$$\bar{R} = \frac{R}{R^*} \quad \bar{U} = \frac{U}{U^*}$$

Получим:

$$\begin{aligned} \frac{1}{R}(\bar{U}_1^{-1} + \bar{U}_1^{-2} + \bar{U}_1^{-3} + \bar{U}_1^{-4} - 4\bar{U}_1^{-0}) - \frac{1}{R_3}(\bar{U}_1^{-0} - \bar{U}_2^{-0}) + \frac{1}{R_4}\bar{U}_2^{-0} * F(p) - \frac{1}{R_4}\bar{U}_1^{-0} = \\ = C_6 R^* \frac{\partial}{\partial(t)} \bar{U}_1^{-0}; \end{aligned} \quad (2-53)$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{R_2}(\bar{U}_2^{-1} + \bar{U}_2^{-2} + \bar{U}_2^{-3} + \bar{U}_2^{-4} - 4\bar{U}_2^{-0}) - \frac{1}{R_n}\bar{U}_2^{-0} + \frac{1}{R_3}(\bar{U}_1^{-0} - \bar{U}_2^{-0}) = \\ = C_T R^* \frac{\partial}{\partial(t)} \bar{U}_2^{-0}. \end{aligned} \quad (2-54)$$

Сопоставляя (2-53) и (2-54) с уравнениями реактора (2-51) и (2-52), убеждаемся в их подобии, значит:

$$\frac{\bar{\Phi}_1}{\bar{\Phi}_2} = \frac{\bar{U}_1}{\bar{U}_2}; \text{ или } \frac{\frac{\Phi_1}{\Phi_2}}{\frac{\Phi_1^*}{\Phi_2^*}} = \frac{\frac{\Phi_2^*}{\Phi_1^*} \frac{\Phi_1}{\Phi_2}}{\frac{\Phi_1^*}{\Phi_2^*}} = \alpha \frac{\Phi_1}{\Phi_2} = \frac{\bar{U}_1}{\bar{U}_2};$$

то есть коэффициент α устанавливает соответствие между потенциалами узлов сетки быстрых и тепловых нейтронов.

Прежде чем записывать критерии подобия и приступить к расчету элементов узла модели, определим передаточную функцию $F(p)$ цепи схемы отрицательного сопротивления.

$$U_2 = -U_1 K_2 - U_1 K_2^{11} - U_1 K_2^{111}; \quad U_1 = -K_1 U_2;$$

где K_1 – коэффициент передачи первого усилителя; $K_2; K_2^{11}; K_2^{111}$ – коэффициенты передачи второго усилителя.

$$K_1 = \frac{R_{01}}{R_{11}}; \quad K_2 = \frac{R_{02}}{R_{21}}; \quad K_2^{11} = \frac{R_{02}}{Z_{ex}^{11}}; \quad K_2^{111} = \frac{R_{02}}{Z_{ex}^{111}};$$

Определим передаточные коэффициенты второго усилителя K_2^{11} и K_2^{111} (рис. 2.12):

$$i_1 = i_2 + i_3; \text{ но } i_1 = \frac{U_1 - U_c}{R_{22}}; \quad i_2 = C \frac{dU_c}{dt}; \quad i_3 = \frac{U_c}{R_{22}};$$

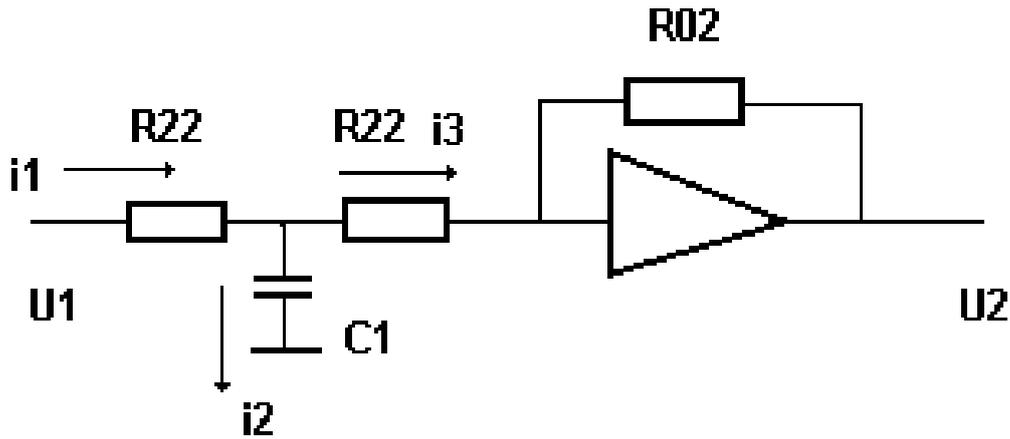


Рис. 2.12. К расчету передаточной функции запаздывающих нейтронов

Получаем: $\frac{U_1 - U_c}{R_{22}} = CpU_c + \frac{U_c}{R_{22}}$; или $U_c = \frac{U_1}{CpR_{22} + 2}$;

отсюда: $U_2^1 = K_2^1 U_1 = U_c \frac{R_{02}}{R_{22}} = \frac{R_{02}}{R_{22}(pCR_{22} + 2)} U_1$;

и окончательно: $U_2^1 = \frac{R_{02}}{R_{22}(pCR_{22} + 2)} U_1$; (2-55)

Аналогично находим по второму входу: $U_2^{11} = \frac{R_{02}}{R_{33}(pCR_{33} + 2)} U_1$; (2-56)

Подставляя (2-55) и (2-56) в уравнения (2-53) и (2-54), получим:

$$F(p) = \frac{U_2}{U_1}(p) = \left[\frac{R_{01}R_{02}}{R_{11}R_{21}} + \frac{R_{01}R_{02}}{R_{11}R_{22}(pC_1R_{22} + 2)} + \frac{R_{01}R_{02}}{R_{11}R_{33}(pC_2R_{33} + 2)} \right]. \quad (2-57)$$

После подстановки (2-57) в (2-53) и преобразований получаем:

$$\frac{\nabla^2 \bar{U}_1^0}{R_1} - \left(\frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} \right) \bar{U}_1^0 + \left(\frac{1}{R_3} + \frac{R_{02}R_{01}}{R_{11}R_{21}R_4} \right) \bar{U}_2^0 + \frac{R_{01}R_{02}}{2R_{11}R_{22}R_4 \left(\frac{R_{22}C_1}{2} p + 1 \right)} \bar{U}_1^0 + \frac{R_{01}R_{02}}{2R_{11}R_{33}R_4 \left(\frac{R_{33}C_2}{2} p + 1 \right)} = C_{\neq}^* R^* \frac{d}{dt} \bar{U}_1^0; \quad (2-58)$$

$$\frac{\nabla^2 \bar{U}_2^0}{R_2} - \left(\frac{1}{R_n} + \frac{1}{R_3} \right) \bar{U}_2^0 + \frac{1}{R_3} \bar{U}_1 = C_T R^* \frac{d}{dt} \bar{U}_2. \quad (2-59)$$

Сравнивая подобные уравнения (2-58) и (2-51) почленно, находим критерии подобия для расчета цепи усилителей:

$$\frac{\alpha(1-\beta)Kh^2\bar{D}_2}{P_0L^2D_1^*} = \frac{1}{R_3} + \frac{R_{02}R_{01}}{R_{11}R_{21}R_4}; \quad (2-60)$$

$$\frac{\alpha\beta_1Kh^2D_2}{P_0L^2D_1^* \left(\frac{1}{\lambda_1} p+1 \right)} = \frac{R_{01}R_{02}}{2R_{11}R_{22}R_4 \left(\frac{R_{22}C_1}{2} p+1 \right)}; \quad (2-61)$$

$$\frac{\alpha\beta_2Kh^2D_2}{P_0L^2D_1^* \left(\frac{1}{\lambda_2} p+1 \right)} = \frac{R_{01}R_{02}}{2R_{11}R_{33}R_4 \left(\frac{R_{33}C_1}{2} p+1 \right)}; \quad (2-62)$$

$$\frac{1}{V_1} \frac{h^2}{D_1^*} = C_{\neq} R^*; \quad \frac{1}{V_2} \frac{h^2}{D_2^*} = C_T R^*. \quad (2-63)$$

Из (2-61) и (2-62) можно найти постоянные времени цепи запаздывающих нейтронов:

$$\left(\frac{1}{\lambda_1} p+1 \right) = \frac{R_{22}C_1}{2} p+1; \quad \left(\frac{1}{\lambda_2} p+1 \right) = \frac{R_{33}C_2}{2} p+1.$$

Или

$$\frac{1}{\lambda_1} = \frac{R_{22}C_1}{2}; \quad \frac{1}{\lambda_2} = \frac{R_{33}C_2}{2}.$$

Из условия (1-63) сразу находим значения емкостей утечки:

$$C_{\bar{\sigma}} = \frac{h^2}{V_1 D_1^* R^*}; \quad C_T = \frac{h^2}{V_2 D_2^* R^*};$$

Из остальных условий подобия можно найти соотношения сопротивлений $\frac{R_{22}}{R_{21}}$ и $\frac{R_{33}}{R_{22}}$.

В частности видно, что: $\frac{R_{33}}{R_{22}} = \frac{\beta_1}{\beta_2}$

Для остальных параметров модели можно использовать оставшиеся условия подобия при сравнении уравнения (2-51) с уравнением (2-58) и уравнения (2-52) с уравнением (2-59).

$$\overline{R}_1 = \frac{D_1^*}{D_1}; \quad \overline{R}_2 = \frac{D_2^*}{D_2}; \quad (2-64)$$

$$\frac{1}{\overline{R}_3} + \frac{1}{\overline{R}_4} = \frac{h^2}{\tau} \frac{D_1}{D_1^*}; \quad (2-65)$$

$$\frac{1}{\overline{R}_3} + \frac{1}{\overline{R}_n} = \frac{h^2}{L^2} \frac{D_2}{D_2^*}; \quad (2-66)$$

$$\frac{1}{\overline{R}_3} = \frac{P_0 h^2}{\alpha \tau} \frac{D_1}{D_2^*}. \quad (2-67)$$

В частности из (2-65) и (2-67) находим:

$$\overline{R}_4 = \frac{\alpha * \tau}{h^2 D_1} \left(\frac{D_1^* D_2^*}{\alpha D_2^* - P_0 D_1^*} \right),$$

а из (1-66) и (1-67):

$$\overline{R}_n = \frac{D_2^*}{h^2} \left(\frac{\alpha L^2 \tau}{\alpha D_2^* \tau - P_0 D_1^* L^2} \right);$$

из (1-67): $\overline{R}_3 = \frac{\alpha D_2^* \tau}{P_0 h^2 D_1}; \quad R_1 = \frac{D_1^*}{D_1} R^* \quad R_2 = \frac{D_2^*}{D_2} R^*.$

Техническое устройство и параметры двухгрупповой сеточной модели реактора

На кафедре ЭАФУ ТПУ была разработана и построена в 1962 г. первая в стране сеточная динамическая модель нестационарного ядер-

ного реактора в двухгрупповом приближении [10]. Модель позволяет наблюдать за пространственным поведением потока нейтронов при разгоне реактора, снижении мощности, различных манипуляциях стержнями СУЗ. Напряжения в узлах электрической сетки сопротивлений в определенном масштабе представляют поток нейтронов (быстрых и тепловых) в соответствующих точках реактора, причем выдерживается и геометрическая аналогия двумерного пространства модели и горизонтального сечения реактора.

Моделирование ведется в натуральном масштабе времени. Модель позволяет простыми средствами решать широкий круг задач по диффузии тепловых и быстрых нейтронов, по утечке и размножению нейтронов, по испытанию в лабораторных условиях макетов систем автоматического регулирования мощности и систем контроля нейтронного потока в реакторе.

Сетка модели собрана из резисторов типа МЛТ, отобранных по номиналу с точностью до 1 %, и конденсаторов типа БМ с точностью до 5 %. Модель использует 42 операционных усилителя. В качестве последних использовались как ламповые схемы типа УУ-2, так и интегральные микросхемы типа Л140УД7.

Монтажная плата модели состоит из двух электрических сеток сопротивлений, связанных между собой, как было указано выше.

Для уменьшения количества усилителей применяется объединение 9 точек модели в один блок по схеме:

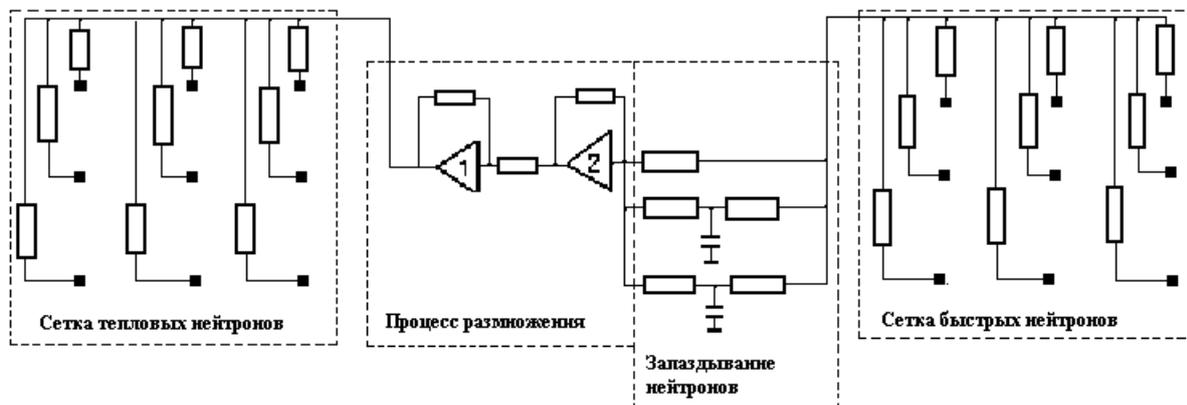


Рис. 2.13. Объединение узлов модели для одной пары решающих усилителей

Таким образом, в модели нет отдельных узлов, соответствующих замедлителю или каналу с топливом, то есть структура реакторного пространства предполагается гомогенизированной. Количество таких гомогенизированных блоков 21, поэтому общее количество использованных усилителей равно 42.

Общее количество узлов модели составляет и по сетке быстрых нейтронов и по сетке тепловых нейтронов по 421 узлу, из них на активную зону приходится $21 \times 9 = 189$ узлов. Остальные 232 ячейки моделируют распределение потока в отражателе.

Погрешность решения по сетке тепловых нейтронов составляет 0.5 %, а по сетке быстрых нейтронов –15 %.

Три узла модели имеют выключатели, соединяющие сетку с потенциалом земли и используются как стержни системы аварийной защиты. Десять точек модели соединяются с землей через регулируемые потенциометры и используются как стержни СУЗ.

Модель была использована в качестве модели реального времени для различных тренажеров и имитаторов для обучения операторов управления в учебных центрах. Объединяя модель с макетами каналов регулирования мощности, мы получаем лабораторное устройство для исследования и отладки в реальном времени различных систем много-связного регулирования мощности реактора.

2.3. Методы локальной кинетики

Из предыдущего рассмотрения нам ясно, что численные методы решения задач пространственной кинетики реактора, в частности, метод разложения по собственным функциям, являются довольно громоздкими для синтеза передаточной матрицы реактора. В то время как еще с 50-х годов в научной литературе существуют методы региональной кинетики, которые можно использовать для решения этой задачи [18, 19, 20]. Сущность этих методов состоит в том, что пространство реактора разбивается на ряд зон управления, каждая из которых рассматривается как самостоятельный подкритический реактор, а совокупность таких зон образует критическую систему. Такая модель занимает промежуточное положение между точечными уравнениями кинетики и уравнениями в частных производных, совмещая простоту анализа первых с возможностью получения информации об усредненных пространственных изменениях в каждой из зон. В общем виде уравнения региональной кинетики записывают в виде, напоминающем вид одногрупповых уравнений нейтронного поля:

$$\frac{dN_j}{dt} = \frac{\delta K_j - \beta}{l^*} N_j + \frac{\sum_{j=1}^n L_{jk} \delta K_k}{l^*} N_k + \sum_{i=1}^6 \lambda_{ji} C_{ji}; \quad (2-68)$$

$$\frac{dC_{ji}}{dt} = \frac{\beta_{ji}}{l^*} N_j - \lambda_{ji} C_{ji},$$

где δK_j – подкритичность j -й зоны управления; N_j – плотность потока нейтронов в j -й зоне управления; δK_k – подкритичность k -й зоны управления, $k=1,2,\dots,(n-1)$; n – количество зон управления; C_{ji} – концентрация ядер-излучателей запаздывающих нейтронов i -й группы в j -й зоне управления; L_{jk} – вероятность того, что нейтрон, рожденный в k -й зоне, попадет в j -ю зону и вызовет там деление ядра урана, эту величину называют коэффициентом взаимосвязи зон управления, меняющимся от 0 до 1.

Для простейшего случая двухзонной реакторной системы с учетом одной усредненной группы нейтронов уравнения (2-68) имеют вид:

$$\begin{aligned} \frac{dN_1}{dt} &= \frac{\delta K_1 - \beta}{l^*} N_1 + \frac{L_{12} \delta K_2}{l^*} N_2 + \lambda C_1; \\ \frac{dN_2}{dt} &= \frac{\delta K_2 - \beta}{l^*} N_2 + \frac{L_{21} \delta K_1}{l^*} N_1 + \lambda C; \\ \frac{dC_1}{dt} &= \frac{\beta}{l^*} N_1 - \lambda C; \\ \frac{dC_2}{dt} &= \frac{\beta}{l^*} N_2 - \lambda C. \end{aligned} \tag{1-69}$$

Разрешая уравнения (2-68) для стационарного состояния, можно найти значения коэффициентов взаимосвязи зон:

$$L_{kj} = \delta K_j \frac{N_{j0}}{N_{k0}}; \quad L_{jk} = \delta K_k \frac{N_{k0}}{N_{j0}}. \tag{2-70}$$

Таким образом, коэффициент взаимосвязи рассматривается как реактивность, вносимая j -й зоной в k – ю зону с весовым множителем, равным отношению потоков в этих зонах $\frac{N_{10}}{N_{01}}$. Хорошей иллюстрацией уравнений локальной кинетики является график рис. 2.14, который связывает реактивность зон, коэффициент взаимосвязи и отношение потоков в зонах при различных периодах разгона реактора.

График получен путем решения системы уравнений (2-69) для двухзонного реактора при определенном значении коэффициента связи по реактивности.

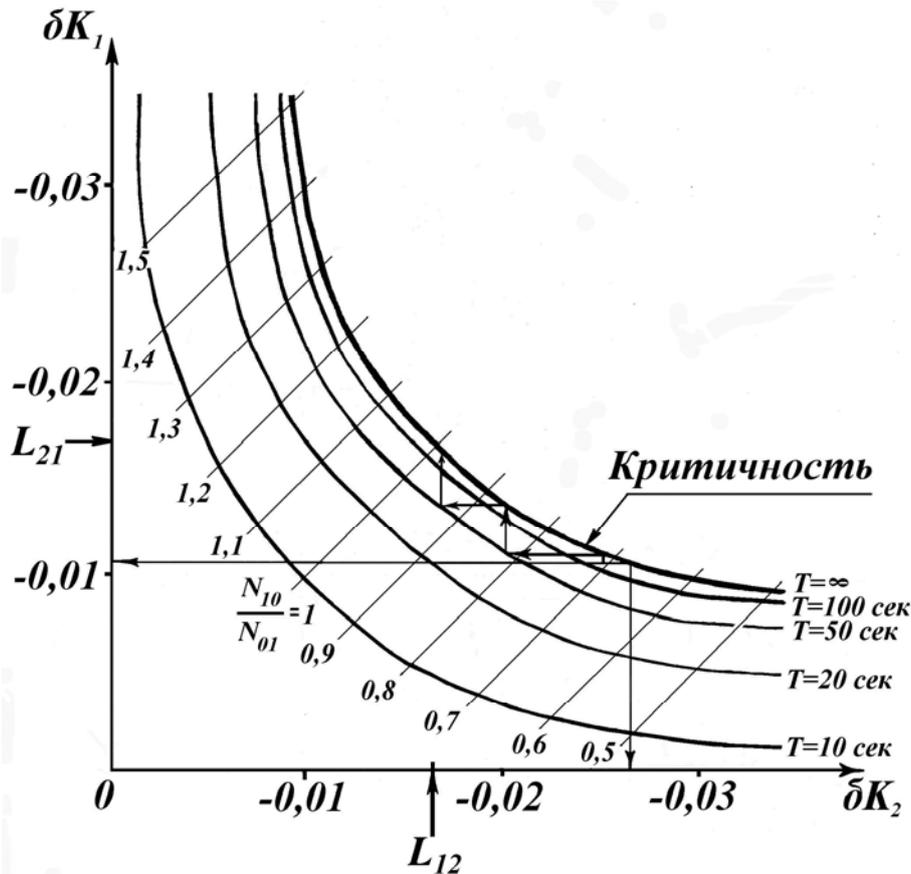


Рис. 2.14. Зависимость коэффициентов взаимосвязи от соотношения потоков в зонах управления и периода разгона реактора

Из графика видно, что при ступенчатом изменении реактивности в зоне с большим значением потока перераспределяется реактивность между областями. Если одновременно изменять реактивность в обеих зонах, то процесс выравнивания будет оптимален с точки зрения устойчивости системы. В этом случае выравнивание не изменяет интегральной мощности реактора (критичности системы). Из графика следует также, что, зная значение коэффициента связи между областями управления, можно указать реактивность каждой области.

Для многомерной системы соотношения (2-70) трансформируются

$$\delta K_j = \sum_{m=1}^m L_{mj} \frac{N_{m0}}{N_{j0}}$$

Линеаризуем систему уравнений (1-68) относительно малых приращений, пренебрегая величинами второго порядка малости, получим:

$$\delta N_j(p) = W_j(p) [N_{j0} \Delta \delta K_j(p) + \sum_{m=1}^m \frac{L_{mj}}{l_{эфф}} \delta N_m(p)] \quad (2-71)$$

где $W_j(p) = [p\{l + \sum_{i=1}^6 \frac{\beta_{ij}}{(p + \lambda_{ij})}\} - \delta K_{j0}]^{-1}$;

или для двухзонной системы, разрешая относительно приращений реактивностей в зонах:

$$N_j(p) = N_{0j} \left[\frac{W_j}{1 - W_j W_m L_{mj} L_{jm}} \right] * \Delta \delta K_j + N_{m0} \left[\frac{W_j W_m L_{mj}}{1 - W_j W_m L_{mj} L_{jm}} \right] * \Delta \delta K_m. \quad (2-72)$$

Выражения в квадратных скобках являются передаточными функциями отдельных зон и их взаимосвязей, например, для двухзонной системы структурная схема будет иметь вид (рис. 2.15).

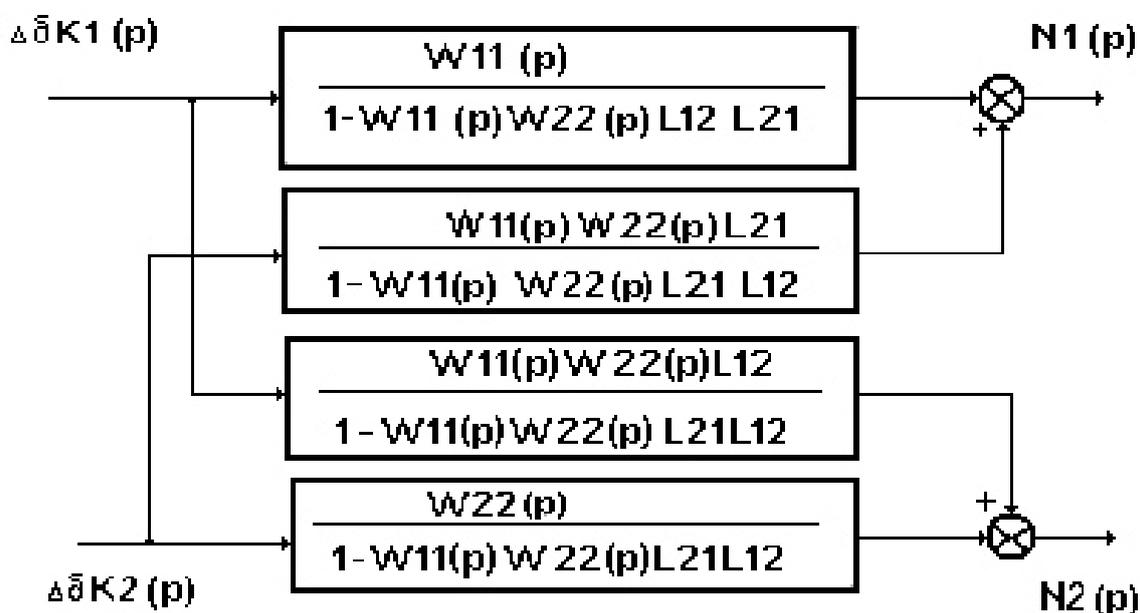


Рис. 2.15. Структурная схема динамики реактора с прямыми взаимосвязями зон управления

Методами структурных преобразований матричных структурных схем [12] можно преобразовать эту схему к эквивалентным схемам рис. 2.16 и рис. 2.17, но предпочтительнее использовать первую схему, потому что она является канонической, направление взаимосвязей совпадает с направлением основных сигналов по каналам управления [13], и по этой причине она имеет явные преимущества при математическом анализе и оценке экспериментальных результатов.

Структурная схема рис. 2.16 полностью определяет все элементы передаточной матрицы реактора для случая двух управляемых зон, аналогичными расчетами легко получить передаточную матрицу реактора с любым количеством зон управления.

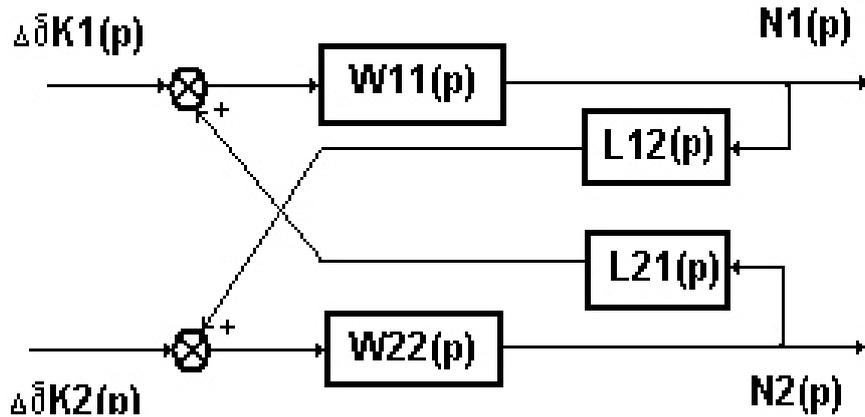


Рис. 2.16. Преобразование структурной схемы двухзонного реактора в систему с обратными направлениями взаимосвязей

Из схемы рис. 2.16 видно также, что коэффициент взаимосвязи L_{mj} должен быть частотно-зависимым, так как он преобразует нейтронный поток в реактивность, в силу чего он должен иметь вид фазопережающего, дифференцирующего звена. По этой же причине произведение операторов $W_j(p) * L_{mj}(p) = \varepsilon_{mj}$ должно быть частотно-независимым и характеризовать коэффициент передачи нейтронного потока из одной зоны управления в другую (рис. 2.17).

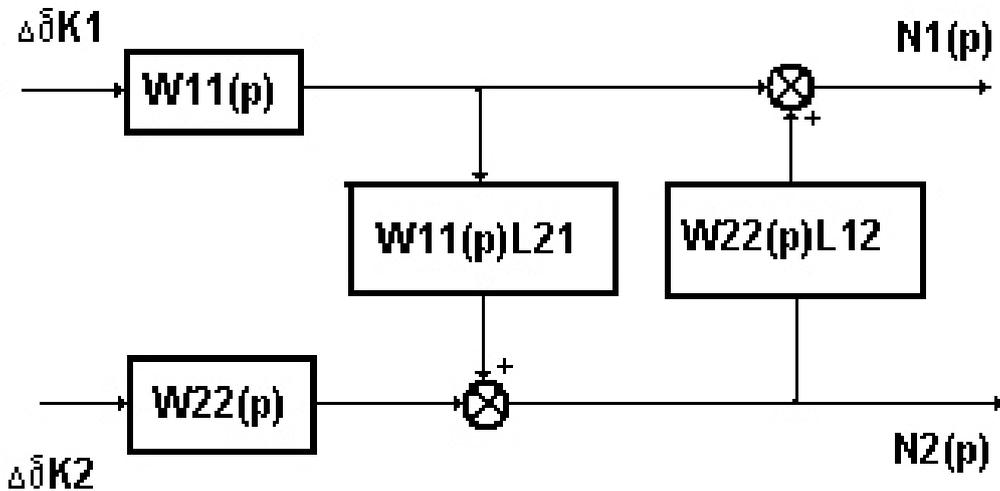


Рис. 2.17. Преобразование структурной схемы двухзонного реактора в систему со связями по выходным координатам

Частотная характеристика взаимосвязи $L_{mj}(p)$ на основании структурной схемы рис. 2.17 может быть получена из выражений:

$$W_{11}(p) = \frac{W_1}{1 - W_1(p)W_2(p)L_{12}(p)L_{21}(p)}$$
 и
$$W_{12}(p) = \frac{W_1(p)W_2(p)L_2(p)}{1 - W_1(p)W_2(p)L_{12}(p)L_{21}(p)}$$
, если

полагать, что зоны управления идентичны по своим характеристикам: $W_1(p) = W_2(p)$, $L_{21}(p) = L_{12}(p)$. Тогда, пренебрегая знаменателем $W^2 L^2 \ll 1$, имеем:

$$L_{12}(p) \approx \frac{W_{12}(p)}{W_{11}^2(p)}. \quad (2-75)$$

Также можно рассчитать связность координат по структурной схеме рис. 2.17:

$$\varepsilon_{12}(p) = W_2(p)L_{12}(p) = \frac{W_{12}(p)}{W_{11}(p)}. \quad (2-76)$$

Из соотношений (2-75) и (2-76) следует, что логарифмические частотные характеристики $L_{mj}(p)$ и $\varepsilon_{mj}(p)$ могут быть получены расчетом:

$$\lg L_{mj}(j\omega) = \lg W_{mj}(j\omega) - 2 \lg W_{mm}(j\omega) \quad \text{и} \quad \lg \varepsilon(j\omega) = \lg W_{mj}(j\omega) - \lg W_{mm}(j\omega) \quad (2-77)$$

Экспериментальное определение пространственной передаточной функции реактора на сеточной модели

Однако элементы передаточной матрицы, найденные из уравнений (2-71), являются настолько громоздкими, что им трудно дать физическое обоснование, и потому для целей синтеза системы управления нейтронным полем они малопригодны. Поэтому можно использовать экспериментальные методы анализа, базирующиеся на методах локальной кинетики, позволяющих получить приемлемое по точности и разумное по затратам описание реактора как многомерного объекта управления. При этом можно использовать как частотные динамические характеристики, так и спектральные и корреляционные характеристики.

Схема эксперимента по определению передаточной пространственной функции реактора на сеточной динамической модели представлена на рис. 2.18. Сигнал с низкочастотного генератора периодических колебаний (НГПК) подается в определенную точку сетки тепловых нейтронов через согласующий усилитель. Выходной сигнал снимается с узлов сетки тепловых нейтронов и усредняется по показаниям детекторов контроля, расположенных либо в точках модели отражателя, либо в точках активной зоны. Схема включает также компенсационный выпрямитель (КВ) для компенсации постоянной составляющей, двойной пиковый вольтметр (ДПВ) и низкочастотный фазометр (НФ). Диапазон частот выбирался в пределах от 0.01 до 15 герц в соответствии с частотным диапазоном реактора. В области частот, меньших 1 герца, где имеется излом частотной характеристики, интервал между рабочими частотами был выбран меньшим, чем в области средних частот.

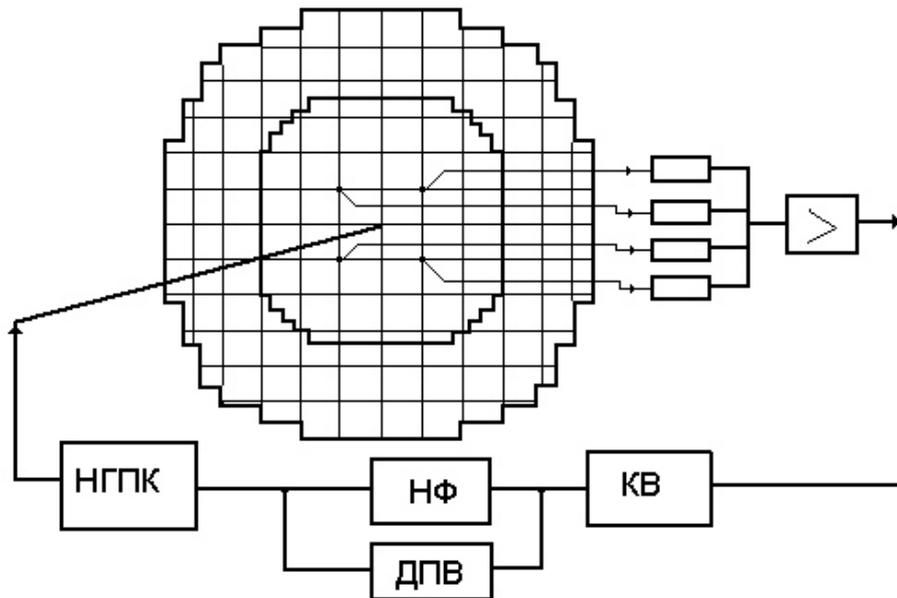


Рис. 2.18. Схема эксперимента по определению частотных характеристик сеточной модели

На второй вход согласующего усилителя подается отрицательное смещение для компенсации нелинейности реактора (на схеме не показано). Известно, что при внесении периодического сигнала реактивности достаточно большой амплитуды колебания плотности нейтронов возрастают по экспоненциальному закону так, что приращения потока увеличиваются во времени относительно начальной плотности потока, которая также не остается постоянной. Каждому периоду колебаний соответствует новый уровень потока нейтронов, причем меняется величина приращения мощности за период. Поэтому величина внешнего возмущения реактивности должна быть достаточно малой, чтобы модель можно было рассматривать как линейную систему, а для поддержания среднего значения потока на постоянном уровне необходимо, чтобы вносимая реактивность содержала отрицательную постоянную составляющую.[22]. При этом во время существования вынужденных колебаний в реакторе не происходит изменения среднего уровня плотности нейтронного потока, и он остается постоянным после окончания переходных процессов. Схема сеточной модели с указанием геометрии потенциометров регулируемой утечки («стержней управления») приведена на рис. 2.19.

С помощью потенциометров утечки устанавливалось равномерное распределение потенциала на сетке тепловых нейтронов, которое поддерживалось постоянным при проведении эксперимента.

На рис. 2.20 приведены экспериментальные частотные характеристики, полученные на сеточной модели при различном удалении точек

контроля от центра активной зоны, куда подавались возмущения. При определении частотных характеристик реактора в целом детекторы были расположены в точках модели отражателя на расстоянии 9 шагов решетки от центра активной зоны. Характеристика ЛЧХ № 1 получена на удалении датчиков на 1 шаг решетки каналов от центра, № 2 – на удалении датчиков на 4 шага решетки, № 3 – на удалении на 9 шагов решетки (практически в отражателе реактора).

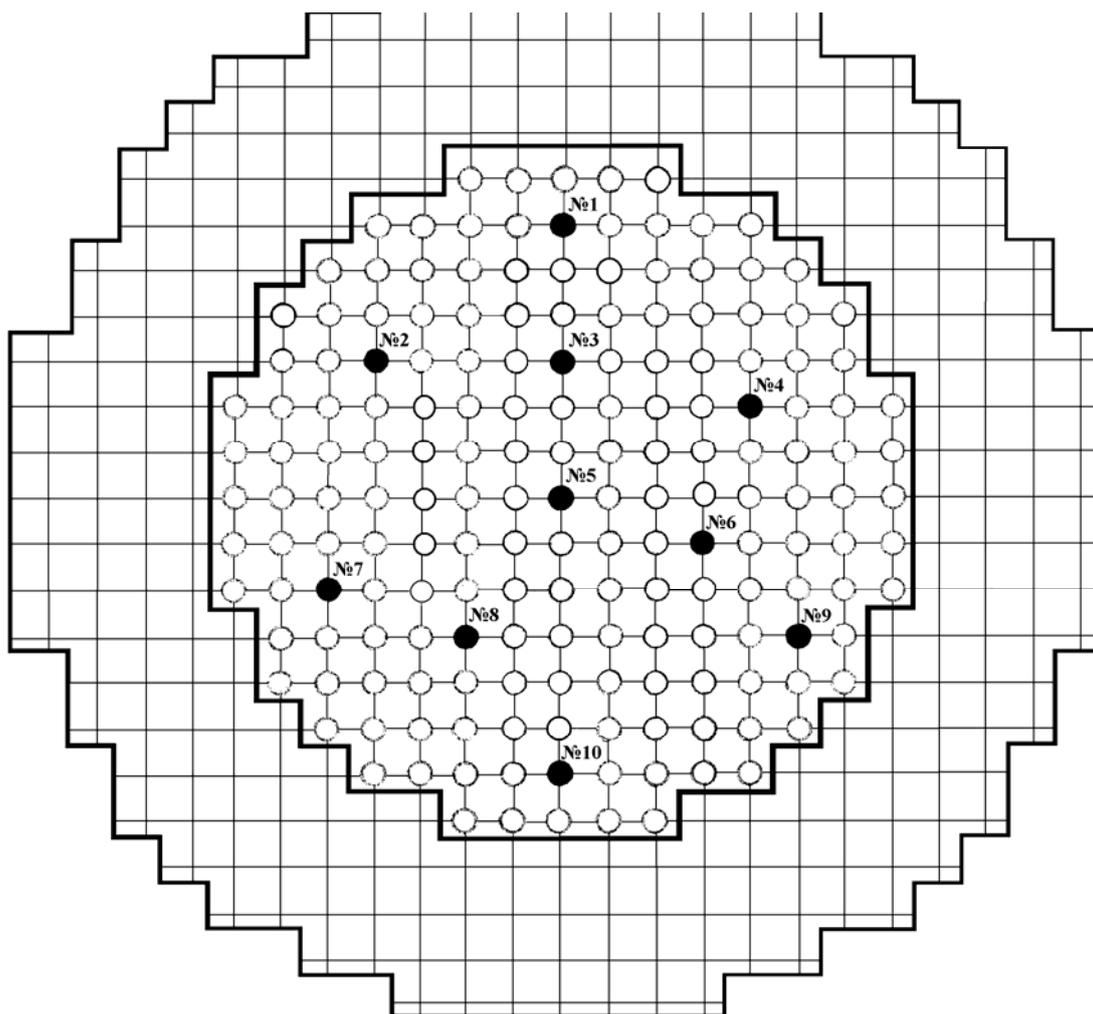


Рис. 2.19. Схема сеточной модели с указанием геометрии стержней управления

Сравнение характеристик показывает, что динамические свойства отдельной части активной зоны подобны динамическим свойствам всего реактора, то есть отдельная область активной зоны, трактуемая нами как область управления локальной системы регулирования, может быть описана с учетом одной усредненной группы запаздывающих нейтронов передаточной функцией реактора вида:

$$W_R(p) = \frac{K_R \left(\frac{1}{\lambda} p + 1 \right)}{p \left(\frac{l^*}{\lambda l^* + \beta} p + 1 \right)},$$

но с различным коэффициентом усиления.

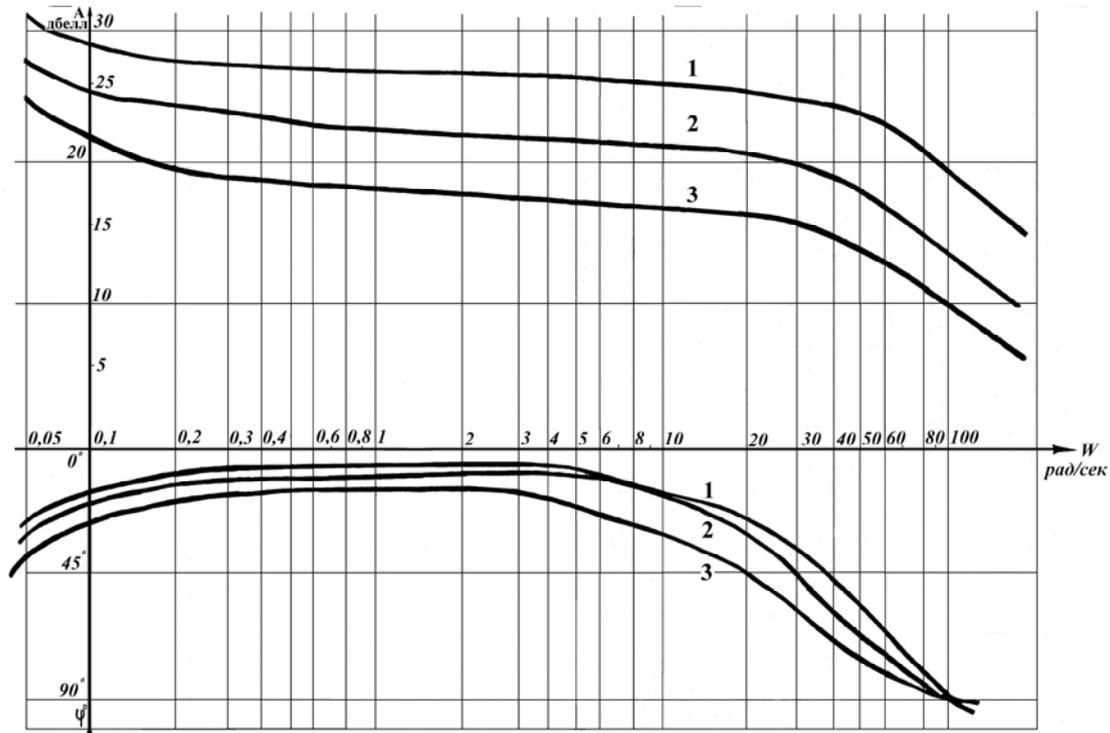


Рис. 2.20. Логарифмические частотные характеристики активной зоны при различном удалении датчиков потока от центра сеточной модели

На рис. 2.21 представлены частотные характеристики взаимосвязи между стержнем № 10, где помещалась точка возмущения реактивности и точками расположения других стержней №№ 1, 2 и 7. Сравнение характеристик показывает, что удаление точки возмущения от зоны реакции детектора прямо отражается на коэффициенте усиления передаточной функции и практически не меняет ее частотных свойств. Чем дальше разнесены точки возмущения и точки контроля, тем меньше коэффициент усиления передаточной функции. При этом потоки в зонах устанавливались одинаковыми.

На рис. 2.22 приведены аналогичные характеристики, полученные при наличии перекоса потоков в зонах на 25 %. Возмущения подавались в ячейку стержня № 10, с большим потоком, а детекторы контроля – в зону стержня № 1 с меньшим значением плотности потока нейтронов (характеристика 2) и наоборот (характеристика 1).

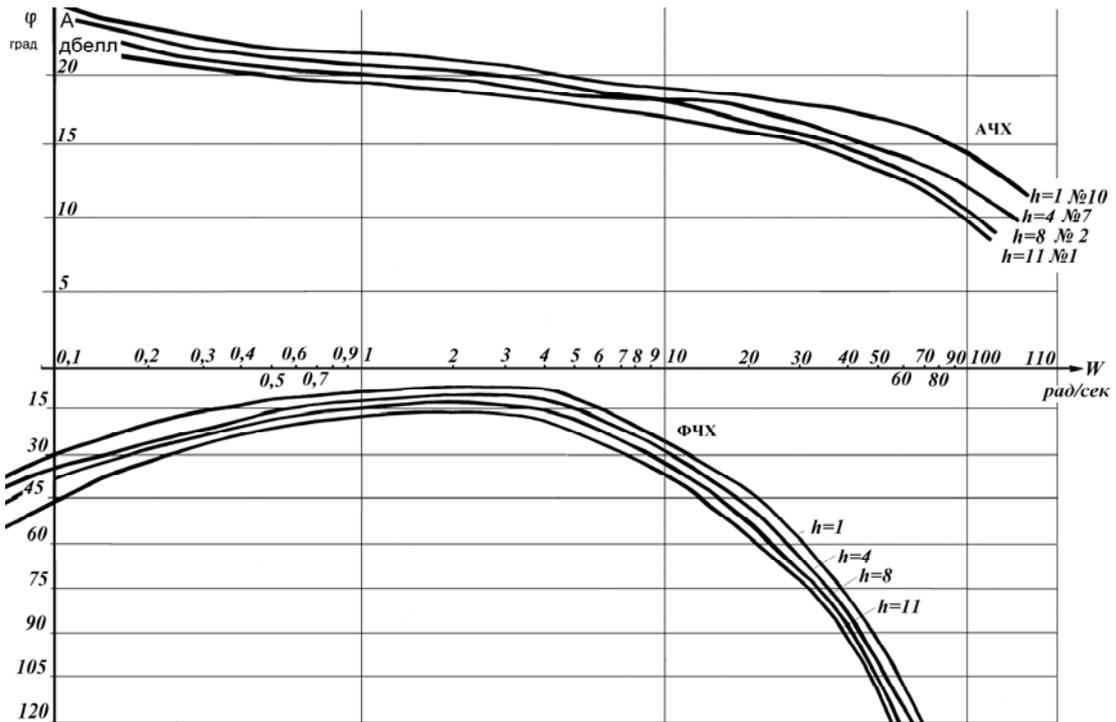


Рис. 2.21. Частотные характеристики взаимной связи зоны стержня № 10 с зонами соседних стержней управления – №№ 4 и 8

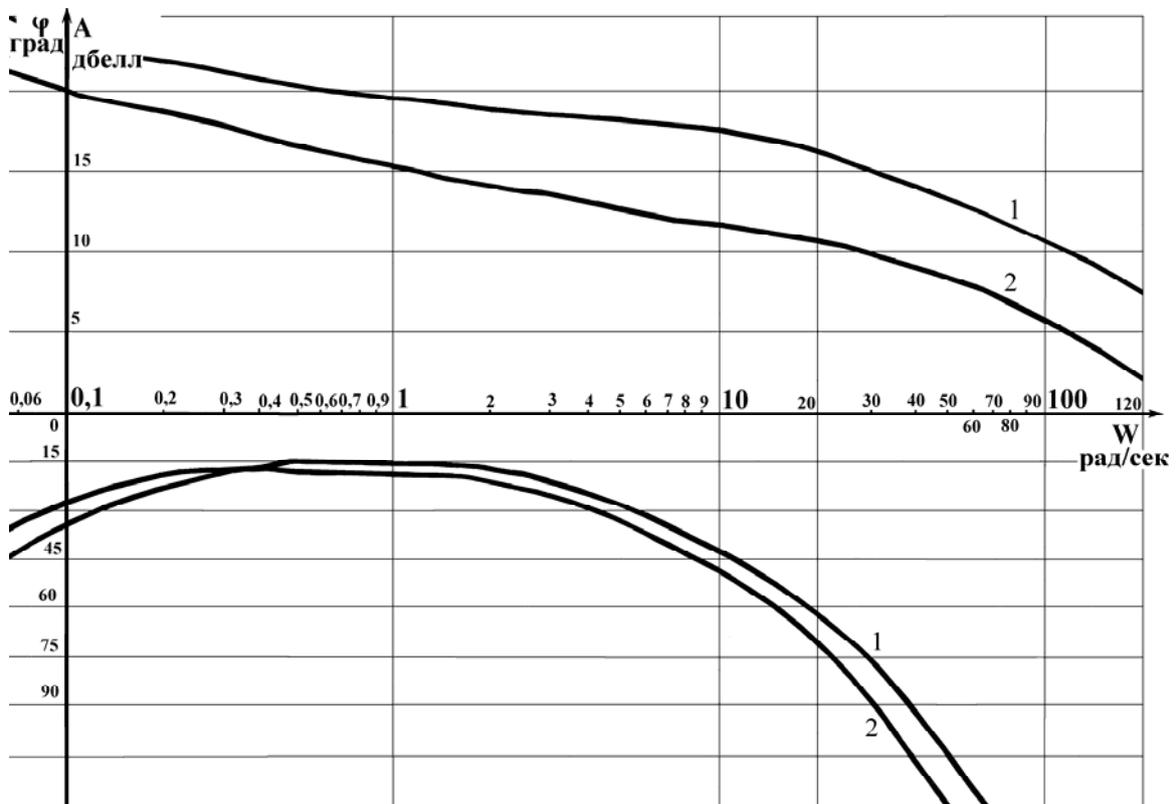


Рис. 2.22. Частотные характеристики сеточной модели реактора при наличии перекоса потока в зонах управления

Датчики в зонах возмущения и контроля были расположены на расстоянии 1 шага решетки каналов от соответствующего стержня. Анализ показывает, что взаимосвязь потоков уменьшается в направлении большего из них и увеличивается в обратном направлении.

Если представить характер взаимодействия зон, как показано на рис. 2.17, то, очевидно, что нельзя непосредственно определить величину динамической взаимосвязи L частотными методами, поскольку точка возмущения и точка контроля реакции системы на него находятся в замкнутом кольце передачи. Но если определить отдельно частотные характеристики отдельных частей его активной зоны $W_{11}(p)$ и $W_{22}(p)$ при одинаковых потоках в зонах, то можно вычитанием логарифмических характеристик по выражению (2-77) получить приближенную частотную характеристику взаимной связи, считая, что $L_{12} \approx L_{21}$. На рис. 2.23 представлены частотные характеристики взаимосвязи, полученные описанным способом для точек расположения стержней №№ 4 и 8 модели.

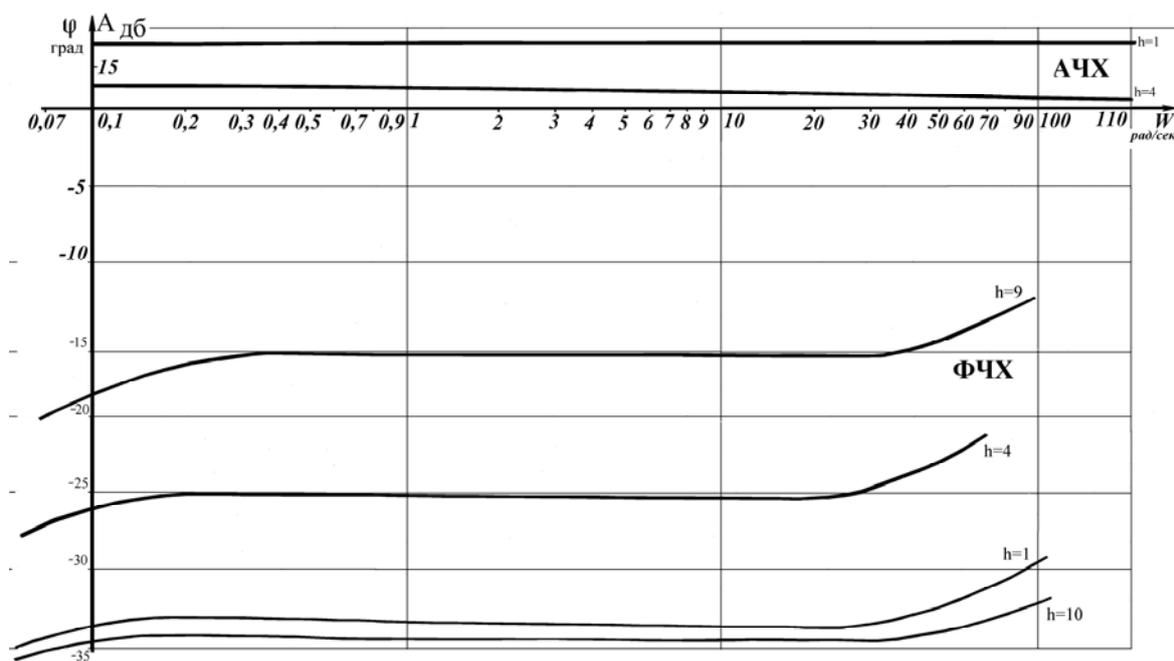


Рис. 2.23. Частотные характеристики взаимосвязи зон управления со стержнями №№ 4 и 8

Осциллятор был помещен в зону стержня № 4, а датчики контроля располагались вокруг стержня № 8 на разном удалении от него: $h=1$ и $h=4$. Здесь же приведены частотные характеристики коэффициента взаимосвязи потока в зоне стержня № 8 и интегрального по реактору

потока, который регистрировался датчиками, расположенными в отражателе на расстоянии $h=9$ шагов решетки от центра модели.

Анализ показывает, что величина коэффициента взаимосвязи потоков в широком диапазоне частот (во всяком случае в пределах частотного диапазона каналов регулирования – от 0.4 до 15 рад/сек) не зависит от частоты и может считаться постоянной величиной, зависящей от расстояния между зонами регулирования и от перекоса потока в них. Однако за пределами этого интервала частот $L_{mj}(j\omega)$ зависят от частоты и имеют вид, обратный частотным характеристикам зон управления. Это подтверждает предположение о дифференцирующем характере операторов взаимосвязи. С удалением от точки внесения возмущения $L_{mj}(j\omega)$ уменьшается по модулю, сохраняя ту же частотную зависимость.

По виду фазовых характеристик можно заключить, что при достаточно большом расстоянии между зонами регулирования (более 10 шагов решетки) постоянное запаздывание при передаче возмущения отсутствует.

Численные значения коэффициентов взаимосвязи зон регулирования являются определяющими при разработке структурной схемы и параметров настройки МСАР распределения плотности нейтронного потока.

Интересно сопоставить эти результаты с известными экспериментами на тяжеловодной сборке «NORA» [3]. Здесь внутри реактора был установлен осциллятор реактивности, который представлял собой вращающийся цилиндр, в боковой поверхности которого было проделано окно. Это окно периодически совпадало с таким же окном, проделанным в боковой поверхности центрального стержня, в котором находился поглотитель нейтронов. Таким образом, при вращении внешнего цилиндра создавались гармонические возмущения реактивности. На постепенном удалении от осциллятора были установлены камеры деления: А, В, С, D для регистрации отклика на возмущение.

По данным эксперимента были построены ЛАЧХ и ЛФЧХ для разной величины удаления датчика от осциллятора. Эти же характеристики были рассчитаны по точечным уравнениям кинетики (рис. 2.24). Эксперимент показал, что расхождение в частотных характеристиках начинается с частоты выше 1 герца. Это значит, что с указанной частоты передаточная функция реактора становится пространственно-зависимой. Видно также, что чем дальше находится датчик от места приложения возмущения, тем меньше опережение по фазе в фазо-частотной характеристике реактора. Другими словами

при удалении датчика от точки приложения возмущения становится меньше постоянная времени реактора по запаздывающим нейтронам в числителе передаточной функции.

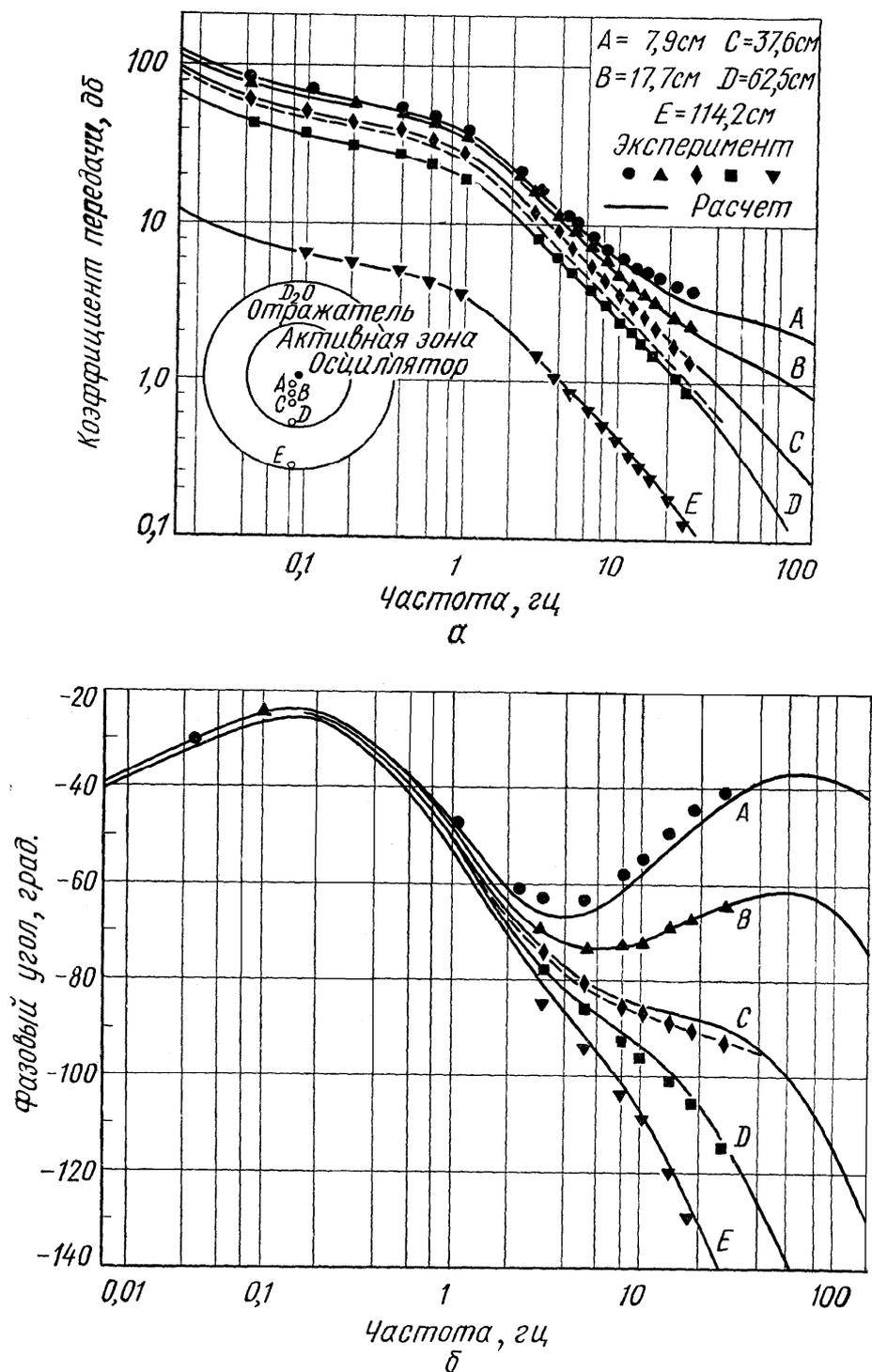


Рис. 2.24. Логарифмические частотные характеристики тяжеловодного реактора NORA

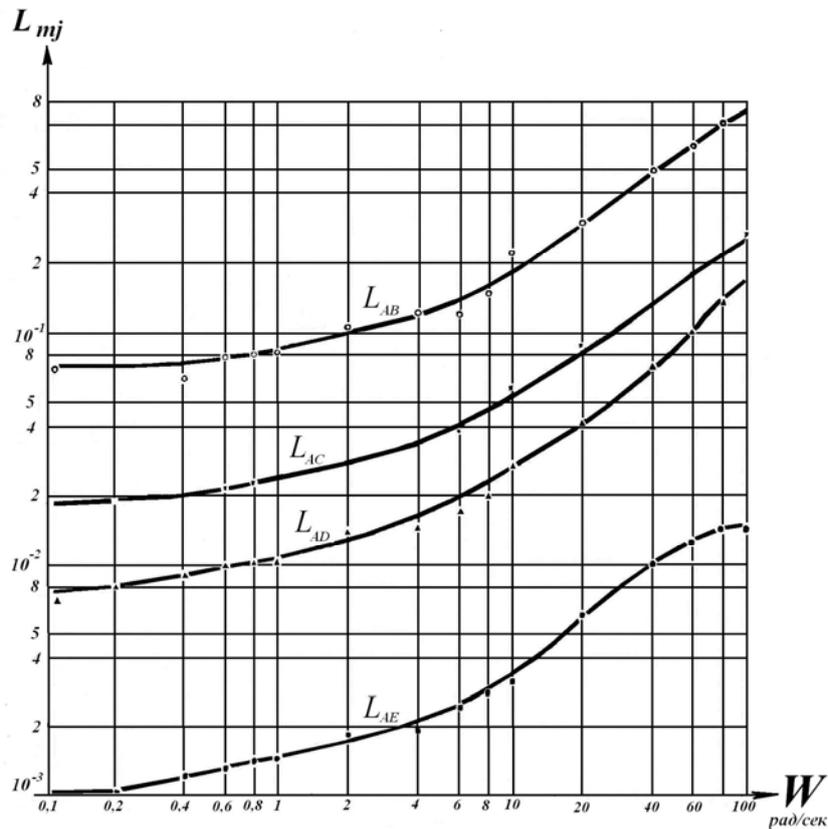
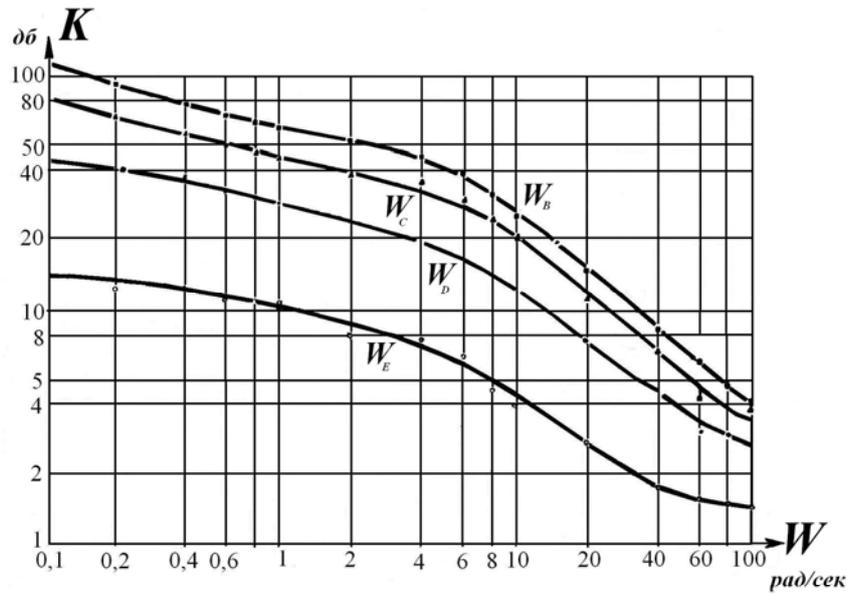


Рис. 2.25. Пространственная передаточная функция $Wj(p)$ и коэффициенты взаимосвязи по реактивности $Lij(p)$ реактора NORA

Если по выражениям (2-75) и (2-76) рассчитать операторы связи $\varepsilon_{mj}(jw)$ и $L_{mj}(jw)$, то оказывается, что и для реактора «NORA» частотные характеристики $W_m(jw)$ и $L_{mj}(jw)$ (рис. 2.25) имеют взаимообрат-

ный вид, а операторы $\varepsilon_{mj}(j\omega)$ в широком диапазоне частот от 0.01 до 40 герц являются частотно-независимыми величинами, убывающими с расстоянием от точки возмущения до датчика (рис. 2.26).

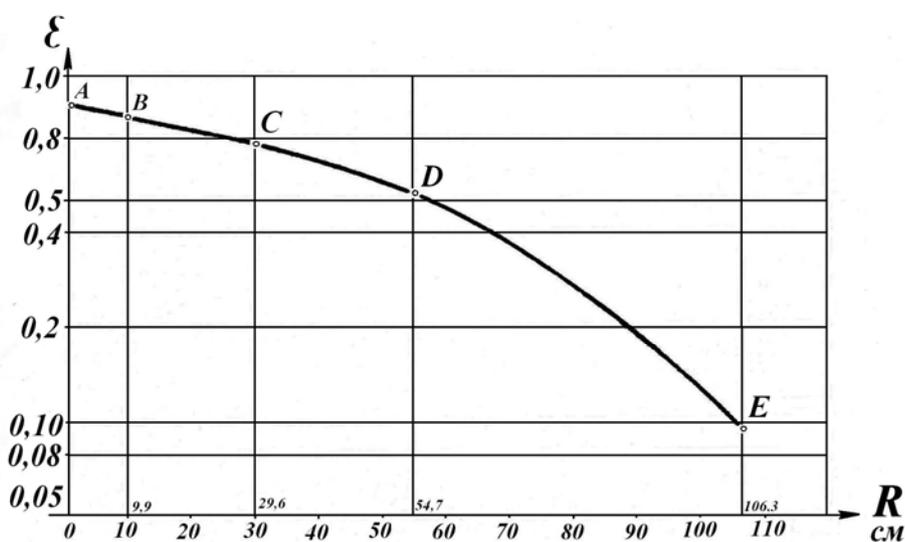
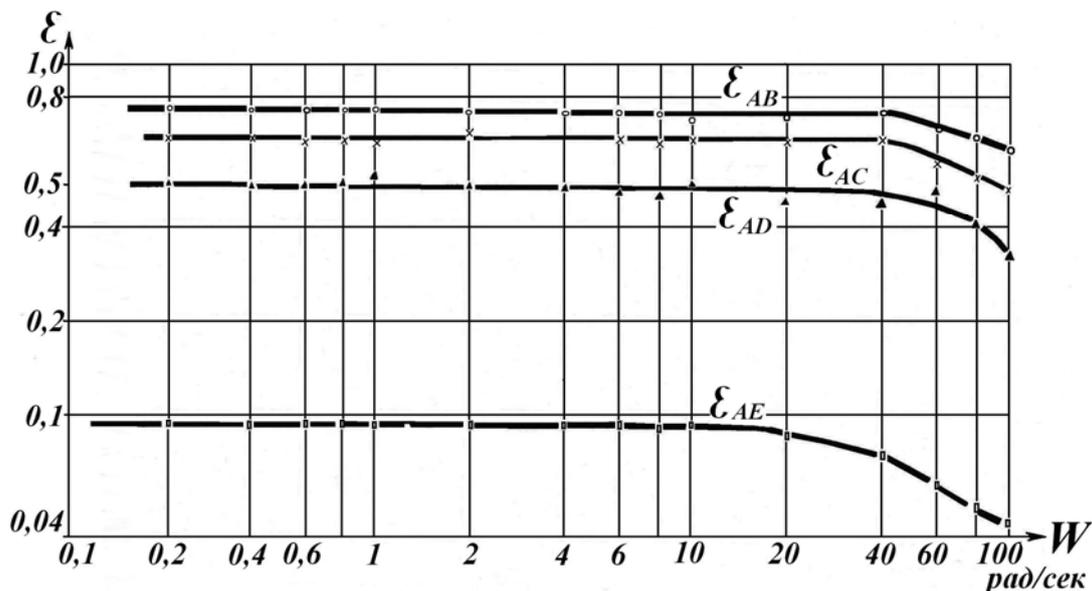


Рис. 2.26. Частотные характеристики $\varepsilon(j\omega)$ взаимосвязи потоков в зонах управления для реактора NORA

Аналогичные результаты были получены нами на ядерном реакторе типа АДЭ. В связи с очевидными трудностями применения частотного метода измерения использовался метод регистрации кривых спада мощности реактора при внесении рампового изменения реактивности (линейного спада плотности потока). Автоматический регулятор

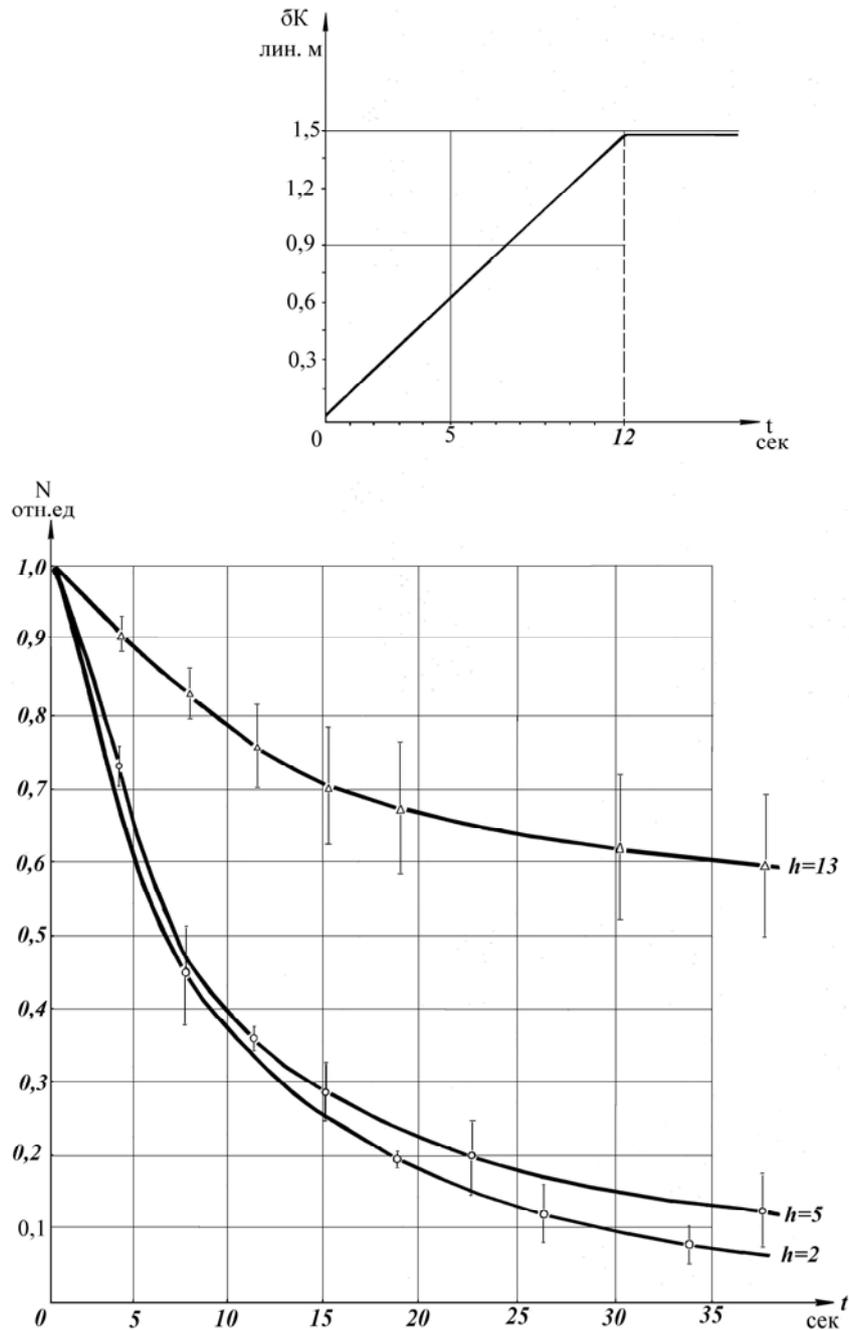


Рис. 2.27. Временные характеристики спада мощности реактора в ответ на рамповое изменение реактивности

на время внесения возмущения отключался, давался ход стержню РР вниз, реакция на возмущение регистрировалась датчиками, расположенными в активной зоне на разном удалении от стержня (использовалось три точки замера). В качестве датчиков внутриреакторного контроля использовались термонейтронные датчики типа ТНД-С, расположенные по центру высоты активной зоны реактора. Запись производилась чувствительными самопишущими потенциометрами и шлейфовым осциллографом. Стержень

ручного управления перемещался с постоянной скоростью на линейном участке своей градуировочной характеристики. Доля внесенной отрицательной реактивности составляла от 0.03β до 0.06β . Вид входного сигнала и временные характеристики спада мощности приведены на рис. 1.27.

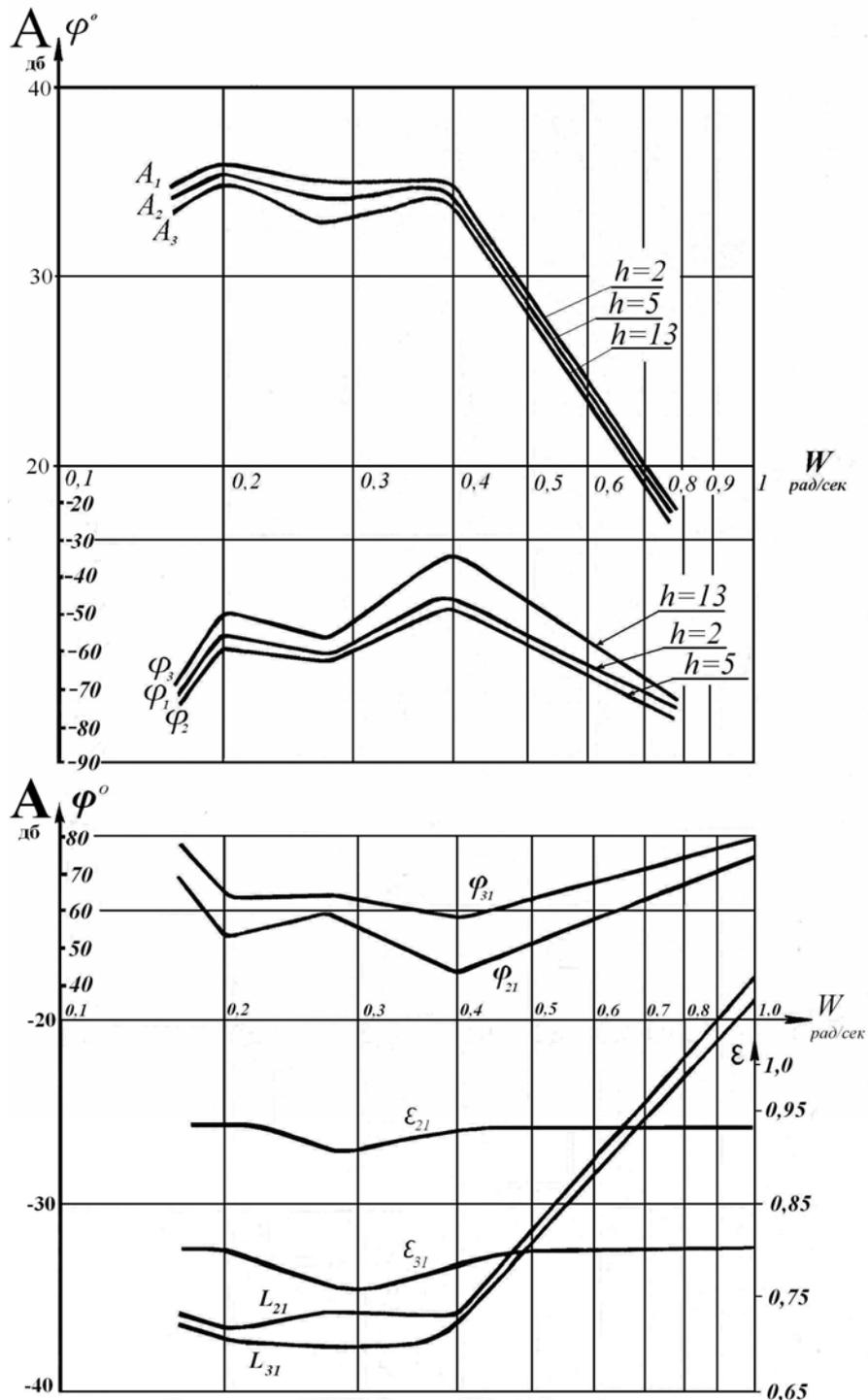


Рис. 2.28. Пространственная передаточная функция, полученная в ходе активного эксперимента на реакторе

Полученные временные характеристики преобразовывались в частотные логарифмические характеристики по методике

Тагаевской А.А. [23]. Зная параметры датчиков ТНД, из полученных ЛЧХ выделялись частотные характеристики собственно реактора, представленные на рис. 1.28.

Определение элементов передаточной матрицы реактора на сеточной модели и на ядерном реакторе

Все многообразие возмущающих факторов, вызывающих изменение плотности нейтронов как в целом по активной зоне, так и в каждой зоне управления, можно характеризовать одним типом входного воздействия по реактивности. Но возмущение по реактивности может быть распределено гомогенно по всей активной зоне, а может быть локализовано в ограниченном объеме. В случае гомогенного возмущения форма распределения плотности нейтронов не отличается от формы стационарного распределения. В [21] показано применительно к большим ядерным реакторам, что при гомогенном внесении возмущения, результаты, получаемые на основе пространственно – временной и точечной кинетики, идентичны. Тогда, нормируя элементы каждого столбца матрицы реактора на соответствующие значения плотности нейтронов в соответствии с выражением передаточной функции точечного реактора:

$$W_m(p) = \frac{\delta N}{N_0 * \delta k}(p) = \frac{p + \lambda}{p(l * p + \beta)} \quad (2-73)$$

можно записать, что при гомогенном возмущении матричное выражение для многомерного реактора будет иметь вид:

$$\overline{\delta N} = W_m(p) * M * \overline{\Delta k} \quad (2-74)$$

где $\overline{M} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ 1 & 1 & \dots & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & 1 & \dots & 1 \end{bmatrix}$

а $W_m(p)$ – скалярная передаточная функция (2-73). Условие гомогенности возмущающего воздействия в данном случае записывается как равенство компонент вектора реактивности: $\Delta k_1 = \Delta k_2 = \dots = \Delta k_n$.

Гомогенное возмущение реактивности, как правило, не является типичным для ядерного реактора. Возмущения по реактивности ограничены в ограниченном объеме. Локализация возмущения приводит к тому, что форма распределения плотности нейтронов возмущенного реактора отличается от формы распределения невозмущенного реактора.

Известно [22], что процесс изменения формы, обусловленный наличием высших гармоник функции распределения, происходит за очень короткий промежуток времени порядка нескольких времен жизни мгновенных нейтронов. После установления новой асимптотической формы дальнейшая динамика характеризуется общим для всей активной зоны периодом. При локализации возмущения в одной или нескольких зонах управления размерность вектора $\overline{\Delta k}$ будет меньше, чем размерность вектора $\overline{\delta N}$, и изменение выходных координат зон управления, где отсутствует собственное возмущение, осуществляется за счет внутренних взаимосвязей в активной зоне. Поэтому запись матричного уравнения $\overline{\delta N} = \overline{G} * \overline{\Delta k}$ в виде (2-74) не отображает процесс изменения формы распределения плотности потока и не может быть использована при синтезе системы управления. Очевидно также, что в реактор могут поступать локальные возмущения, не приводящие к нарушению критичности, но форма распределения потока при этом изменится, то есть изменятся амплитуды потока в зонах с пришедшими возмущениями. Эти возмущения также не могут быть описаны с помощью выражения (2-74). Поэтому трудности чисто аналитического подхода можно обойти с помощью экспериментальных методов.

Структурная схема эксперимента на сеточной модели по определению передаточной матрицы реактора приведена на рис. 2.29. Эксперимент проводился для двух различных геометрий расстановки детекторов, которые показаны на рисунке. Первая геометрия представлена детекторами 12, 11', 13', 14', 15', при этом возмущение вводилось в точку 12. Такая геометрия позволяет оценить количественно расстояние, на котором происходит искажение начальной формы распределения. Вторая геометрия представлена детекторами 11, 12, 13, 14, 15, при этом возмущение вносилось поочередно в точки 11, 12, 14, 15 и переходные процессы фиксировались во всех пяти точках одновременно. Форма распределения и уровень мощности на модели перед каждым опытом были идентичными. Восстановление начальных условий осуществлялось с помощью стержня управления, расположенного в центре плато модели. Положение остальных стержней сохранялось неизменным во всех опытах. Модель выводилась в критическое состояние, затем один из потенциометров утечки, моделирующий внесение возмущения, резко выводился в новое положение и регистрировался отклик на возмущение одновременно со всех датчиков контроля. Относительное амплитудное значение измеряемого параметра $\delta N = \frac{N_i - N_{i0}}{N_{i0}}$ фиксировалось в момент

времени $t=0.3$ с, считая, что за это время процесс установления новой

формы закончился. Результаты вычислений по опытам первой геометрии представлены в табл. 1, а для второй геометрии в табл. 2.

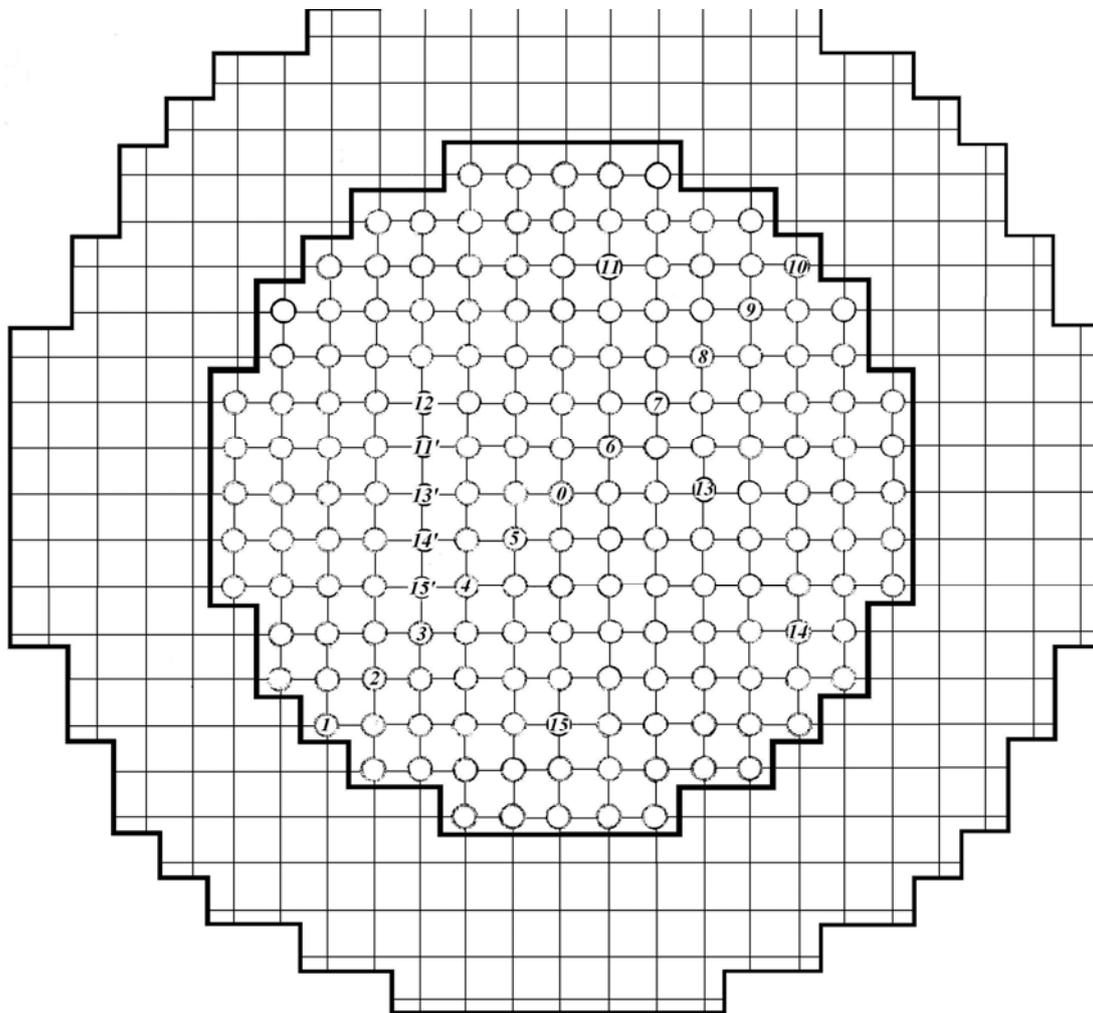


Рис. 2.29. Схема эксперимента на модели по определению коэффициентов взаимосвязи между зонами управления

Проведенный на сеточной модели активный эксперимент можно использовать для определения элементов передаточной матрицы \bar{H} реактора. Поскольку нам известно, что в короткий начальный момент времени после внесения возмущения происходит изменение формы распределения потока за счет высших гармоник, то отклик модели на возмущение реактивности фиксируем в момент времени $t = 0,3$ секунды, считая, что к этому времени достигнута новая форма распределения. В результате мы должны получить информацию о динамике изменения формы за счет высших гармоник (второе слагаемое адиабатической матрицы реактора $\sum_{j=1}^{\infty} A_j * W_j(p)$). Нормированные отклонения потока

в зонах управления, вычисленные по формуле: $\frac{N_i - N_{io}}{N_{io}}$ приведены

в табл. 1 и 2.

где N_i – значение потока в зоне i после внесения возмущения; N_{io} – начальное значение потока в этой же зоне до внесения возмущения.

Таблица 1

Номер координаты	12	11'	13'	14'	15'
N_{io} [абс.ед.]	78	78	78	78	78
ΔNi [отн. ед.]	0,576	0,346	0,211	0,195	0,193

Таблица 2

Номер координаты	N_{io} [абс.ед.]	$\Delta Ni = \delta Ni / N_{io}$			
		Возмущение в точке 11	Возмущение в точке 12	Возмущение в точке 14	Возмущение в точке 15
11	43	0,534	0,197	0,023	0,091
12	78	0,058	0,576	0,023	0,092
13	52	0,057	0,195	0,024	0,094
14	35	0,057	0,194	0,514	0,096
15	63	0,055	0,191	0,023	0,571

Введем в рассмотрение величину, характеризующую связь потоков в зонах управления:

$$L_{ji} = \frac{\delta N_j}{\delta N_i}, \quad (2-78)$$

где: δN_j – безразмерное отклонение потока в зоне измерения отклика на возмущение; δN_i – то же для зоны, где вносится возмущение.

Тогда L_{ji} можно назвать коэффициентом передачи реактора между точкой приложения возмущения и точками контроля отклика на это возмущение. Очевидно, что $L_{ii} = 1$. По данным табл. 1 и четвертого столбца табл. 2 построим зависимость L (r), которая приведена на рис. 2.30. Видно, что для всех точек пространства активной зоны, которые удалены от точки возмущения на расстояние больше $3 \div 4$ шагов решетки, величина L практически постоянна и, как видно из данных

табл. 2, зависит от значения потока в месте внесения локального возмущения. Этот результат позволяет сделать вывод о том, что при локальном возмущении реактивности существенное искажение формы распределения нейтронного потока происходит на незначительном расстоянии от точки приложения локального возмущения. Отметим, что этот факт накладывает ограничения на взаимное положение датчиков потока и стержней регулирования в каналах ЛАР при решении задачи автоматического регулирования формы распределения.

Анализ данных табл. 2 показывает, что величина коэффициента взаимосвязи зависит от значения плотности нейтронного потока в месте внесения локального возмущения. Кривая этой зависимости показана на рис. 2.30, она построена по данным табл. 2.

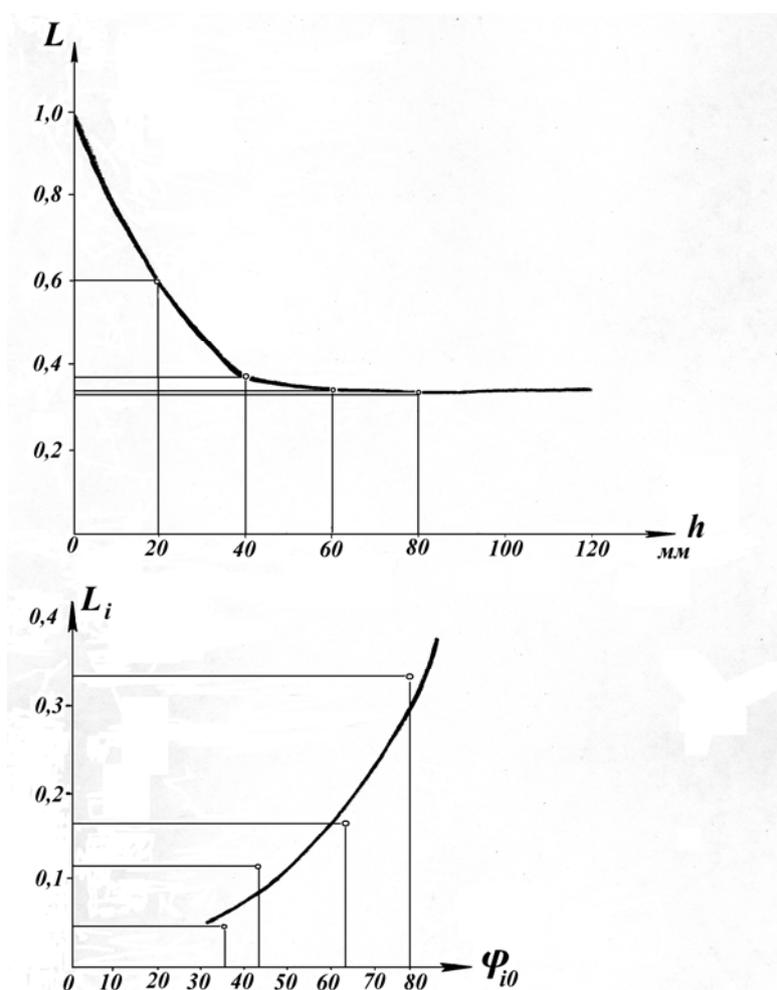


Рис. 2.30. Зависимость коэффициента взаимосвязи от точки приложения возмущения по реактивности

Поскольку значения нормированных отклонений потока вычислялись для очень короткого промежутка времени $t = 0.3$ с, то можно счи-

тать, что концентрация ядер-излучателей запаздывающих нейтронов осталась без изменения. Тогда можно утверждать, что в каждой зоне управления действует источник нейтронов постоянной мощности S_i :

$$\frac{dC}{dt} = 0 = \frac{\beta}{l^*} N_{i0} - \lambda C; \quad S_i = \lambda C = \frac{\beta}{l^*} N_{i0}. \quad (2-79)$$

Тогда приближенно динамику изменения плотности нейтронов в i -й зоне управления можно описать уравнением, подобным точечному уравнению кинетики:

$$\frac{dN_i}{dt} = \frac{\delta K_i + \sum_j L_{ji} \delta K_j - \beta}{l^*} N_i + \frac{\beta}{l^*} N_{i0}. \quad (2-80)$$

В уравнении (2-80) величина взаимосвязи зон управления в общем случае является функцией расстояния и начальным значением нейтронного потока. Так как при обработке опытов вычислялись приращения потока, нормированные на начальное значение N_{j0} в соответствующей точке, то L_{ji} зависит не от амплитудного значения N_{j0} , а от его относительного значения, то есть совокупность коэффициентов взаимосвязи определяется начальной формой распределения нейтронного потока. Предполагая, что детекторы различных зон управления расположены на достаточно больших расстояниях друг от друга (более 3–4 шагов решетки технологических каналов), в уравнении (1-80) пространственной зависимостью L_{ji} можно пренебречь, и следовательно, считать что система симметрична, то есть $L_{ji} = L_{ij}$. Линеаризуем (2-80), применяем преобразование Лапласа и получаем:

$$\frac{\Delta N_i}{N_{i0}}(p) = \frac{1}{l^* p + \beta} * \left[\delta K_i(p) + \sum_{j=1} L_{ji} \delta K_j \right]. \quad (2-81)$$

При выводе (2-81) учитывалось, что

$$\frac{\Delta N_i [\Delta k_i + \sum_j L_{ji} \Delta k_j]}{l^*} \ll \frac{N_{i0} [\Delta k_i + \sum_j L_{ji} \Delta k_j]}{l^*}.$$

Уравнение (2-81) приближенно определяет динамику изменения мощности в i -й зоне управления в начальный момент после внесения возмущения. Записывая систему таких же уравнений для всех зон, по-

лучаем матричное уравнение реактора, справедливое для временного интервала от 0 до 0,3 сек:

$$\bar{N}(p) = V(p) * \bar{B} * \bar{\delta K}(p), \quad (2-82)$$

где $V(p) = \frac{1}{l^* p + \beta}$ – скалярная передаточная функция;

$$\bar{B}(p) = \begin{bmatrix} 1 & L_{12} & L_{13} & L_{1n} \\ L_{21} & 1 & L_{23} & L_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ L_{n1} & L_{n2} & L_{n3} & 1 \end{bmatrix} \text{ – числовая матрица коэффициентов, харак-}$$

теризующая взаимосвязи зон управления в начальный момент времени до $t = 0.3$ сек.

Важно, что коэффициенты матрицы взаимосвязи \bar{B} могут быть определены с помощью указанных экспериментов на сеточной модели реактора, либо на самом реакторе.

Далее определим второе слагаемое передаточной матрицы реактора, определяющее динамику распределения потока, начиная с момента $t = 0.3$ сек. Для этого представим передаточную функцию точечного реактора (для усредненной группы запаздывающих нейтронов) в виде суммы двух слагаемых [12]:

$$W_0(p) = \frac{\delta N / N_0}{\delta K}(p) = \frac{K_r (T_1 p + 1)}{p (T_2 p + 1)} = \frac{p + \lambda}{p (l^* p + \beta + l^* \lambda)} = \frac{1}{l^* p + \beta} + \frac{\lambda}{p (l^* p + \beta)}. \quad (2-83)$$

Величиной $l^* \lambda$ можно пренебречь, так как она много меньше β . Тогда первое слагаемое характеризует динамику точечного реактора в начальный момент после возмущения, так как она совпадает по виду с передаточной функцией $V(p)$, а второе слагаемое должно описывать изменение потока в активной зоне после установления новой формы. Мы знаем, что динамика этого процесса определяется нулевой гармоникой, то есть поток во всех точках активной зоны меняется с одинаковым периодом. Поэтому динамику реактора после достижения установившегося периода можно описать матричным уравнением:

$$\bar{N}(p) = U(p) * \bar{M} * \bar{\delta K}(p), \quad (2-84)$$

где $U(p) = \frac{\lambda}{p(l^* p + \beta)}$ – скалярная передаточная функция; $\bar{M} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$ –

матрица взаимосвязи зон управления после установления новой формы распределения.

Суммируя уравнения (2-82) и (2-84) по аналогии с адиабатической передаточной функцией, получаем матричное уравнение многомерного реактора:

$$\bar{N}(p) = [V(p) * \bar{B} + U(p) * \bar{M}] * \bar{\delta K}(p); \quad (2-85)$$

или

$$\bar{N}(p) = \bar{H}(p) * \bar{\delta K}(p);$$

По выражению (2-85) находим передаточные функции коэффициентов матрицы \bar{H} .

$$H_{ii}(p) = \frac{p + \lambda}{p \left(l_{эфф} p + \beta \right)} \quad (2-86)$$

– для диагональных элементов, которые определяют передаточные функции самих зон управления;

$$H_{ij}(p) = \frac{L_{ij} p + \lambda}{p \left(l_{эфф} p + \beta \right)} \quad (2-87)$$

– для недиагональных коэффициентов, которые определяют передаточные функции взаимных связей зон управления в реакторе.

Отметим, что постоянные времени по запаздывающим нейтронам в числителе выражения прямо пропорциональны коэффициентам взаимосвязи зон управления, то есть они будут увеличиваться с удалением датчика от точки приложения возмущения.

В заключение напомним, что матрица коэффициентов взаимосвязи \bar{B} определяется начальной формой распределения потока. Предполагая, что детекторы контроля плотности нейтронов в зонах управления удалены друг от друга на достаточное расстояние, можно пренебречь зависимостью от расстояния, и тогда вид числовой матрицы \bar{B} в уравнении

(9) определяется только начальной формой распределения. Матрица \bar{B} становится симметричной, ее недиагональные элементы являются одинаковыми и удовлетворяют условию: $0 \leq L_{ij} \leq 1$.

Таким образом, рассматривая реактор как многомерный управляемый объект, приходим к выводу, что передаточная матрица реактора зависит от начальной формы распределения плотности нейтронов подобно тому как передаточная функция одномерного управляемого реактора зависит от начального значения уровня плотности нейтронов.

Подтверждением этого являются сравнение экспериментальных (сплошные) и расчетных (пунктирные) кривых изменения $\delta\Phi_i$, приведенных на рис. 2.31.

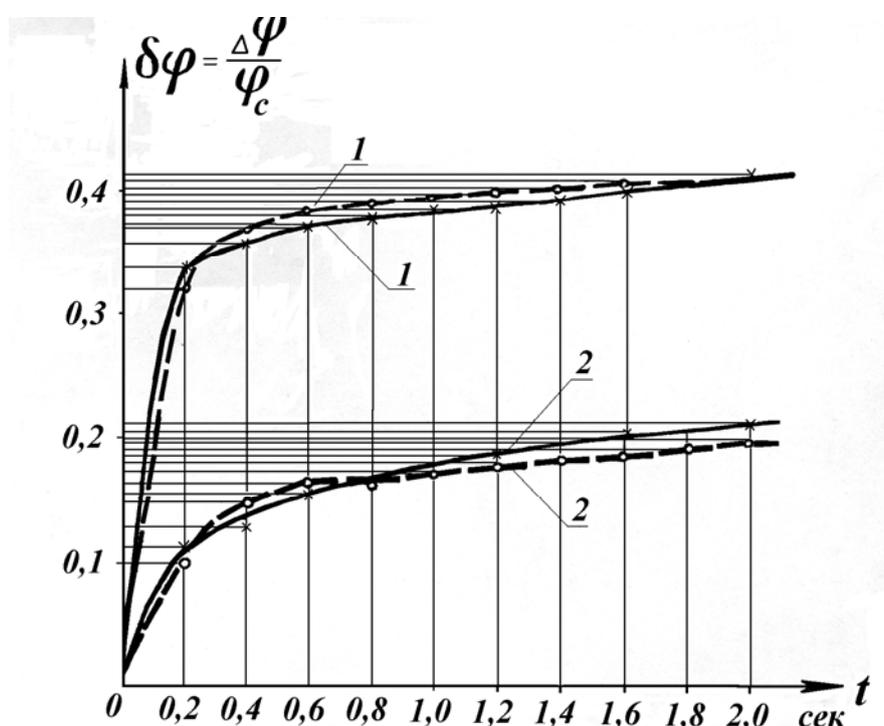


Рис. 2.31. Переходные процессы в соседних зонах управления

Кривые с индексом 1 изображают переходные процессы в точке внесения возмущения (точка 2, геометрия опыта – вторая), а кривые с индексом 2 изображают переходный процесс в точке без собственного возмущения реактивности (точка 4, геометрии – вторая). Видно, что кривые совпадают в пределах погрешностей обработки экспериментальных осциллограмм и погрешности расчетов. Расчетные кривые были построены по выражению (2-87), при этом $L_{21}=0,33$ определялось по данным четвертого столбца табл. 2.

ГЛАВА 3. АНАЛИТИЧЕСКОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ МСАР ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА

Аналитический расчет устойчивости и качества регулирования многосвязных систем вызывает серьезные затруднения даже при небольшом числе каналов регулирования по причине связности каналов через объект. Для линейных МСАР общепризнанной методикой расчета являются различные декомпозиционные приемы, позволяющие заменить исходную систему некоторым эквивалентом, произвести анализ этой эквивалентной системы известными методами классической автоматики, а затем полученные результаты расчета перенести на исходную систему.

При замене исходной многосвязной системы одномерным эквивалентом полученная передаточная функция эквивалентной системы может иметь очень высокий порядок, что затрудняет ее анализ. Однако из теории автоматического управления известно, что в практических задачах переходный процесс в системах с высоким порядком дифференциального уравнения достаточно точно можно заменить переходным процессом уравнения не выше третьего порядка. Аппроксимация решения уравнения высокого порядка решением уравнения низкого порядка осуществляется на основе теории приближения функций. При этом можно трудную задачу аппроксимации решений дифференциальных уравнений заменить более простой задачей аппроксимации изображения функций по Лапласу. Это возможно, так как существует взаимно однозначное соответствие между процессами в пространстве оригиналов и их изображений. Задача анализа ставится так: аппроксимировать сложную передаточную функцию более простой дробно-рациональной функцией с полиномами числителя и знаменателя более низкого порядка. При синтезе системы ставится обратная задача: к простой желаемой передаточной функции системы надо приблизить передаточную функцию синтезируемой системы с высоким порядком уравнения. Приемы приближения функций при анализе и синтезе одни и те же.

При аппроксимации передаточных функций происходит сравнение приближенных аналитических решений и результатов моделирования задачи на ЭВМ, что позволяет осуществить контроль полученного решения в широком диапазоне изменения параметров. Во многих случаях этот перебор параметров можно не делать, а заменить его приближенным аналитическим решением, если в районе некоторых существенных частот системы обеспечить хорошее совпадение результатов моделирования и приближенного аналитического решения.

Рассмотрим два метода приближения функций[12]:

1. производится приближение изображений по Лапласу, при этом не накладывается никаких условий на точность воспроизведения самих оригиналов функций;

2. находится наилучшее приближение изображений, соответствующее минимуму среднеквадратичной ошибки воспроизведения оригиналов функций.

Допустим, что приближаемый процесс описывается изображением по Лапласу вида:

$$W(p) = \frac{M(p)}{N(p)} = \frac{\sum_{i=1}^s C_i * p^i}{\sum_{j=1}^q d_j * p^j}$$

Коэффициенты С и d известны, а s<q. Аппроксимирующий процесс описывается выражением:

$$W_1(p) = \frac{M(p)}{N(p)} = \frac{\sum_{i=1}^n a_i * p^i}{\sum_{j=1}^m b_j * p^j} \text{ где } n < m, n < s, m < q.$$

Число искомых параметров передаточной функции W1(p) равно n+m+2. Будем приближать частотные характеристики в районе нулевой частоты p=0. Тогда уравнения для нахождения коэффициентов а и b получаются приравниванием коэффициентов при одинаковых степенях в выражении:

$$\left(\sum_{i=0}^s c_i * p^i \right) * \left(\sum_{j=0}^m b_j * p^j \right) = \left(\sum_{j=0}^q d_j * p^j \right) * \left(\sum_{i=0}^n a_i * p^i \right)$$

Обычно желаемая передаточная функция всегда может быть сформирована так, чтобы S + m = q + n, и тем самым разность порядков числителя и знаменателя сохранилась бы одинаковой. Тогда получим следующую систему линейных уравнений:

$$\begin{aligned} c_0 * d_0 - d_0 * a_0 &= 0; \\ c_0 * b_1 + c_1 * b_0 - d_0 * a_1 - d_1 * a_0 &= 0; \\ c_0 * b_2 + c_1 * b_1 + c_2 * b_0 - d_0 * a_2 - d_1 * a_1 - d_1 * a_0 &= 0; \\ c_{s-1} * b_m + c_s * b_{m-1} - d_{q-1} * a_n - d_q * a_{n-1} &= 0; \\ c_s * b_m - d_q * a_n &= 0. \end{aligned}$$

Такой метод приближения функций равносильно требованию совпадения $m+n+2$ производных функций в точке $p=0$, включая и нулевую производную. Метод достаточно прост для инженерной практики и обеспечивает приближение оригиналов функций в районе $t \rightarrow \infty$, то есть вблизи положения равновесия. В районе существенных частот совпадение может быть крайне плохим.

Второй способ обеспечивает хорошее приближение в любом диапазоне частот, если приближать мнимые частотные характеристики функций, то есть значения передаточных функций вдоль положительной вещественной полуоси. Так как мнимые частотные характеристики всегда вещественны, то их легко построить для любого диапазона изменения $p = \delta$. Снова полагая, что разность порядков числителя и знаменателя остается неизменной, для нескольких значений δ получаем уравнения:

$$\sum_{i=0}^s c_i * \delta_i^i * \sum_{j=0}^m b_j * \delta_i^j - \sum_{j=0}^q d_j * \delta_i^j * \sum_{i=0}^n a_i * \delta_i^i = 0$$

Если число уравнений равно $r = m + n + 2$, то решение этой системы линейных уравнений дает $m + n + 2$ неизвестных коэффициентов a_i, b_j . Чаше бывает, что $r > m + n + 2$, тогда можно воспользоваться методом наименьших квадратов. При этом исходят из требования минимума выражения:

$$E = \sum_{i=1}^r \left[\sum_{i=0}^s c_i * \delta_i^i * \sum_{j=0}^m b_j * \delta_i^j - \sum_{j=0}^q d_j * \delta_i^j * \sum_{i=0}^n a_i * \delta_i^i \right]^2.$$

Искомые уравнения получают после приравнивания нулю частных производных

$$\frac{\partial E}{\partial a_i} = \frac{\partial E}{\partial b_j} = 0, \quad i = 0, 1, 2, \dots, n; \quad j = 0, 1, 2, \dots, m.$$

ПРИМЕР. [12] Пусть реальный переходный процесс описывается изображением по Лапласу вида:

$$y(p) = \frac{(p+4)}{(0.819E - 3p^3 + 0.0169p^2 + 0.142p + 1)} * x(p) \quad (3-01)$$

где Y – регулируемая величина; X – возмущающая функция.

Мы бы хотели приближенно оценить качество регулирования в нашей МСАР по более простому выражению:

$$y'(p) = \frac{A_1 p + A_0}{B_2 p^2 + B_1 p + 1} * x'(p) \quad (3-02)$$

где коэффициенты $A_0 \dots A_1 \dots B_1 \dots B_2$ необходимо определить по какому либо методу приближения функций. Используем оба метода приближения:

1. приближение частотных характеристик в окрестности нулевой частоты

2. приближение мнимых частотных характеристик в направлении положительной полуоси.

Будем сначала приближать частотные характеристики в районе нулевой частоты $p=0$. Это соответствует приближению оригиналов процессов в районе $t \rightarrow \infty$, то есть вблизи режима затухания процесса. Из условия

$$(p + 4) * (B_2 p^2 + B_1 p + 1) = (0.819E - 3p^3 + 0.0169p^2 + 0.142p + 1) * (A_1 p + A_0) \quad (3-03)$$

приравнивая коэффициенты при одинаковых степенях в левой и правой частях выражения, получаем систему уравнений, из которых находим коэффициенты $A_0 \dots A_1 \dots B_1 \dots B_2$. Подставляя найденные коэффициенты в программу, получаем приближенные переходные процессы в нашей МСАР. Однако приближение в районе существенных частот здесь может быть крайне плохим (рис. 3.01). На рисунке показаны переходные процессы, полученные при единичном ступенчатом входном воздействии (рис. 3.01а) и при единичном импульсном воздействии (рис. 3.01в).

Воспользуемся вторым методом: приближаем мнимые частотные характеристики, при этом удовлетворительное приближение должно быть получено во всем существенном диапазоне частот. Так как мнимые частотные характеристики всегда вещественны, то их можно легко построить для любого диапазона изменения $p = \delta$. Снова полагая, что разность порядков числителя и знаменателя остается неизменной, для нескольких значений δ получаем r уравнений:

$$\sum_{i=0}^S c_i * \delta_i^i * \sum_{j=0}^m b_j * \delta_i^j - \sum_{j=0}^q d_j * \delta_i^j * \sum_{i=0}^n a_i * \delta_i^i = 0 \quad (3-04)$$

Для нашего случая достаточно использовать 3 уравнения (3-04), так как один из коэффициентов, соответствующий совпадению установившихся режимов, мы уже знаем: $a_0 = 4$.

Чтобы составить эти уравнения, необходимо задаться тремя численными значениями оператора $p = \delta$ в области существенных частот системы. Зададим область существенных частот, учитывая, что частота среза системы равна примерно 2 с^{-1} . Задаем значения мнимой ча-

стотной характеристики в окрестности частоты среза: $p_1 = \delta_1 = 1; p_2 = \delta_2 = 2; p_3 = \delta_3 = 3$. Из трех уравнений, соответствующих заданным значениям δ , находим три неизвестных коэффициента: a_1, b_1, b_2 . Подставляя найденные значения в программу, находим приближенные значения переходных процессов в МСАР. Качество приближения к реальному процессу, как видно из рисунка, при использовании приближения мнимых характеристик улучшается.

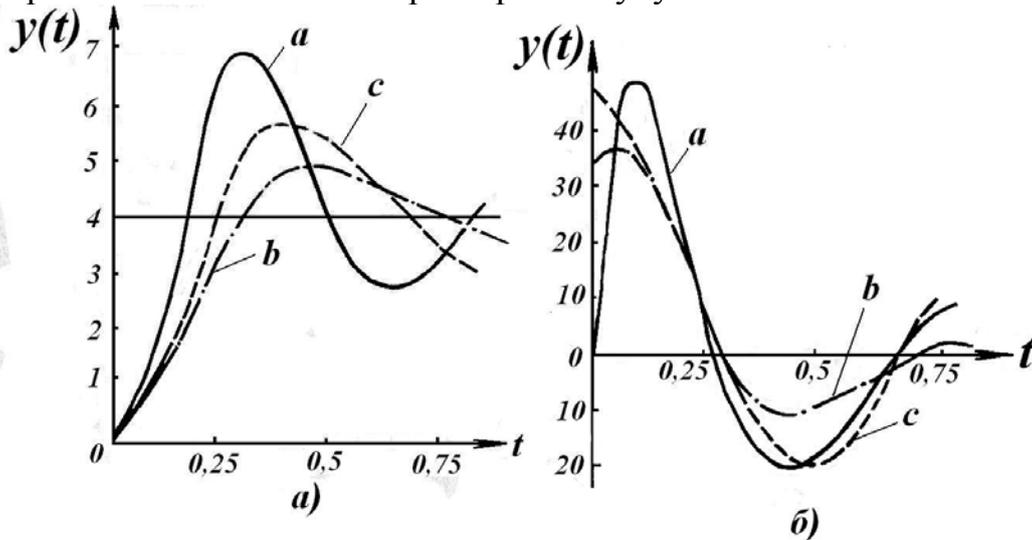


Рис. 3.01. Результаты приближения переходных процессов в МСАР: А – исходный переходный процесс, В – приближение в области нулевой частоты, С – приближение мнимочастотных характеристик

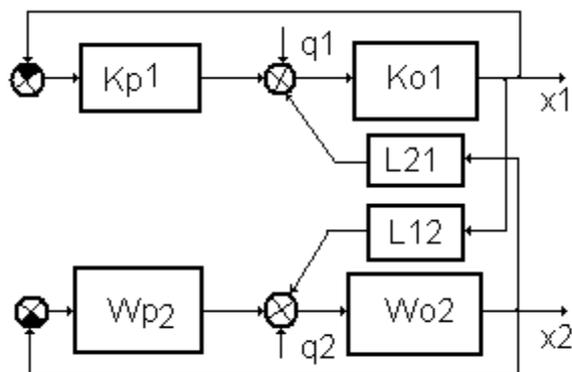


Рис. 3.02. Приближение временно'го разделения каналов управления

Иногда прибегают к очень простому приему эквивалентирования, если быстродействия отдельных каналов МСАР сильно различаются, например, один из каналов имеет очень малую инерционность. Такие системы называют системами с временным разделением каналов регулирования. Быстродействующий канал может считаться во времени раз-

вязанным с остальной частью системы, которая для него будет играть лишь роль источника возмущений. Например, в показанной системе рис. 3.02 первый канал регулирования имеет быстроедействие намного больше, чем второй. Тогда передаточные функции его регулятора и объекта можно принять равными постоянным коэффициентам, и всю систему свести к одномерной, в которой объект регулирования охвачен обратной связью с передаточной функцией:

$$W_{oc}(p) = L_{12}L_{21} * \frac{K_{o1}}{1 + K_{o1}K_{p1}}, \quad (3-05)$$

а на его входе действует приведенное возмущение:

$$q_2^* = q_2 + L_{21} * \frac{K_{o1}}{1 + K_{o1}K_{p1}} q_1.$$

Зная, как изменяется во времени координата

X_2 , можно легко найти переходный процесс для координаты X_1 .

Все рассмотренные методы являются приемами замещения исходной МСАР эквивалентной ей более простой системой.

Для однотипных МСАР, в которой все каналы регулирования одинаковы по техническим и динамическим характеристикам, так называемым однотипным многосвязным системам (МОСАР), можно указать единый метод эквивалентирования – метод декомпозиции.

Поскольку локальные каналы регулирования формы распределения нейтронного потока являются однотипными, рассмотрим применение этого метода для аналитического расчета параметров настройки каналов. Суть метода сводится к разбиению сложной взаимосвязанной системы однотипных каналов, регулирующих величины одной физической природы, на несколько эквивалентных несвязанных или односторонне связанных каналов регулирования. Результаты исследования эквивалентных каналов затем легко пересчитываются к исходной МСАР. В качестве динамической модели реактора примем модель слабо-связанных реакторных зон с прямыми взаимосвязями, широко используемую в литературе [20,21]. Например, для трех зон управления имеем:

$$\bar{H} = \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} & H_{13} \\ H_{21} & H_{22} & H_{23} \\ H_{31} & H_{32} & H_{33} \end{bmatrix}$$

где каждый недиагональный элемент $H_{ij}(p)$ определяет передаточную функцию взаимосвязи $M(p)$. Уравнение реактора в матричном виде бу-

дет: $\bar{\Phi} = \bar{H} * \bar{\delta K}$, где $\bar{\Phi}$ – вектор регулируемых значений потока нейтронов, $\bar{\delta K}$ – вектор локальных возмущений реактивности.

Рассмотрим вначале переход к эквивалентной системе в самом общем виде, когда передаточная матрица реактора не является симметричной, то есть $H_{ij}(p) \neq H_{ji}(p)$.

Сначала необходимо путем структурных преобразований привести передаточные матрицы регулятора $R(p)$ и реактора $H(p)$ к диагональному виду, а все перекрестные связи, имеющиеся в системе, свести к объекту регулирования, как показано на рис. 3.03а.

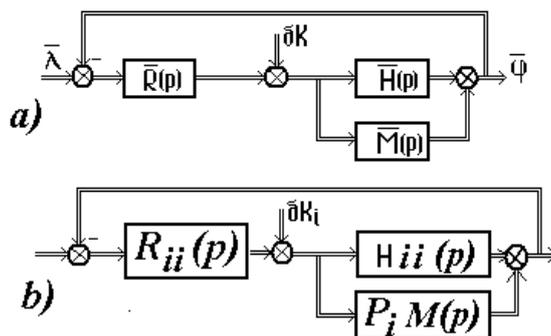


Рис. 3.03. Преобразования структуры одноканальной МСАР при методе декомпозиции

Тогда матрица перекрестных связей будет иметь вид:

$$\bar{M}(p) = \bar{K} * m(p),$$

где $m(p)$ – скалярная передаточная функция взаимосвязей; \bar{K} – вещественная числовая матрица коэффициентов взаимосвязей.

Уравнения движения системы при отсутствии вектора внешних возмущений запишем в матричном виде:

$$[\bar{I} + (\bar{H} + \bar{M})\bar{R}] * \bar{\varphi} = (\bar{H} + \bar{M})\bar{R} * \bar{\lambda} \quad (3-06)$$

Перейдем к эквивалентной системе, в которой каналы регулирования будут независимы друг от друга. С этой целью вводим новый базис координат, связанный со старым невырожденной численной матрицей преобразования \bar{C} :

$$\bar{\Phi} = \bar{C}^{-1} * \bar{\varphi}, \quad \bar{\Lambda} = \bar{C}^{-1} * \bar{\lambda},$$

где \bar{C}^{-1} – произвольная невырожденная матрица преобразования.

Чтобы уравнение не изменилось, на эту же матрицу умножим и разделим все матрицы системы. Таким образом, все матрицы системы мы заменяем на подобные матрицы, имеющие те же собственные числа.

Тогда новая система будет эквивалентна первоначальной, ее уравнение принимает вид:

$$[\bar{I} + (\bar{H}^* + \bar{M}^*)\bar{R}^*]\bar{\Phi} = (\bar{H} + \bar{M}^*)\bar{R}^*\bar{\Lambda}; \quad (3-07)$$

где $\bar{H}^* = \bar{C}^{-1} * \bar{H} * \bar{C} = \bar{H}$; $\bar{R}^* = \bar{C}^{-1} * \bar{R} * \bar{C} = \bar{R}$; $\bar{M}^* = \bar{C}^{-1} * \bar{M} * \bar{C}$; — матрицы, подобные исходным.

Как видим, в эквивалентной системе диагональные матрицы объекта и регулятора не меняют своего вида. Если мы хотим, чтобы и матрица взаимных связей в объекте стала диагональной, то матрицу преобразования, пользуясь произволом ее выбора, необходимо специально подобрать. Если теперь выбрать матрицу преобразования \bar{C}^{-1} так, чтобы матрица перекрестных связей \bar{M} стала диагональной, то матрица объекта регулирования в целом также станет диагональной, и МСАР распадется на N независимых каналов, так как передаточная матрица эквивалентной системы станет диагональной. Анализ такой системы на устойчивость может быть проведен N-кратным применением какого-либо критерия устойчивости к каждому отдельному (сепаратному) каналу (рис. 3.03b), где P_i -собственные числа матрицы взаимосвязей $M(p)$. Если все каналы эквивалентной системы окажутся устойчивыми, то и исходная связанная система будет устойчива.

Обычно в качестве матрицы преобразования применяется матрица канонического базиса матрицы \bar{M} , тогда последняя переходит в простую диагональную форму \bar{M}^* . Так как \bar{C} в этом случае является канонической матрицей подобия, то на диагонали матрицы \bar{M}^* лежат собственные числа матрицы \bar{M} :

$$\bar{M}^* = \bar{C}^{-1} * \bar{M} * \bar{C} = \begin{bmatrix} (N-1)m & 0 & 0 \\ 0 & -m & 0 \\ 0 & 0 & -m \end{bmatrix} \quad (3-08)$$

где $-(N-1)m$ и $-m$ являются собственными числами исходной матрицы M . То есть для симметричной матрицы объекта управления матрица взаимосвязей содержит всего два численных значения собственных чисел. Независимо от количества каналов управления достаточно проанализировать на устойчивость не N каналов МСАР, а всего два, так как для (N-1) канала собственные числа будут одинаковыми.

Для симметричных МОСАР матрица \bar{C} является ортогональной. Для простоты предположим, что распределение потока нейтронов в области зон управления близко к равномерному. В этом случае передаточную матрицу реактора можно считать симметричной, все недиагональ-

ные элементы матрицы, характеризующие взаимосвязь регулируемых координат, одинаковы. Это следует из установленного ранее факта зависимости коэффициентов взаимосвязи каналов от значения плотности потока нейтронов в точке контроля.

Для упрощения анализа симметричных МОСАР вводят понятие о двух родах движения для всех координат объекта: усредненном и относительном. Усредненное движение определяется самым большим по модулю собственным числом $(N-1)m$, а относительные движения соответствуют одинаковым собственным числам $-m$.

Определим усредненное движение как некоторую функцию от среднего значения регулируемых координат, например:

$$\Phi_{уср} = \frac{1}{N} \Phi_i,$$

где N – количество каналов регулирования.

Относительное движение для регулируемых координат определим как разность координат какого-либо канала и воздействий со стороны соседних каналов:

$$\begin{aligned} \Phi_{21отн} &= \Phi_2 - \Phi_1; \\ \Phi_{31отн} &= \Phi_3 - \Phi_1. \end{aligned}$$

Легко убедиться, что исходные переменные Φ_i и новые $\Phi_{iуср}$ и $\Phi_{ijотн}$ эквивалентны друг другу. Действительно любая регулируемая величина может быть представлена через усредненное и относительные движения:

$$\Phi_i = \Phi_{iуср} + \frac{1}{N} \sum_{i=1, i \neq j}^N \Phi_{ijотн}. \quad (3-09)$$

Записывая уравнения объекта в новом базисе координат, передаточную матрицу реактора получаем в виде диагональной матрицы несвязанных между собою координат:

$$\overline{H}_{эkv} = \begin{bmatrix} W + (N-1)m & 0 & 0 \\ 0 & W - m & 0 \\ 0 & 0 & W - m \end{bmatrix}, \quad (3-10)$$

где $W(p)$ – передаточная функция зоны управления реактора, определяемая выражением (1-86). Диагональные элементы этой матрицы представляют собой передаточные функции объекта по усредненному и относительному движениям. Они могут быть легко получены расчетом.

Пример [12]. Определим передаточные функции по усредненному и относительному движениям для реактора, состоящего из трех зон управления, как показано на рис. 3.04. Усредненное и относительные движения определим следующим образом:

$$Y_{уср} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n y_k; \quad X_{уср} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x_k.$$

$$Y_{отн} = y_1 - y_2; \quad Y_{отн} = y_1 - y_3.$$

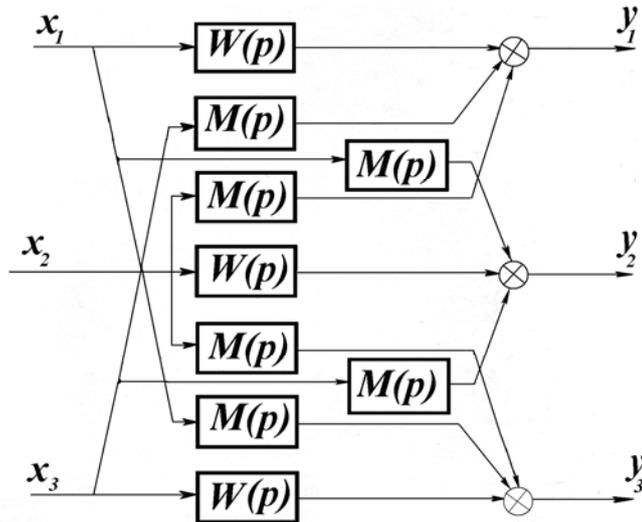


Рис. 3.04. Определение передаточных функций по усредненному и относительному движениям в симметричной МОСАР

Тогда после проведения анализа мы можем вернуться в начальный базис координат:

$$y_k = Y_{уср} + \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y_{kj}^{отн},$$

или для нашей системы: $y_1 = \frac{1}{3}(y_1 + y_2 + y_3) + \frac{1}{3}[(y_1 - y_2) + (y_1 - y_3)]$;

Записываем уравнения движения для каждой выходной координаты объекта и суммируем почленно:

$$y_1 = W(p)x_1 + M(p)(x_1 + x_3);$$

$$y_2 = W(p)x_2 + M(p)(x_1 + x_3);$$

$$y_3 = W(p)x_3 + M(p)(x_1 + x_2);$$

$$\sum_{k=1}^3 y_k = W(p) \sum_{k=1}^3 x_k + M(p) \left[3 \sum_{k=1}^3 x_k - \sum_{k=1}^3 x_k \right].$$

Исходя из определения передаточной функции, находим передаточную функцию объекта по усредненному движению:

$$W_{уср}(p) = \frac{Y_{уср}}{X_{уср}}(p) = [W(p) + (n-1)M(p)].$$

Аналогично поступаем для определения передаточной функции по относительным движениям, только уже не суммируем выходные координаты объекта, а вычитаем из y_1 :

$$y_1 - y_2 = W(p) * (x_1 - x_2) + M(p) * (x_2 - x_1).$$

Поэтому искомая передаточная функция объекта по относительным движениям записывается так:

$$W_{отн}(p) = \frac{Y_{отн}}{X_{отн}}(p) = [W(p) - M(p)].$$

Окончательно записываем:

$$W_{уср}(p) = W - (N-1)m \text{ и } W_{отн}(p) = W - m.$$

Для ядерного реактора, регулируемого по трем зонам управления, соответственно имеем:

$$\overline{H}_{экр} = \begin{bmatrix} H_{11} + 2m & 0 & 0 \\ 0 & H_{22} - m & 0 \\ 0 & 0 & H_{33} - m \end{bmatrix}$$

Вид передаточной матрицы реактора говорит о том, что усредненное и относительные движения являются развязанными относительно друг друга. Следовательно, анализ устойчивости исходной симметричной МОСАР с взаимосвязанными каналами регулирования можно заменить анализом объекта всего по двум несвязанным движениям – усредненному и только одному относительному, поскольку все относительные движения одинаковы:

$$\begin{aligned} \Phi_{iуср} &= (H_{ii} + 2m)\delta K_{iуср}; \\ \Phi_{iотн} &= (H_{ii} - m)\delta K_{iотн}. \end{aligned}$$

Дальнейшие исследования устойчивости и качества регулирования МСАР реактора проводятся известными методами автоматике, а

пересчет результатов на исходные переменные проводится с учетом выражения (3-09).

Таким образом, если удастся представить взаимосвязи координат симметричными, а каналы регулирования – однотипными, имеющими одинаковые динамические характеристики, то можно добиться значительного упрощения расчетов. В этих случаях для упрощения расчета часто используют режим автономного управления, когда относительно несложными преобразованиями изменяют структуру регуляторов так, чтобы взаимосвязи каналов регулирования ослабить в максимальной степени. Анализ и синтез такой автономной системы можно вести обычными способами классической автоматики, не учитывая связность каналов регулирования между собой.

Однако не для всех МСАР стремление к автономной работе каналов является физически оправданным. Это можно наблюдать и для МСАР нейтронного поля ядерного реактора, если интегральную мощность регулировать отдельным регулятором, а распределение потока нейтронов регулировать многомерной подсистемой ЛАР. В этом случае МСАР уже не является однотипной, так как канал регулирования интегральной мощности является более быстродействующим. Здесь логично стремиться к устранению влияния регулятора интегральной мощности на подсистему ЛАР формы, что позволит изменять общую мощность реактора, сохраняя постоянной форму распределения потока. Но устранение обратного влияния регуляторов ЛАР на регулятор интегральной мощности бессмысленно, так как при этом интегральный регулятор перестанет выполнять свою функцию и превратится в один из локальных регуляторов. Таким образом, в этих системах оправдана только односторонняя автономность.

Приведенный метод декомпозиции может быть успешно использован для аналитического расчета однотипных МСАР реактора, состоящей из идентичных каналов регулирования, каждый из которых является равноправным по своему вкладу в решение общей задачи управления. В таких системах нельзя выделить самостоятельный канал регулирования интегральной мощности, так что усредненные движения присутствуют в каждой из регулируемых координат. Подробнее эти системы будут рассмотрены в Главе 5.

Для МСАР реактора с функционально – разделенными каналами анализ усложняется тем, что здесь имеется самостоятельный быстродействующий канал для регулирования средней мощности реактора. Поэтому передаточная матрица реактора в такой системе должна быть представлена как блочная матрица, и встает задача определения передаточной функции реактора по каналу регулирования общей мощности и передаточных функций по однотипным каналам регулирования формы распределения

потока. Поставим задачу определения этих передаточных функций с помощью эквивалентных преобразований исходных координат системы, так как применить метод декомпозиции в чистом виде здесь нельзя.

Пользуясь неоднозначностью выбора собственных чисел матрицы C , выбор матрицы преобразования для симметричной МОСАР можно подчинить дополнительным условиям. Потребуем, чтобы в эквивалентной системе сохранялась неизменной одна из координат, например, Φ_1 . В этом случае каналы регулирования в эквивалентной системе будут взаимосвязаны, однако эту связь можно организовать как однонаправленную. Для этого в матрицу преобразования \bar{C} включим столбец с равными друг другу элементами, а требование ортогональности ему остальных столбцов опустим. В этом случае координата Φ_1 , оставшаяся после преобразования неизменной, будет эквивалентна вектору усредненного движения системы, то есть регулировать интегральную мощность реактора. Она будет испытывать лишь одностороннее воздействие со стороны (N-1) относительных движений.

Следовательно, в качестве матрицы преобразования применим матрицу вида:

$$\bar{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \bar{C}^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Образуем эквивалентную передаточную матрицу реактора:

$$\bar{H}^* = \bar{C}^{-1} * \bar{H} * \bar{C} = \begin{bmatrix} H_{11} + 2M & 0 & 0 \\ 0 & H_{22} - M & 0 \\ 0 & 0 & H_{33} - M \end{bmatrix}$$

Определим компоненты нового базиса координат системы:

$$\bar{C}^{-1} * \bar{\Phi} = \begin{bmatrix} \Phi_1 \\ \Phi_2 - \Phi_1 \\ \Phi_3 - \Phi_1 \end{bmatrix}$$

На рис. 3.05 представлена полученная для нашего случая структурная схема реактора, которая может быть использована для анализа МСАР с функционально – разделенными каналами регулирования. Видно, что в новом базисе координат канал регулирования интегральной мощности Φ_1 имеет передаточную функцию усредненного движе-

ния, а относительные движения содержат составляющую относительно-го движения. Таким образом, в системе с выделенным каналом регулирования среднего значения мощности, связи между ЛАР-ами действуют лишь тогда, когда изменение потока в одной зоне управления начинает отставать или опережать изменение потока в других зонах, то есть когда нарушаются условия критичности. Возникающий при этом синхронизирующий сигнал будет препятствовать расхождению потоков в зонах. Матрица перекрестных связей при этом будет иметь вид [10]:

$$\bar{A} = \begin{bmatrix} N-1 & -1 & -1 \\ -1 & N-1 & -1 \\ -1 & -1 & N-1 \end{bmatrix}$$

а сами перекрестные связи носят название синхронизирующих. Синхронизирующие связи не влияют на усредненное движение, так как передаточная функция объекта по усредненному движению здесь равна передаточной функции объекта в сепаратном канале.

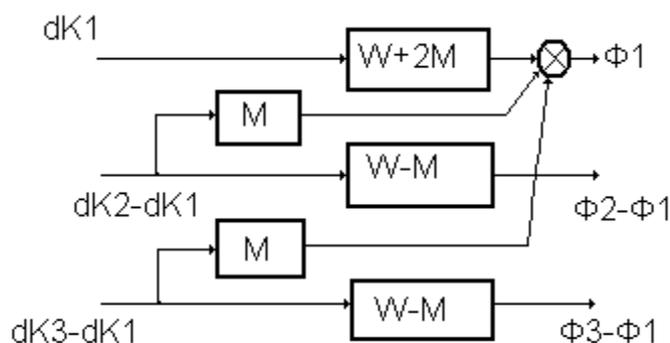


Рис. 3.05. Структурная схема реактора с функционально-разделенными каналами регулирования

В этой же системе с выделенным каналом регулирования среднего существуют перекрестные связи, которые являются результатом действия суммы всех координат объекта, так называемые усредняющие связи на каждый сепаратный канал регулирования формы потока. Усредняющие перекрестные связи не влияют на относительное движение.

Поэтому в МОСАР ядерного реактора, в которых действуют и синхронизирующие и усредняющие связи, при составлении эквивалентной структурной схемы усредненного движения надо учитывать только усредняющие связи, а при составлении структурной схемы относительных движений – учитывать лишь синхронизирующие перекрестные связи.

ГЛАВА 4. МНОГОСВЯЗНЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ МОЩНОСТЬЮ ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА С ФУНКЦИОНАЛЬНЫМ РАЗДЕЛЕНИЕМ КАНАЛОВ

Многосвязная система автоматического регулирования мощностью реактора призвана решать две задачи. С одной стороны она должна обеспечить стабилизацию средней мощности реактора, а с другой стороны – регулировать распределение мощности по пространству активной зоны, то есть регулировать форму нейтронного поля в реакторе. Модель этой двуединой задачи хорошо сформулировал как-то Логиновский Ф.Е.

Представим резиновую подушку, надуваемую воздухом. Поверхность подушки выпуклая. Будем давить пальцами на выпуклую поверхность, стремясь ее выровнять. После некоторой практики нам, вероятно, удастся это сделать. Количество воздуха в подушке осталось прежним, но форма поверхности стала более плоской, то есть выравнивание поверхности произошло не за счет снижения расхода воздуха (интегральный параметр), а за счет его перераспределения между областями объема подушки с помощью давления пальцев (локальные параметры).

Поэтому основной задачей проектирования такой многосвязной системы следует считать установление определенного взаимодействия этих двух подсистем: системы автоматического регулирования интегральной мощности реактора в целом (САР) и локального автоматического регулирования (ЛАР) формы распределения нейтронного потока.

Приведенная модель с подушкой больше подходит для английских газоохлаждаемых реакторов типа Хинкли-Пойнт, у которых регулирование интегральной мощности происходит за счет изменения расхода теплоносителя, а регулирование распределения мощности осуществляется с помощью перемещения поглощающих стержней по показаниям внутриреакторных датчиков температуры в зонах управления. В российских реакторах типа РБМК поглощающие стержни используются и для регулирования интегральной мощности и для регулирования распределения мощности.

Принципиально возможно существование многомерных автоматических систем управления мощностью реактора в виде двух типов:

– МСАР с функционально разделенными подсистемами, когда для регулирования интегральной мощности реактора в целом по всему объему выделяется самостоятельный регулятор (САР), а для управления формой распределения потока создается система регуляторов локального действия (ЛАР). Такая система не может быть однотипной, так как технические ха-

характеристики регуляторов САР и ЛАР не одинаковы. Прежде всего регулятор интегральной мощности должен быть более быстродействующим.

– МСАР с функционально совмещенными подсистемами, когда для регулирования интегральной мощности реактора отдельного регулятора не существует, а его функцию берут на себя все регуляторы ЛАР. Такая система является однотипной, все регуляторы имеют одинаковые технические характеристики и выполняют обе функции совместно.

Совмещение функций стабилизации интегральной мощности реактора и стабилизации формы распределения потока в одном пространственно – распределенном регуляторе возможно. Однако, учитывая двойное назначение системы управления мощностью, которая должна работать в обоих режимах: и стабилизации заданной мощности и слежения за изменением мощности по указанию инженера-оператора, следует признать, что стремление к совмещению функций в одном регуляторе зачастую приводит к противоречивым требованиям к качеству регулирования в отдельных каналах системы. Практически это выливается в то, что приходится либо снижать точность и быстродействие при стабилизации интегральной мощности, либо существенно ограничивать качество выравнивания формы распределения потока.

Поэтому вполне правомерно первые автоматические системы регулирования мощности и ее распределения по объему активной зоны проектировались как системы с функциональным разделением. В этом случае штатный регулятор интегральной мощности входил в МСАР без изменений и к нему добавлялось определенное количество локальных регуляторов для управления формой распределения потока.

Рассмотрим варианты реализации таких систем, которые были разработаны и испытаны на сеточных моделях и действующих реакторах.

4.1. Многосвязная система с временным разделением каналов регулирования

Данная система относится к классу систем с функциональным разделением подсистем, потому что в ней выделен самостоятельный канал регулирования для управления интегральной мощностью реактора, составляющий первую подсистему управления мощностью реактора. Вторую подсистему составляет N-мерная система регулирования формы распределения, состоящая из идентичных замкнутых каналов регулирования (ЛАР). Требования к качеству регулирования интегральной мощности и формы распределения потока значительно разнятся, например, в подсистеме регулирования средней мощности время переходного процесса должно составлять 3–5 секунд, в то время как в подсистеме регулирования формы оно может достигать минуты и более.

Поэтому положительным качеством данной системы является возможность регулирования формы распределения с помощью инерционных внутриреакторных датчиков контроля (ВРК) потока, в отличие от канала регулирования критичности реактора, в качестве которого может быть использован без переделки штатный канал регулирования средней мощности реактора, использующий безинерционные ионизационные камеры. До разработки безинерционных ВРК-датчиков нейтронного потока такая система являлась единственным возможным вариантом автоматического управления нейтронным полем реактора.

Второй положительной особенностью системы является развязка во времени быстродействующего канала системы с подсистемой N инерционных каналов регулирования формы, которые играют для первого лишь роль источников возмущений. В этом случае анализ и синтез быстродействующего канала можно производить вне зависимости от подсистемы инерционных ЛАР-ов.

Принципиальным недостатком системы является снижение надежности работы автоматического регулятора средней мощности реактора, которое будет тем больше, чем большее количество ЛАР формы распределения включено в работу. Однако сокращение числа сепаратных каналов МСАР является нежелательным, так как приводит к уменьшению точности регулирования формы распределения плотности нейтронов.

Было бы целесообразным осуществить синтез такой структуры системы регулирования распределения, которая была бы устойчивой при достаточно больших постоянных времени детекторов внутриреакторного контроля плотности нейтронов и не имела бы ограничений на количество сепаратных каналов.

Пусть один из каналов МСАР реактора работает от безинерционных детекторов, расположенных вне активной зоны (ионизационные камеры располагаются в защите реактора). Этот канал является быстродействующим, в качестве его может быть использован штатный канал регулирования общего уровня мощности реактора без всяких изменений и переделок. Предполагаем, что все местные возмущения реактивности локализуются на достаточно большом расстоянии от ионизационных камер канала регулирования интегральной мощности в области плато распределения нейтронов. Тогда передаточные функции реактора по возмущающему и управляющему воздействиям будут одинаковы.

Остальные $N-1$ каналов регулирования имеют инерционные детекторы плотности нейтронов, расположенные в каналах активной зоны, поэтому по отношению к каналу регулирования общей мощности они проявляют себя как инерционные. Предположим, что точки приложения возмущающего и управляющего воздействия в этих инерционных кана-

лах управления совпадают, то есть внутриреакторные детекторы плотности нейтронов располагаются в непосредственной близости от стержней управления ЛАР-ов. Передаточные функции инерционных каналов полагаем полностью идентичными. Передаточная матрица реактора принята в виде:

$$\bar{G}(p) = \begin{bmatrix} W_{11}(p) & W_{21}(p) \dots & W_{n1}(p) \\ W_{21}(p) & W_{22}(p) \dots & W_{n2}(p) \\ W_{n1}(p) & W_{n2}(p) \dots & W_{nn}(p) \end{bmatrix}$$

где $W_{ii}(p) = \frac{p + \lambda}{p(lp + \beta)}$ – передаточная функция зоны управления;

и $W_{ij}(p) = \frac{L_{ij} p + \lambda}{p(lp + \beta)}$ – передаточная функция взаимосвязи между зонами управления.

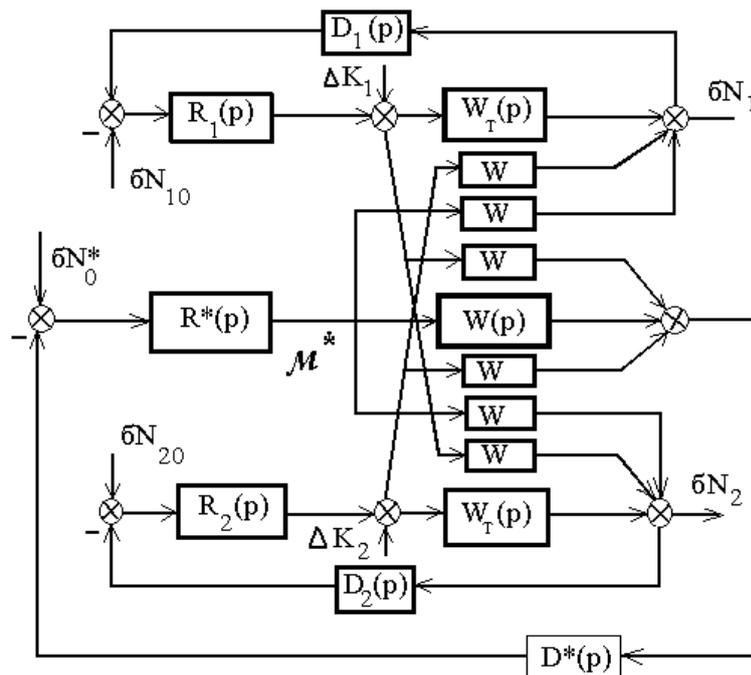


Рис. 4.01. Структурная схема 3-х канальной МСАР с временным разделением каналов регулирования

Структурная схема системы с временным разделением каналов приведена на рис. 4.01. На рисунке обозначены:

δN^* – интегральное значение потока,

δN_1 и δN_2 – регулируемые потоки в зонах ЛАР;

$R^*(p)$, $R_1(p)$ и $R_2(p)$ – передаточные функции регуляторов;

$D^*(p)$, $D1(p)$ и $D2(p)$ – передаточные функции детекторов нейтронов;
 $W(p) = W_{ij}(p)$ – передаточные функции, характеризующие взаимосвязи зон управления в передаточной матрице реактора; как видно из рисунка, в быстродействующем канале передаточная функция реактора также описывается передаточной функцией $W(p)$;

$W_T(p) = W_{ii}(p)$ – передаточные функции реактора в инерционных каналах управления (ЛАР).

В быстродействующем канале системы собственные возмущения реактивности δK отсутствуют и влияние на выходную координату этого канала δN^* осуществляется через перекрестные связи $W(p)$. Эта особенность является следствием принятого допущения о том, что локализация входных возмущений в объекте происходит на достаточно больших расстояниях от детекторов быстродействующего канала.

Система не может быть отнесена к классу однопольных МСАР, поэтому использовать для ее анализа метод декомпозиции нельзя. Но, учитывая разделение во времени быстродействующего канала и каналов регулирования формы распределения, можно заменить исходную систему эквивалентной схемой замещения, показанной на рис. 4.02.

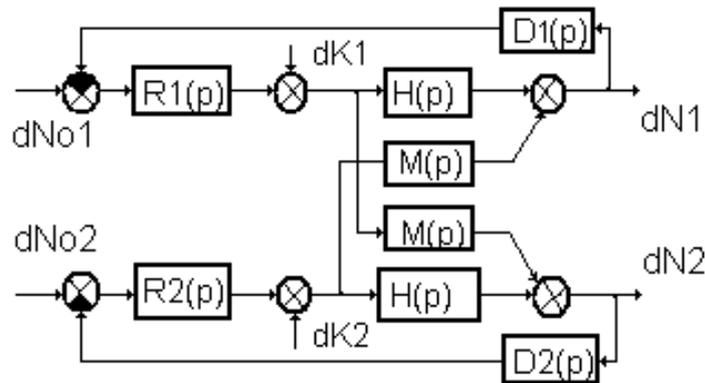


Рис. 4.02. Эквивалентная схема замещения МСАР с временным разделением каналов

Действительно, представляя быстродействующий канал как жесткую обратную связь, охватывающий передаточные функции реактора по инерционным каналам, выражения для передаточных функций системы можно определить, используя правило (3-05):

$$H(p) = W_t(p) - W(p) * \frac{W(p) * D(p) * R(p)}{1 + W(p) * D(p) * R(p)}; \quad (4-01)$$

$$M(p) = W(p) - W(p) * \frac{W(p) * D(p) * R(p)}{1 + W(p) * D(p) * R(p)}. \quad (4-02)$$

Тем самым мы определили эквивалентную систему, в которой сложный объект управления представляет совокупность реактора и быстродействующего канала. Условие инвариантности выходной координаты $\delta N_j(p)$ относительно чужого i -го возмущения $\delta K_i(p)$ можно записать как:

$$W(p) - W(p) * \frac{W(p)D^*(p)R^*(p)}{1 + W(p)D^*(p)R^*(p)} = 0. \quad (4-03)$$

Из структуры исходной системы (рис. 4.01) можно видеть, что выражение:

$$\frac{W(p)D^*(p)R^*(p)}{1 + W(p)D^*(p)R^*(p)} = X(p) \quad (4-04)$$

описывает замкнутую систему регулирования, состоящую из одного быстродействующего канала. Если частоты среза быстродействующего и инерционного каналов сильно различаются, то передаточные функции, входящие в (4-04) можно считать равными постоянным коэффициентам. Полагая систему, описываемую выражением (4-04) астатической, и учитывая ее большое быстродействие, имеем:

$$X = \frac{\mu^*}{\delta K_i} \approx 1. \quad (4-05)$$

Нетрудно видеть, что выполнение равенства (4-05) обеспечивает достижение независимости выходных координат в системе, состоящей из $N-1$ инерционного канала регулирования, относительно несобственных возмущений. Одновременно равенство передаточной функции взаимосвязи $M(p)$ нулю обеспечивает, как видно из структуры рис. 4.02, автономность выходных координат относительно несобственных задающих воздействий δN_0 . Таким образом, наличие быстродействующего канала позволяет представить исходную МСАР как совокупность несвязанных сепаратных каналов, при этом $N-1$ инерционных несвязанных между собой каналов выступают как источники возмущений для быстродействующего канала. Передаточные функции объекта для быстродействующего и инерционного каналов могут быть представлены в этом случае как передаточные функции усредненного и относительного движений:

$$W(p) = \frac{Lp + \lambda}{p(lp + \beta)} \quad (4-06)$$

$$H(p) = \frac{1-L}{lp + \beta}. \quad (4-07)$$

Выполнение условия инвариантности (4-03) осуществляется на основе принципа двухканальности. В данном случае каналом, компенсирующим влияние несобственного возмущения на i -ю выходную координату является быстродействующий канал.

Систему с временным разделением каналов не обязательно формировать с участием быстродействующего штатного канала регулирования средней мощности реактора. Любой из инерционных каналов ЛАР может быть настроен на регулирование средней мощности. Для этого необходимо лишь сделать его инвариантным относительно оставшихся каналов ЛАР, преобразовав его в канал регулирования, допускающий бесконечное увеличение коэффициента усиления регулятора без нарушения устойчивости. Как известно [23], в этом случае он будет инвариантен с точностью до ϵ относительно оставшихся каналов ЛАР.

Проведенный анализ устойчивости показывает, что система с временным разделением каналов устойчива при достаточно больших значениях постоянной времени детекторов и большом количестве отдельных каналов регулирования. Увеличение постоянной времени T_d позволяет увеличивать количество отдельных каналов с целью достижения большей точности регулирования формы распределения.

При определенном увеличении постоянной времени датчиков T_d система может стать неустойчивой и для обеспечения устойчивости при увеличении количества отдельных каналов необходимо увеличить со-

отношение коэффициентов усиления каналов $\frac{K_{общ}^*}{K_{общ}}$. Увеличение

$K_{общ}^*$ возможно только в ограниченных пределах, поэтому более приемлем вариант уменьшения коэффициентов усиления локальных каналов регулирования формы $K_{общ}$. Качество регулирования при этом также улучшается.

Качество регулирования в системе с временным разделением каналов исследовалось на макете трехканальной МСАР и сеточной модели пространственно-временной кинетики плотности нейтронов, описанной выше. Отметим только более подробно процесс управления моделью и сопряжение ее с макетом системы регулирования. В качестве поглощающих стержней в модели используются переменные сопротивления, связывающие потенциал некоторых узлов модели с потенциалом земли. Для подключения к макету системы регулирования можно было бы соединить механически вал исполнительного механизма системы и движки потенциометров модели. Но это требует включения между моделью

и макетом системы дополнительного исполнительного механизма. Желательно было бы управлять моделью непосредственно аналоговыми сигналами модели.

На рис. 4.03 приведена схема ячейки модели, где пунктиром выделена схема моделирования поглощающего стержня. Нетрудно видеть, что при изменении положения движка потенциометра меняется ток утечки в этой цепи, что приводит к изменению потенциала в узле сетки тепловых нейтронов. Этот потенциал в определенном масштабе отображает значение плотности тепловых нейтронов в данной точке. Действие такого регулирующего органа аналогично действию поглотителя, перемещаемого в данной точке активной зоны. Аналогичное изменение потенциала в узле сетки тепловых нейтронов можно достичь, если изменять величину потенциала V . При этом эффективность такого регулирующего органа определяется как величиной сопротивлений $R1$, $R2$, $R3$ так и величиной потенциала V . Воздействие этого регулирующего органа на поведение модели аналогично действию источника тепловых нейтронов с изменяемой интенсивностью, помещенного в активную зону. При фиксированных значениях составляющих сопротивлений и потенциала V дифференциальная эффективность такого органа регулирования зависит от значения потенциала в узле сетки тепловых нейтронов, другими словами от «уровня мощности» модели. Следовательно, градуировочная характеристика нашего «стержня» будет иметь разную крутизну при разных уровнях потенциала в узле. Однако, в пределах малых уровней изменения мощности можно пренебречь зависимостью «эффективности» органа регулирования от уровня мощности. В качестве управляющего потенциала V в наших экспериментах используется выходной аналоговый сигнал макета системы регулирования.

Градуировочная характеристика стержня, представленная на рис. 4.03, получена экспериментально по периоду разгона модели:

$$\delta K = \frac{\ln 2}{T/l},$$

где T – время удвоения начального уровня мощности модели; l – время жизни нейтронов.

Для каждого значения потенциала V фиксировалась величина T . Коэффициент передачи регулирующего органа на линейном участке градуировочной характеристики определялся как тангенс угла наклона характеристики:

$$K_{cm} = \frac{\Delta \delta K}{\Delta V}.$$

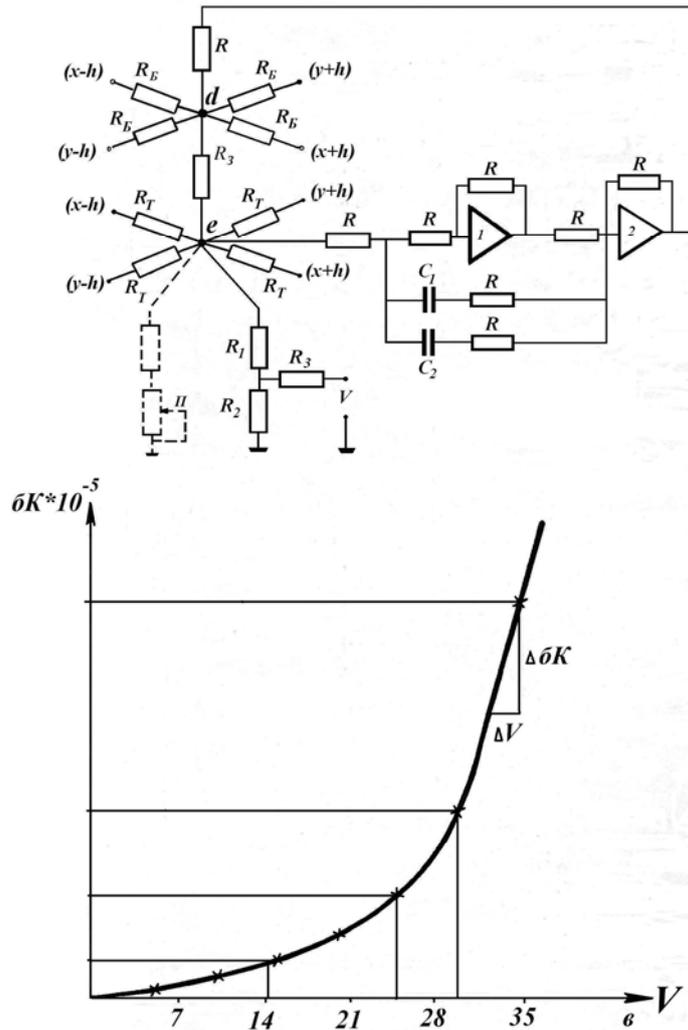


Рис. 4.03. Схема узла ячейки модели с регулирующим «стержнем»

Макет системы регулирования собирался на элементах аналоговой вычислительной машины в соответствии с передаточными функциями регулятора и датчиков потока. Структурная схема эксперимента приведена на рис. 4.04. Канал 2 является быстродействующим, его стержень расположен по середине плато модели. Каналы 1 и 3 моделируют каналы регулирования формы распределения плотности нейтронов. Исследовалось два вида переходных процессов в каналах регулирования: процесс смены уставок со стороны задатчика мощности и процесс внешнего изменения реактивности, которое создавалось с помощью включения в точки 1 и 3 модели добавочного сопротивления утечки (на схеме не показано). Величина внешнего возмущения реактивности равнялась $(1 \div 2) \cdot 10^{-4}$.

На рис. 4.05 и рис. 4.06а, и рис. 4.06в приведены переходные процессы при введении возмущающего воздействия в канал 1. На рис. 4.06с и рис. 4.06д приведены процессы при изменении уставки в 1 и 3 каналах

регулирования. На основании анализа переходных процессов можно сделать следующие выводы:

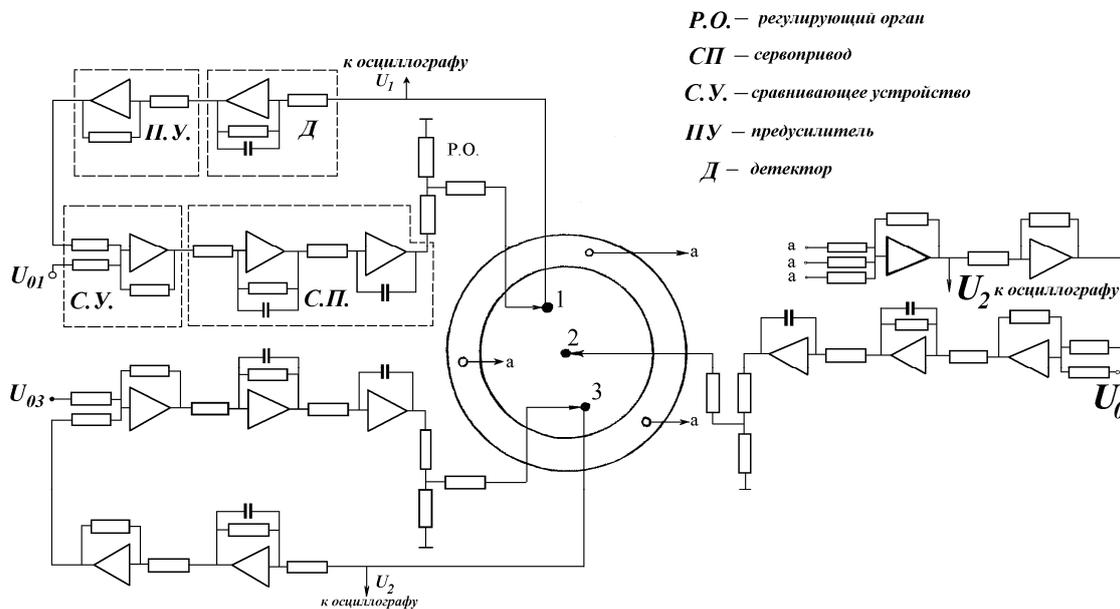


Рис. 4.04. Структурная схема экспериментальной установки для МСАР с временным разделением каналов регулирования

– увеличение коэффициента усиления регулятора быстродействующего канала приводит к увеличению степени развязки инерционных каналов регулирования формы распределения;

– уменьшение коэффициента усиления регуляторов инерционных каналов приводит к устранению колебательности процесса в данных каналах, однако длительность переходных процессов при этом возрастает;

– увеличение постоянных времени T_d приводит к ухудшению качества регулирования, увеличивается длительность процесса. Учитывая, что детекторы типа ДПЗ имеют инерционность порядка 60 секунд, система с временным разделением каналов в этом случае будет неработоспособной, несмотря на то, что устойчивость ее работы обеспечена.

Рассмотрим теперь вопрос о влиянии возмущения реактивности, локализованного в непосредственной близости от одного из детекторов быстродействующего канала, то есть на периферии активной зоны.

В этом случае передаточные функции реактора в быстродействующем канале по возмущающему и управляющему воздействиям будут различны. Передаточная функция по возмущению определяется расстоянием между детектором быстродействующего канала и местом локализации возмущения: $W'(p) = \frac{L(r)p + \lambda}{p(lp + \beta)}$. При увеличении расстояния

$W'(p) \rightarrow W(p)$, этот случай мы и рассматривали. Если же $W'(p) \rightarrow W_t(p)$,

то общий уровень мощности будет регулироваться с определенной ошибкой. Поэтому при регулировании мощности одномерной системой стремятся увеличить количество ионизационных камер, контролирующих уровень мощности реактора. Однако в случае использования многомерной системы рассматриваемого типа наличие периферийных возмущений реактивности сделает систему неработоспособной.

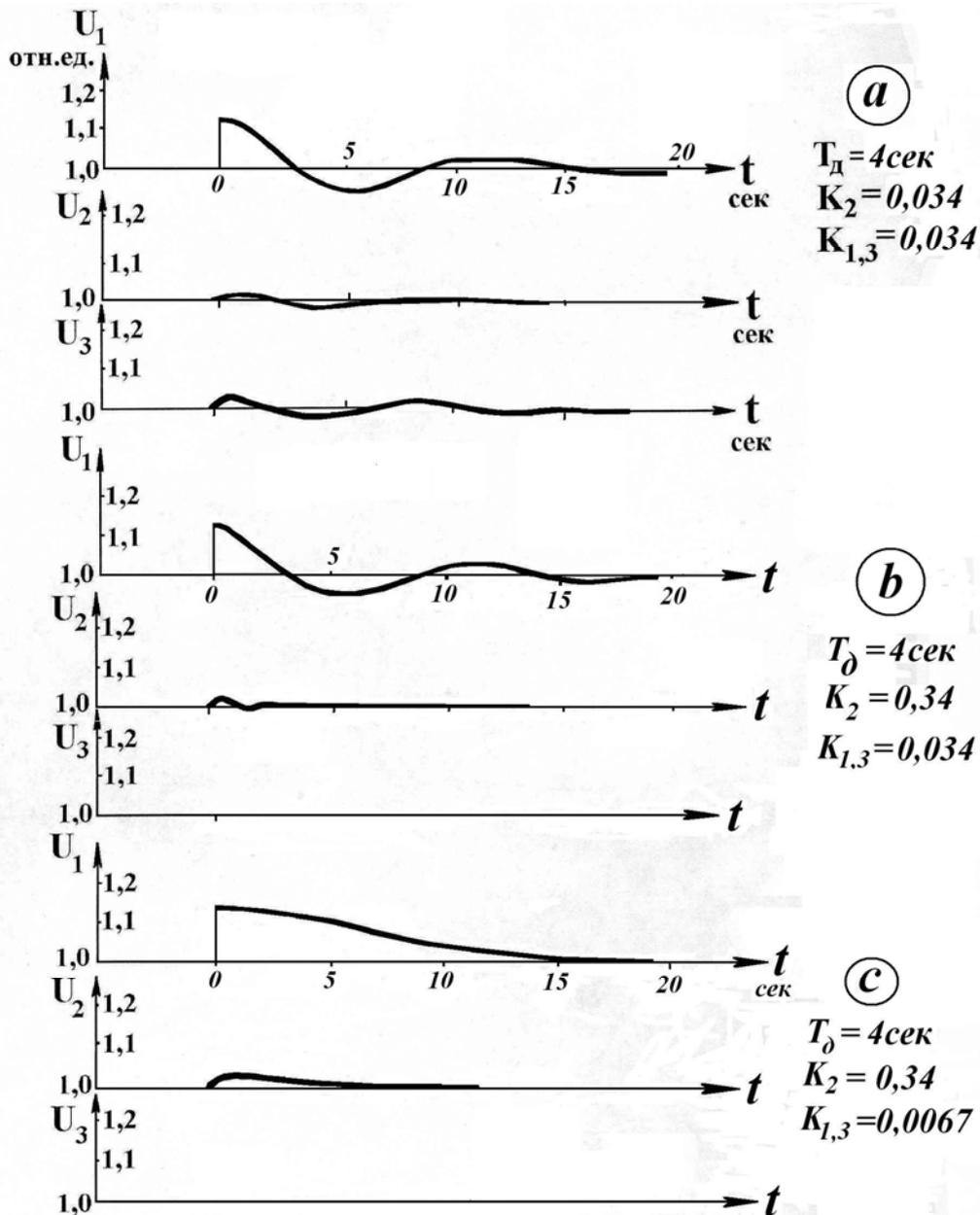


Рис. 4.05. Переходные процессы в МСАР при введении возмущения в канал регулирования № 1

В самом деле, пусть возмущения по реактивности в каналах ЛАР отсутствуют, а существует периферийное возмущение $\delta K^*(p)$. Тогда, считая

цепи каналов регулирования **1** и **3** разомкнутыми, имеем на основании

$$\text{схемы рис. 4.07а: } \delta N^*(p) = \frac{W_t(p)}{1 + W(p)R^*(p)D^*(p)} * \delta K^* ;$$

$$\delta N_1(p) = \delta N_3(p) = \frac{W(p) + W^2(p)R^*(p)D^*(p) - W(p)W_t(p)R^*(p)D^*(p)}{1 + W(p)R^*(p)D^*(p)} * \delta K^* .$$

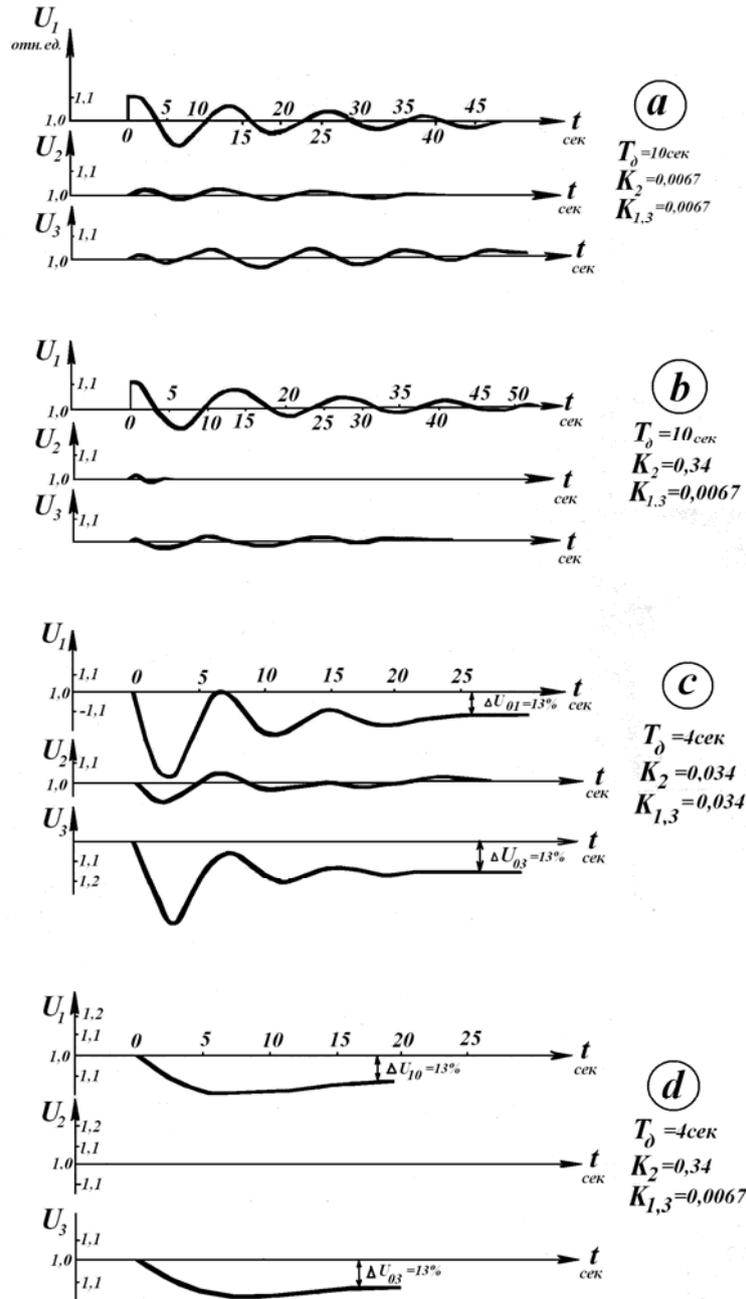


Рис. 4.06. Переходные процессы в МСАР при смене задающего воздействия в первом и третьем каналах регулирования

По окончании переходного процесса ($P \rightarrow 0$; $t \rightarrow \infty$) в быстродействующем канале получим:

$$\begin{aligned} \delta N^*(p) &= 0; \\ \delta N_1(p) &= \delta N_3(p) = -K_R T_1 (1 - \gamma) \delta K^*. \end{aligned} \quad (4-11)$$

Таким образом на выходе каждого инерционного канала регулирования появляются «ложные» рассогласования, определяемые выражением (4-11), при отсутствии в зоне управления этих каналов локальных возмущений. Потому, если локальные каналы регулирования замкнуты, то каждый из них, компенсируя свое ложное рассогласование, вносит дополнительной возмущение в быстродействующем канале регулирования интегральной мощности. Чем больше количество ЛАР-ов, тем больше это дополнительное возмущение в быстродействующем канале, так как каждый инерционный канал является цепью положительной обратной связи для быстродействующего канала. Все дополнительные возмущения совпадают по знаку с первоначальным возмущением $\delta K^*(p)$, что приводит к тому, что регулирующий стержень быстродействующего канала в конце концов выйдет на концевые выключатели. Этот факт означает практически выключение быстродействующего канала, что приведет к неустойчивости усредненного движения в системе и к неустойчивости всей системы в целом.

Очевидным решением задачи обеспечения устойчивости в этом случае является увеличение числа детекторов быстродействующего регулятора и уменьшение чувствительности всех инерционных каналов. Пусть имеем m детекторов быстродействующего регулятора $D^*(p)$, расположенных достаточно далеко друг от друга по границе активной зоны, сигналы с которых суммируются и усредняются (рис. 4.08b).

Рассуждая так же как и выше, получим для величины статического отклонения регулируемой координаты в каждом инерционном канале следующее выражение:

$$\delta N_i = \frac{W(p) + R^*(p)D^*(p)W(p)[W(p) - W_T(p)] \frac{1}{m}}{1 + R^*(p)D^*(p)W(p)}. \quad (4-12)$$

При $p \rightarrow 0$ и $t \rightarrow \infty$ получаем:

$$\delta N_i \approx -\frac{1}{m} K_R T_1 (1 - L) \Delta K^*. \quad (4-13)$$

Таким образом, ложное рассогласование в инерционных каналах уменьшается пропорционально количеству детекторов быстродействующего

ющего канала. Для того, чтобы инерционные каналы не вносили дополнительного возмущения в быстродействующий канал, необходимо выполнение неравенства:

$$\frac{\varepsilon}{2} < \frac{1}{m} K_R T_1 (1-L) \Delta K^*,$$

где ε – величины ширины зоны нечувствительности релейного инерционного регулятора. Однако такой путь обеспечения устойчивости МСАР имеет определенные недостатки, так как приводит или к ухудшению точности регулирования в инерционных каналах, или к удорожанию системы в целом при увеличении каналов контроля для быстродействующего регулятора.

Анализируя выражение (4-12) нетрудно заметить, что появление статической ошибки в инерционных каналах при локализации возмущения вблизи детекторов $D^*(p)$ обусловлено различием передаточных функций реактора по возмущению и по регулируемому воздействию в быстродействующем канале. Это различие определяется различными значениями коэффициента взаимосвязи $L(r)$ входящего в ту и другую передаточные функции. Обозначим эти коэффициенты следующим образом:

$L_{возм}(r)$ – коэффициент, входящий в передаточную функцию по возмущению,

$L_{рег}(r)$ – коэффициент, входящий в передаточную функцию по регулируемому воздействию,

r – расстояние между детектором и точками возмущения.

В зависимости от взаимного геометрического положения детектора и стержня управления быстродействующего канала, а также от места локализации возмущения возможно осуществление трех ситуаций:

– $L_{возм} > L_{рег}$, (4-14)

– $L_{возм} < L_{рег}$, (4-15)

– $L_{возм} = L_{рег}$

Выше было показано, что ситуация когда $L_{возм} > L_{рег}$, является неблагоприятной с точки зрения обеспечения устойчивости МСАР. Для устранения этой ситуации необходимо, чтобы точка приложения регулирующего воздействия в быстродействующем канале совпала с точкой расположения детектора этого канала. При этом $L_{рег} = 1$ и следовательно $L_{возм} < L_{рег}$. Но выполнить это условие практически невозможно, для этого надо детекторы быстродействующего канала (ионизационные камеры) разместить в активной зоне, что невозможно.

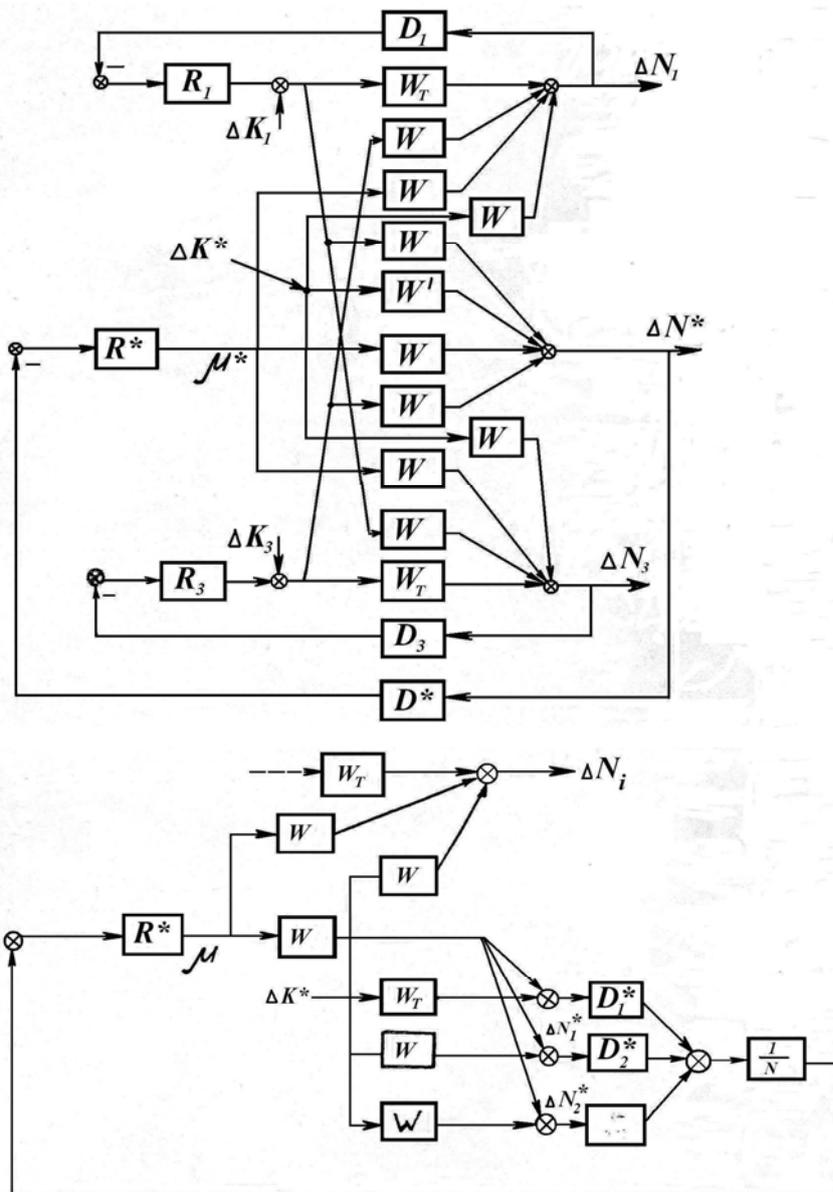


Рис. 4.07. Структура МСАР с временным разделением при обработке периферийных возмущений реактивности

Отметим, что выполнить условие $L_{\text{возм}} < L_{\text{рег}}$ все же можно. Для этого необходимо изменить структуру регулятора быстродействующего канала таким образом, чтобы она позволяла неограниченное увеличение коэффициента усиления без нарушения устойчивости. Тогда можно даже при инерционных датчиках в каналах регулирования добиться выполнения условия (4-15) и устойчивости МСАР. Об этом подробнее пойдет речь в Главе 5.

Поэтому ни увеличение числа детекторов быстродействующего канала, ни уменьшение чувствительности инерционных каналов ЛАР на практике неприемлемы, и вышеописанная МСАР с временным разделе-

нием каналов не может использоваться для решения задачи управления нейтронным полем.

Следует учитывать также, что надежность регулирования средней мощности, возлагаемая на быстродействующий регулятор, будет значительно снижена по сравнению с штатной одномерной системой регулирования мощности.

Экспериментальные исследования МСАР с временным разделением каналов на ядерном реакторе

Производственные испытания МСАР с временным разделением проводились на промышленном ядерном реакторе канального типа с водяным охлаждением. Функциональная схема экспериментальной установки и геометрия расположения регулирующих стержней и датчиков контроля плотности нейтронов в активной зоне реактора представлены на рис. 4.08. Экспериментальная установка представляет собой совокупность одного быстродействующего канала, в качестве которого использовалась штатная система AP_2 и четырех инерционных каналов регулирования локальных значений плотности нейтронов. В качестве исполнительных механизмов в каждом инерционном канале были использованы штатные сервоприводы постоянной скорости, а органами регулирования служили стержни РР, расположенные в ячейках 23-12, 12-25, 29-35, 35-23. Датчиками контроля плотности нейтронов в инерционных каналах служили четыре периферийных датчика термонейтронного типа, расположенные в ячейках 25-14, 14-27, 28-37, 38-24. Каждый из датчиков представляет собой сборку, состоящую из трех точечных детекторов, расположенных на различной высоте активной зоны. Вследствие этого для измерения значения плотности нейтронов в каждой из четырех регулируемых зон осуществлялось суммирование сигналов трех точечных датчиков каждой изборок с помощью усилителей согласующего устройства СУ.

Сигналы с выхода согласующего устройства подавались одновременно на регистрирующие приборы типа ПСР1-03 и на вход вычислительного управляющего устройства ВУУ. Так как датчики характеризуются незначительной постоянной времени $T_d = 4$ сек, то ВУУ было выполнено в варианте, реализующем релейный закон регулирования, при этом параметры настройки релейных каналов регулирования были следующие: ошибка регулирования $\varepsilon = \pm 1,4$ %, коэффициент возврата реле – 0,7.

Согласование ВУУ с сервоприводами осуществлялось в соответствии со штатной схемой управления приводов таким образом, чтобы с помощью тумблера можно было переключать выбранные приводы в автоматический режим работы АР с возможностью аварийного сброса

Результаты испытания каждого по отдельности инерционного канала представлены на рис. 4.09а, где приведены кривые переходных процессов по изменению нейтронной плотности ΔN_i , а также указаны положения возмущающих и регулирующих стержней, соответствующие началу и концу переходного процесса. В ячейке 26-26 располагался регулирующий стержень канала регулирования AP_2 . Положение стержней записаны в метрах глубины погружения.

Из кривых рис. 4.09а следует, что при данной скорости введения реактивности переходные процессы характеризуются колебательностью, что подтверждает результаты лабораторных испытаний, при этом во втором канале был получен даже автоколебательный процесс, который на рисунке не изображен. Различие переходных процессов в отдельных каналах можно объяснить совместным действием следующих факторов:

- разброс в параметрах настройки регуляторов отдельных каналов, обусловленный нестабильностью элементов ВУУ,
- различные значения T_d у детекторов отдельных каналов,
- различным взаимным положением детекторов и регулирующих органов в инерционных каналах регулирования.

На основании указанных предварительных экспериментов с целью улучшения качества переходных процессов, уменьшения колебательности было осуществлено снижение скорости введения реактивности до величины **1,5Е-5[1/сек]**. Результаты индивидуальных испытаний каждого инерционного канала совместно с системой AP_2 при уменьшенной величине скорости введения реактивности представлены на рис. 4.10b. Как и следовало ожидать в соответствии с результатами лабораторных испытаний, колебательность переходных процессов уменьшилась, автоколебательный режим не наблюдался. Длительность переходных процессов в инерционных каналах меняется в пределах **20–30 сек**.

Удовлетворительные результаты индивидуальных испытаний каждого канала позволили провести второй этап экспериментальных исследований – проверку работоспособности МСАР при совместной работе четырех инерционных каналов совместно с каналом регулирования средней мощности реактора AP_2 . На рис. 4.10. представлен один из характерных переходных процессов в подсистеме инерционных ЛАР-ов при отработке возмущающего воздействия. Возмущение реактивности вносилось в районе детектора 1-го канала регулирования стержнем 40-28. Как видно из рисунка, переходный процесс имеет незначительную колебательность и продолжается не более 20 сек.

Необходимо отметить, что первоначальное изменение регулируемой координаты ΔN_4 было противофазно возмущающему воздействию. Это объясняется, как было показано выше при аналитическом рассмот-

рении МСАР, влиянием на данную координату регулирующего стержня AP_2 , который за счет своего быстрогодействия первоначально принимает на себя компенсацию поступившего возмущения.

Указанный эффект, а также наличие зоны нечувствительности в инерционных каналах регулирования, приводящие к неточной компенсации поступившего возмущения, обуславливают тот факт, что регулирующий стержень 26-26 системы AP_2 смещается от своего начального положения.

В этом можно убедиться, анализируя данные рис. 4.10, характеризующие положение стержней в начале и конце переходного процесса. Из этих данных следует, что во 2-м и 4-м каналах регулирования, в которых отсутствовало собственное возмущение, регулирующие стержни переместились в том же направлении, что и возмущающий стержень 40-28, вследствие указанных выше причин. Конечно, эти дополнительные паразитные возмущения не могут быть отработаны регулирующим стержнем 1-го канала, который компенсирует свое собственное возмущение, вносимое стержнем 40-28. Поэтому компенсация этих паразитных возмущений осуществляется регулирующим стержнем системы AP_2 .

Таким образом, экспериментальная проверка работоспособности пятиканальной МСАР с временным разделением сепаратных каналов регулирования на промышленном реакторе подтвердила результаты, полученные путем аналитического исследования и лабораторных испытаний.

Результаты производственных испытаний позволяют сделать вывод о возможности применения МСАР с функциональным разделением подсистем для целей регулирования распределения нейтронного потока. При этом немаловажно, что техническая реализация системы на уже действующих реакторах достаточно проста и требует минимальных изменений существующей схемы СУЗ.

Таким образом, анализ динамических свойств МСАР распределения плотности нейтронов с временным разделением каналов регулирования показал, что наличие в многосвязной системе быстрогодействующего канала регулирования:

- обеспечивает функциональное разделение МСАР на подсистему регулирования распределения среднего значения плотности нейтронов (подсистема инерционных каналов ЛАР) и подсистему регулирования среднего значения плотности нейтронов в реакторе. При этом одновременно достигается инвариантность регулируемых координат инерционных каналов от несобственных возмущающих и управляющих воздействий.
- обеспечивается устойчивость всей системы в целом при варьировании параметров ВРК-датчиков контроля нейтронной плотности.

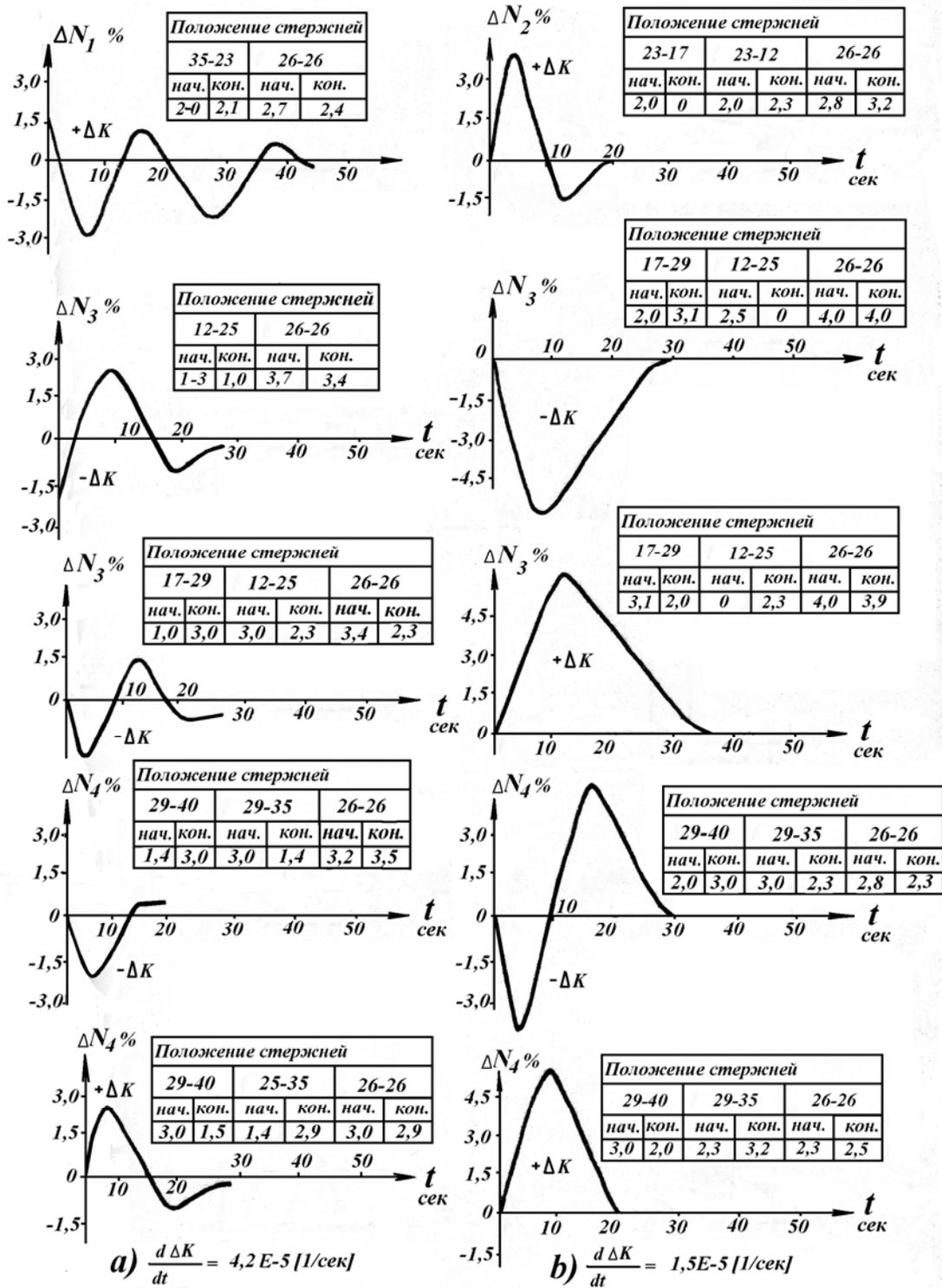


Рис. 4.09. Переходные процессы в каналах регулирования МСАР

Динамические свойства МСАР позволяют сделать вывод о возможности применения в инерционных каналах регулирования релейного закона управления, что значительно облегчает и удешевляет внедрение такой системы на действующих реакторах.

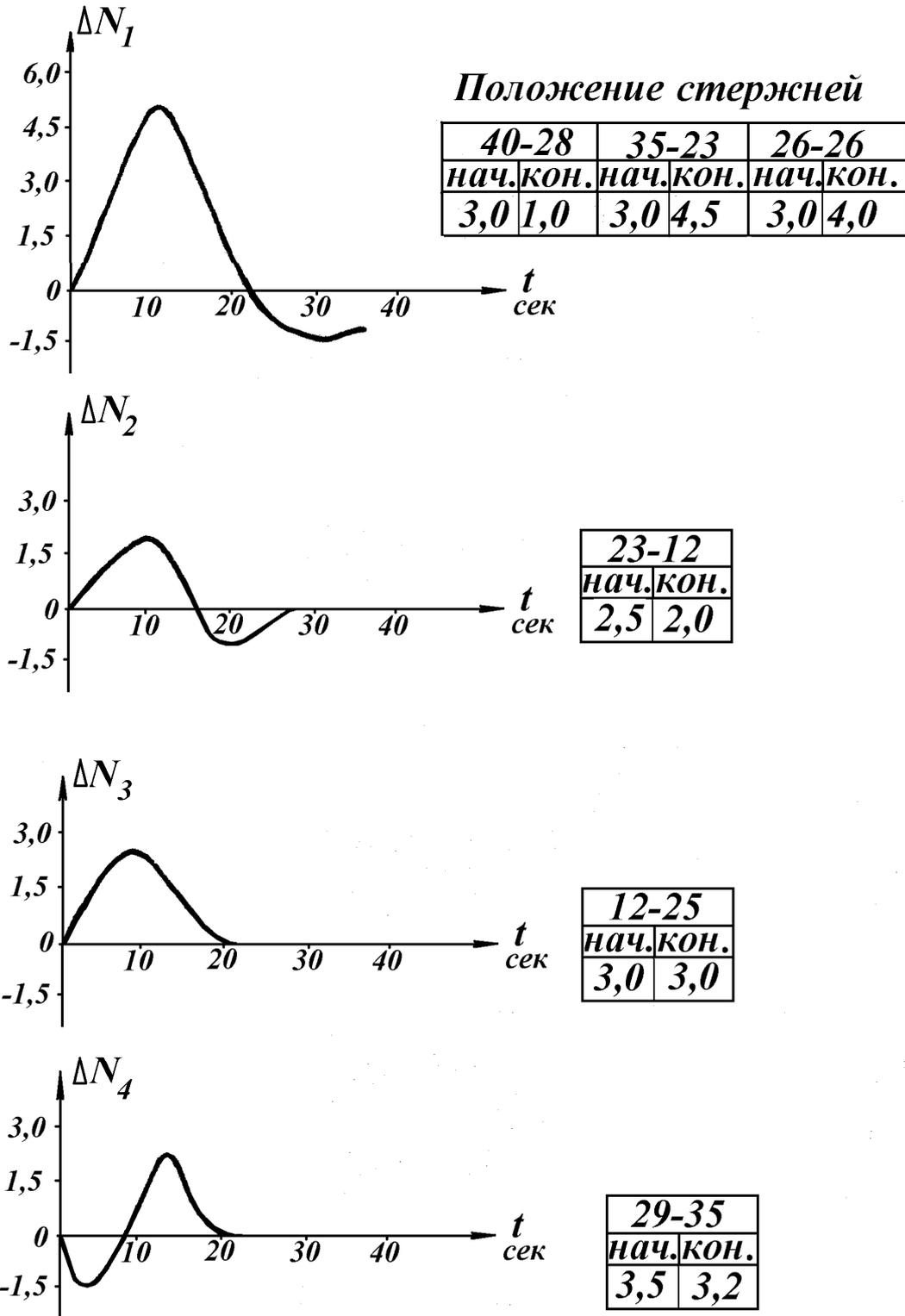


Рис. 4.10. Переходные процессы в МСАР
при скорости введения реактивности, равной $1,5E-5$ [1/сек]

Результаты экспериментального исследования МСАР на промышленном реакторе показали, что устойчивый переходный процесс обеспечива-

ется с хорошим качеством регулирования, длительность переходного процесса регулирования формы распределения составляет около 20 секунд.

4.2. Многосвязная система итерационного регулирования потоков в зонах управления

Рассмотрим теперь систему с функционально разделенными подсистемами в несколько ином, циклическом режиме работы. Структура системы остается такой же, как у системы с временным разделением каналов. Она включает быстродействующий канал регулирования средней мощности реактора – обычный штатный регулятор мощности, и многосвязную систему локальных каналов регулирования формы распределения потока. Но, в отличие от системы с временным разделением, процесс выравнивания распределения потока производится не одновременно всеми ЛАР-ами, а последовательно во времени несколькими тактами, причем в каждом такте включаются в замкнутый режим работы не все регуляторы распределения потока, а лишь несколько ЛАР-ов, в зонах которых отклонение потока от среднего значения по реактору являются максимальными по модулю. В результате нескольких тактов распределение потока нейтронов должно установиться в пределах допустимых отклонений. Первый вопрос при этом заключается в устойчивости такого алгоритма управления, поскольку распределение нейтронного потока большого ядерного реактора является неустойчивым. Выясним, при каких условиях многотактовый процесс подравнивания распределения потока будет сходящимся.

Пусть стационарное состояние многомерного управляемого реактора в начальный момент описывается вектором $\Phi(r, t)$ и требуется перевести его в заданное состояние $\Phi'(r, t)$, обрабатывая N-мерное рассогласование

$$\psi(r, t) = \Phi(r, t) - \Phi'(r, t) \quad (4-16)$$

Сущность итерационного алгоритма заключается в поэтапной отработке рассогласования за ряд тактов. При этом в каждом такте обрабатываются рассогласования не во всех, а в нескольких, в простейших случаях – двух выбранных зонах управления с максимальным отклонением от среднего значения интегрального потока реактора и противоположных по знаку.

Для обеспечения устойчивости системы в режиме слежения изменение уставок формы распределения потока не должно противоречить условию критичности, то есть сумма всех изменений не должна изме-

нять соотношение $\sum_{i=1}^n K_i = 1$ в нескольких K-зонах, где

$K < N$. В общем случае управление в каждом такте представим в виде:

$$U^{p+1} = B^{p+1} * \psi^p \quad (4-17)$$

где p – номер такта; B – вектор переключения, компоненты которого принимают значения $0, +1, -1$ в зависимости от конкретной программы переключений. В случае, когда закон переключения задан в виде некоторой функции $B^p = f(p)$, регулирование потоков в зонах осуществляется по жесткой программе. Если закон переключения задан в виде функции регулируемых координат $B^{p+1} = f(\Phi, \Phi')$, то процесс регулирования осуществляется с самонастройкой. Независимо от конкретного вида функции переключения B регулирование по данному алгоритму обладает характерными особенностями: дискретностью управления во времени и пространстве, выполнением условий стационарности в конце каждого такта, взаимосвязностью координат и поэтому взаимосвязностью тактов. Этот многошаговый процесс, состоящий из совокупности взаимосвязанных тактов, описывается рекуррентным соотношением вида:

$$\Phi^p = T^p(\Phi^{p-1}) \quad \text{где } p = 0, 1, 2, \dots, N \quad (4-18)$$

Совокупность взаимосвязанных тактов, в течение которых происходит отработка исходного рассогласования, будем называть циклом регулирования, а саму систему – циклической МСАР выравнивания потока нейтронов.

Рассмотрим структуру циклической системы регулирования потока. Согласно алгоритму принцип действия системы заключается в очередном обслуживании каналов локального регулирования за ряд тактов, причем в каждом такте включается K регуляторов из N .

Основная особенность системы – наличие специального блока, переключающего каналы регулирования по определенной программе. Структура системы представлена на рис. 4.11, где обозначено:

УВО – устройство вычисления отклонений,

ЗПП – задатчик профиля нейтронного поля,

БВЗ – блок выбора зон,

К-коммутатор,

$W1(p) \div Wn(p)$ – локальные регуляторы профиля поля,

$W0(p)$ – регулятор интегральной мощности.

УВО вырабатывает по данным внутриреакторного контроля отклонения потока по зонам от заданных значений, поступающих от ЗПП. БВЗ управляет коммутатором и осуществляет подключение отдельных каналов регулирования на отработку рассогласования в соответствующую

щих зонах. В случае жесткой программы управления переключение каналов осуществляется по заранее заданной программе. При регулировании с самонастройкой коммутация каналов осуществляется в соответствии с состоянием системы в такте. В этом случае БВЗ анализирует информацию о состоянии системы и выдает команды на включение регуляторов. После отработки рассогласований во включенных каналах регулирования такт завершается, БВЗ находит и включает другие каналы и начинается новый такт.

При регулировании в выбранных зонах в остальных зонах происходит изменение потока за счет диффузии. Соответствие между фактическим и заданным значением потока в каждой зоне, достигнутое в предыдущем такте управления, нарушается при следующих тактах. В связи с этим возникает задача анализа сходимости процесса в целом, поскольку даже устойчивая работа системы в каждом такте выравнивания не обеспечивает конечной цели управления нейтронным полем.

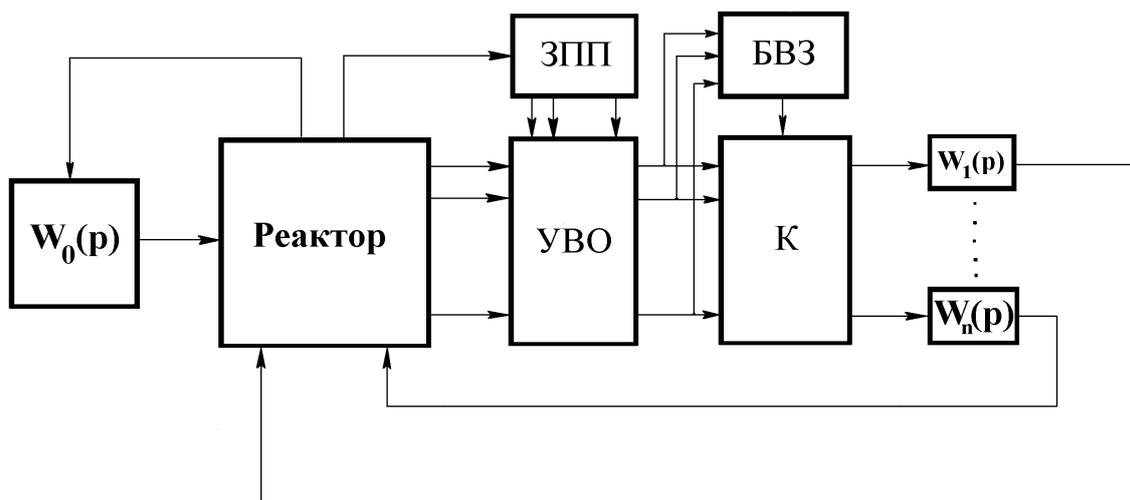


Рис. 4.11. Структурная схема циклической МСАР распределения нейтронного потока

Процесс регулирования по данному алгоритму будем считать сходящимся, если последовательность состояний Φ^p где $p=0,1,2,\dots,N$, удовлетворяющих соотношению (4-18), сходится к заданному состоянию, т. е.

$$\Phi' = \lim_{p \rightarrow \infty} \Phi^p \text{ при } p \rightarrow \infty.$$

В практическом случае сходимость процесса регулирования определяется по выполнению условия

$$\Phi' - \Phi^M \leq \varepsilon \quad (4-19)$$

где M – конечное число.

Процессы, описываемые соотношением (4-18), являются монотонно сходящимися, если удовлетворяют условию сжатости

$$[\Phi^{P+1} - \Phi^P] \leq q[\Phi^P - \Phi^{P-1}] \quad (4-20)$$

где $0 \leq q < 1$; $[\Phi]$ – каноническая норма матрицы Φ , например,

$$[\Phi]_l = \sum_{i=1}^N |\Phi_i| \cdot l\text{-норма.}$$

Шишловым В.И. [26] показано, что многомерные процессы шагового регулирования в ядерном реакторе для любых исходных состояний системы являются сходящимися к заданному неподвижному состоянию при выполнении условия (4-20). Доказательство сходимости проводится на базе теории сходимости матричных рядов с использованием обобщенного критерия Коши. Для процессов, удовлетворяющих условию (4-20), характерно монотонное убывание нормы вектора рассогласования с ростом номера такта.

Анализ условия монотонной сходимости показывает, что она имеет место при одновременном выполнении ряда условий:

- при коэффициентах взаимосвязи зон управления, меньших единицы,
- при выборке регуляторов ЛАР в такте по экстремальным алгоритмам, то есть когда отклонение в зонах управления включаемых ЛАР-ов максимально отличается от среднего значения потока в реакторе,
- при определенных исходных рассогласованиях в зонах управления, не выходящих за пределы допустимых отклонений для регуляторов.

В общем же случае при регулировании по итерационным алгоритмам сходимость процесса монотонной не является. Например, если отклонения потока в зонах превышают область монотонной сходимости, норма вектора рассогласований в отдельных тактах возрастает, но в последующих тактах снова убывает.

Таким образом, в замкнутой многомерной системе при ограниченном числе регуляторов и при коэффициентах связи зон меньше единицы число тактов, в которых нарушается условие сжатости (4-20) ограничено. В этом случае применение обобщенного критерия Коши для последовательных состояний Φ^P приводит к выводу о существовании конечного числа M , при котором $\Phi^1 - \Phi^M \leq \varepsilon$.

Результаты теоретических исследований по сходимости шаговых процессов в МСАР полностью согласуются с экспериментальными данными, полученными на сеточной динамической модели реактора и непосредственно на реакторе.

На сеточной модели исследовались:

- эффективность различных программ итерационного выравнивания потока нейтронов,
- влияние пространственной функции рассогласований в зонах на сходимость процесса,
- помехоустойчивость итерационных алгоритмов.

Макет многосвязной системы управления состоял из двух функционально разделенных подсистем регулирования: интегральной мощности, в качестве которой применялся макет линейной системы пропорционального регулирования, и четырех локальных регуляторов релейного типа для управления формой распределения потока. Исследования проводились для двух вариантов расстановки датчиков в зонах управления. По первому варианту датчики располагались вблизи своих стержней и подключались только к своему регулятору ЛАР-у. По второму варианту датчики располагались на границах зон управления, при этом показания каждого датчика использовались одновременно двумя смежными регуляторами. В цепь каждого контура включены контакты исполнительных реле блока выбора зон. Сигналы рассогласования в каналах ЛАР подключены ко входам блока выбора зон. Регулирование распределения потока осуществляется по четвертям активной зоны. Геометрия эксперимента приведена на рис. 4.12.

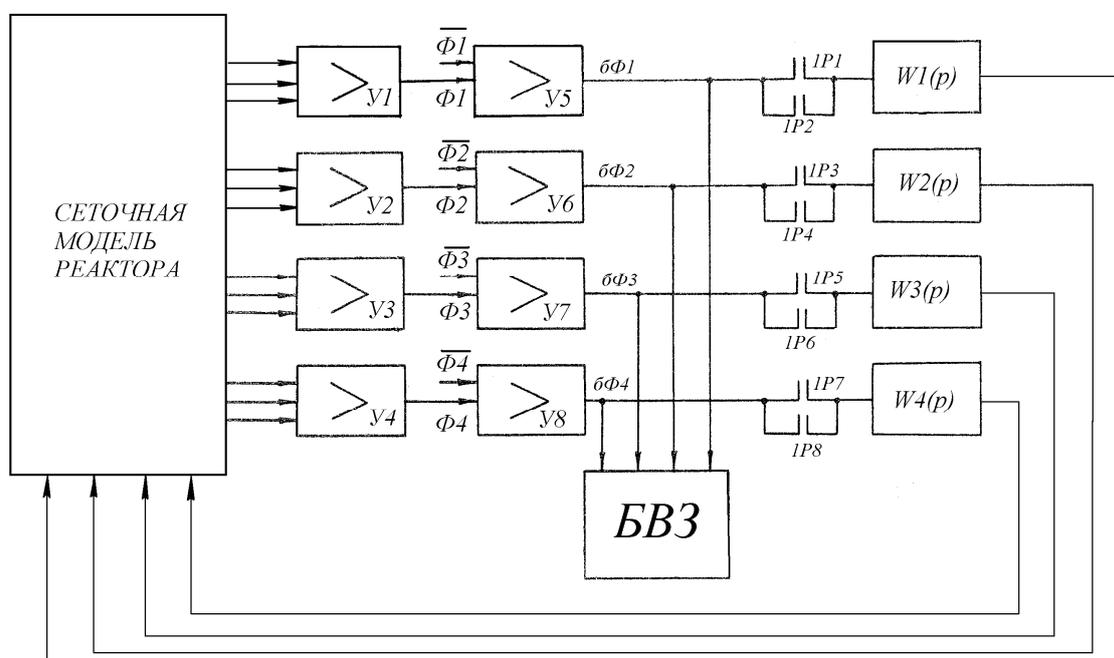


Рис. 4.12. Схема экспериментальной установки по исследованию циклической МСАР на сеточной модели

Основным функциональным блоком системы является блок выбора зон управления (БВЗ). Программа его работы включает в себя несколько операций:

- разделение сигналов отклонения в зонах по знаку отклонения от средней по реактору мощности,
- обнаружение наибольших отклонений каждого знака,
- включение каналов регулирования с наибольшими отклонениями,
- световая индикация номеров каналов, включаемых в каждом такте регулирования.

Блок выбора зон работает непосредственно от усилителей сигналов ошибок локальных регуляторов. Устройство реализует способ обнаружения и индикации наибольшего значения распределенного параметра по дискретным отсчетам с датчиков внутриреакторного контроля потока нейтронов [27]. Сигналы со всех датчиков одновременно сравниваются со сканирующей величиной, которая изменяется до нуля от своего наибольшего значения, заведомо большего всех сигналов датчиков. В момент первого равенства сканирующей величины с сигналом какого-либо датчика определяется наибольшее значение и его местоположение. Функциональная схема устройства выбора зон приведена на рис. 4.13, где ГПН – генератор падающего напряжения,

К1 и К2 – ключи, пропускающие напряжения определенной полярности,

НО – нуль орган,

Т – триггер, Р – реле,

ИЛИ – логическая схема «ИЛИ»,

Т+ и Т – триггеры логического управления ключами,

С – синхронизатор.

Сигналы с устройства вычисления отклонений поступают на входы нуль-органов, причем каждый сигнал поступает на два нуль – органа. На другие входы нуль-органов поступают изменяющееся по амплитуде сканирующее напряжение от ГПН через ключи К1 и К2. При таком включении один нуль-орган реагирует на положительные сигналы, а другой – на отрицательные. При срабатывании какого-либо нуль-органа соответствующий триггер и реле переходят в рабочее состояние. Одновременно с этим срабатывает схема «ИЛИ» и соответствующий триггер закрывает свой ключи тем самым осуществляет сброс сканирующего напряжения до нуля. Одновременно происходит обнаружение наибольших значений и подключение аппаратуры индикации и регулирования канала ЛАР выбранной зоны управления. Макет устройства был выполнен с характеристиками:

- входные сигналы $0 \div \pm 10$ в,

- чувствительность 50 мВ,
- погрешность 0.5 %,
- время поиска – 2 мсек.

Порядок проведения исследований заключался в следующем. Модель выводилась в критическое состояние на стационарный уровень, который поддерживался постоянным в течение опыта с помощью САР.

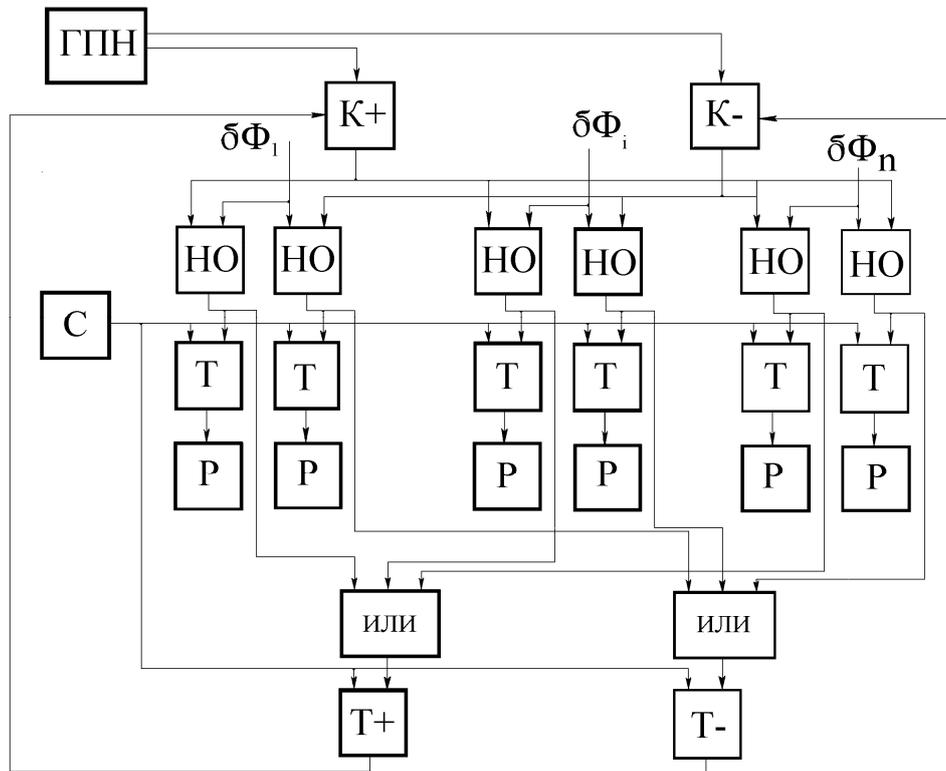


Рис. 4.13. Структурная схема устройства выбора зон управления в циклической МСАР

Фиксировалось исходное состояние системы $\bar{\Phi}(r)$ и задавалось желаемое распределение $\bar{\Phi}^0(r)$. Исходное рассогласование обрабатывалось по заданной программе переключения посредством манипуляций движками потенциометров модели, моделирующих стержни СУЗ. Цикл управления считался законченным, когда выполнялось условие:

$$|\delta\Phi| = \max |\delta\Phi_i^p| \leq \varepsilon \text{ где } i=1,2,\dots,N.$$

В ходе исследований производилась регистрация регулируемых координат, формируемых измерительной схемой в конце каждого такта. Кроме того, в конце и начале каждого цикла регистрировалось пространственное распределение потенциалов в сетке модели.

Как показали экспериментальные исследования на модели, наилучшей программой регулирования является экстремальная симметричная программа, при которой в одновременную работу включаются два локальных регулятора в зонах с наибольшими по амплитуде и разными по знаку отклонениями от среднего значения мощности реактора. Типичный ход процесса представлен на рис. 4.14.

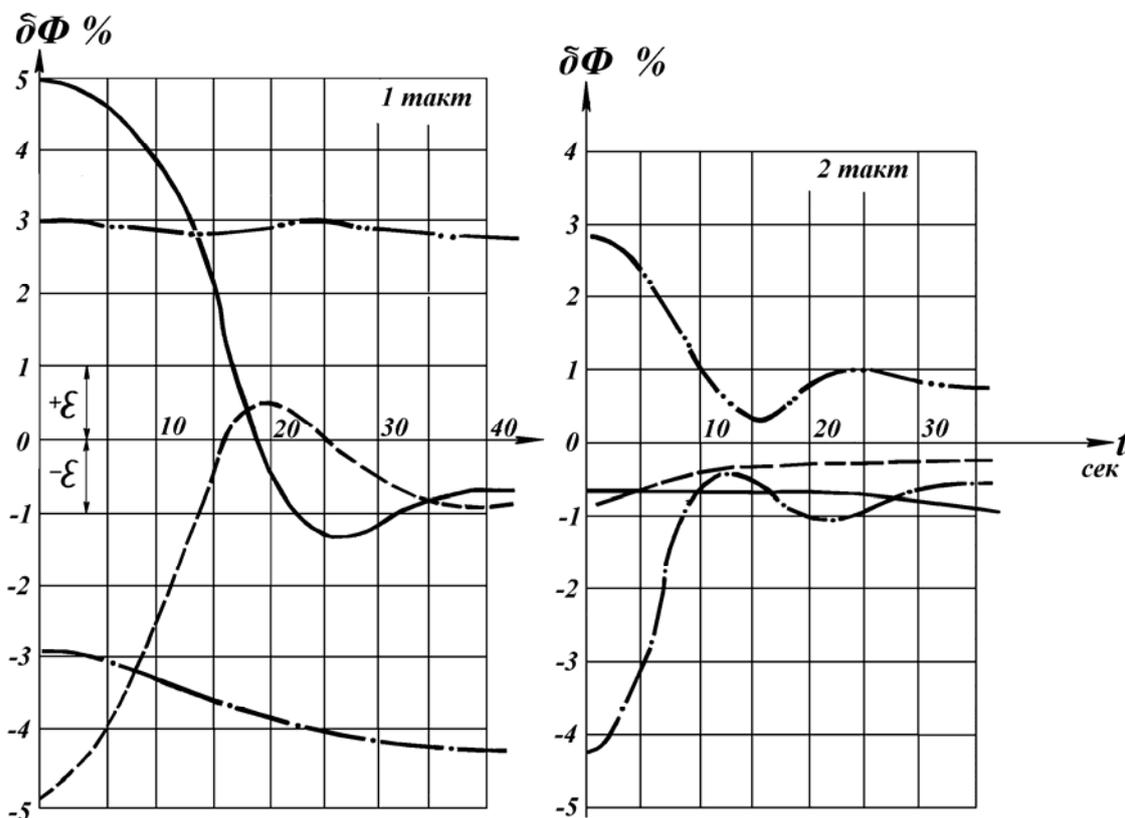


Рис. 4.14. Переходные процессы в циклической МСАР

Процесс сходится, как правило, за 2–3 такта в системе, состоящей из четырех ЛАР. Интегральный регулятор совершал небольшие движения лишь в начале цикла. Длительность переходного процесса в первом такте не превышает 30 сек и может быть уменьшена при помощи перекрестных корректоров между каналами.

Задача об оптимальном количестве локальных регуляторов в МСАР циклического типа

Общее количество локальных регуляторов (ЛАР), из которых производится выборка, должно определяться на основании данных контроля нейтронного поля и зависит от характера искажений поля. Естественно стремление к уменьшению общего числа ЛАР, диктуемое экономическими соображениями. Однако, уменьшение количества вы-

равнивающих регуляторов приводит к увеличению расстояния между датчиками этих регуляторов, что уменьшает взаимосвязь регуляторов между собой и приводит к ухудшению качества регулирования в каналах. С этой точки зрения задача определения оптимального количества регуляторов является не только задачей контроля, но и задачей регулирования процесса, где она может быть сформулирована следующим образом. Требуется найти количество регулирующих стержней, а, значит и количество зон управления распределением потока, оптимальное с точки зрения качества переходных процессов во взаимосвязанных контурах регулирования распределения потока. Под зоной управления понимаем определенную область активной зоны, средний поток в которой контролируется группой соединенных датчиков, содержащий не менее одного регулирующего стержня. Возможны программы, связанные с миграцией зон контроля (перегруппировкой датчиков в процессе работы), но они здесь не рассматриваются [30].

Исследования по определению числа выравнивающих регуляторов в МСАР циклического типа проводились в лабораторных условиях на сеточном имитаторе пространственной кинетики реактора. Сеточная модель через согласующие устройства сопрягалась со штатным оборудованием, установленном в типовом пульте управления. Аппаратура пульта позволяла включать в одновременную работу три автоматических регулятора пропорционального типа, из которых один подключался к датчикам, расположенным в «отражателе» модели, и предназначался для поддержания средней мощности реактора, а два других подключались к датчикам, расположенным в «активной зоне» вокруг соответствующих «стержней управления». Эти каналы предназначались для имитации поведения локальных регуляторов распределения мощности по радиусу активной зоны, подключаемыми в замкнутый режим управления в одиночном такте выравнивания потока. Скорость введения реактивности для регулятора интегральной мощности составляла 1 [лин.м./сек], а скорость изменения реактивности регуляторов локального действия составляла $0,3$ [лин.м./сек].

Моделировалось использование инерционных датчиков, расположенных в активной зоне, постоянную времени их можно было менять в пределах до $T_d = 1,5$ сек. Расположение стержней управления на плато сетки устанавливалось следующим образом (рис. 2.19): стержень регулятора общей мощности располагался в центре активной зоны (№ 5), а стержни локальных регуляторов располагались на равном удалении от центра (№№ 4 и 8). Структура системы выглядит как представлено на рис. 4.15.

В стационарном состоянии, характеризующемся постоянством потока по всей модели, на входы локальных регуляторов подавались с за-

датчиков равные по величине $\Delta N = 3,5\%$ и противоположные по знаку отклонения от уставок. Переходные процессы приведены на рис. 4.16.

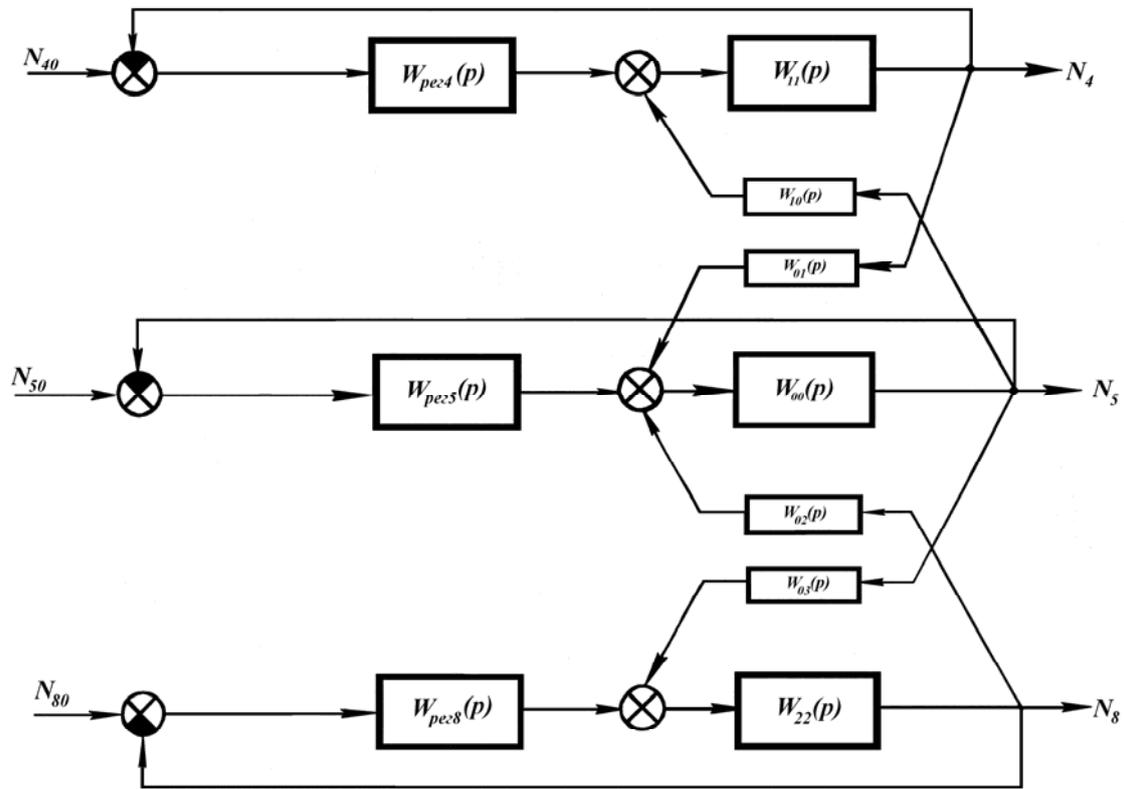


Рис. 4.15. Структура циклической МСАР при исследовании качества регулирования на сеточной модели

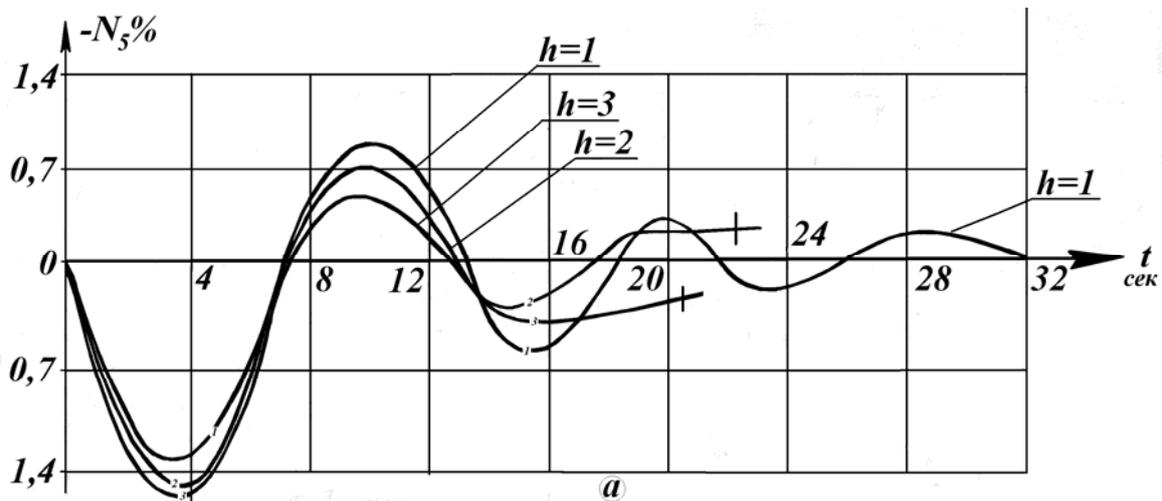


Рис. 4.16. Переходный процесс в канале регулирования интегральной мощности циклической неавтономной МСАР

Рис. 4.17, рис. 4.18 для различного удаления датчиков локальных регуляторов от своих стержней (h – шаг решетки технологических ка-

налов). Обрыв кривой на осциллограммах обозначает неустойчивый процесс. Как видим, увеличение размеров зоны контроля потока в радиусе до 2 шагов решетки каналов приводит к нарушению устойчивости всей системы в целом. Приемлемый переходный процесс наблюдается лишь в том случае, если датчики локальных регуляторов расположены на расстоянии не менее 4 шагов решетки каналов (около 80 см) от своего стержня. Таким образом, зона контроля локальных регуляторов при такой структуре системы не может быть больше ~ 80 см в диаметре. Аналогично выглядят переходные процессы и при внешнем возмущении по реактивности (величина $\delta K = 0,0005$), показанные на рис. 4.19.

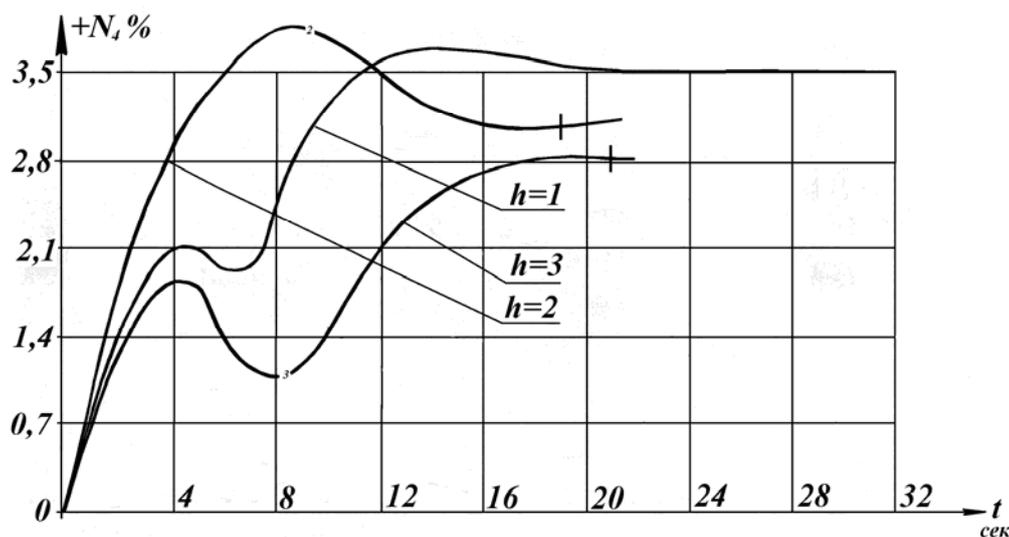


Рис. 4.17. Переходные процессы в канале ЛАР № 4 циклической неавтономной МСАР

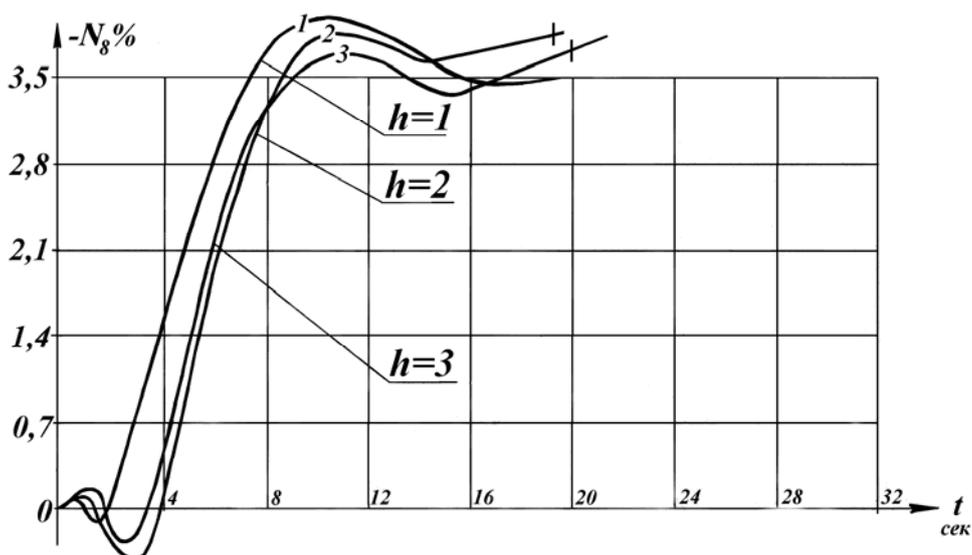


Рис. 4.18. Переходные процессы в канале ЛАР № 8 циклической неавтономной МСАР

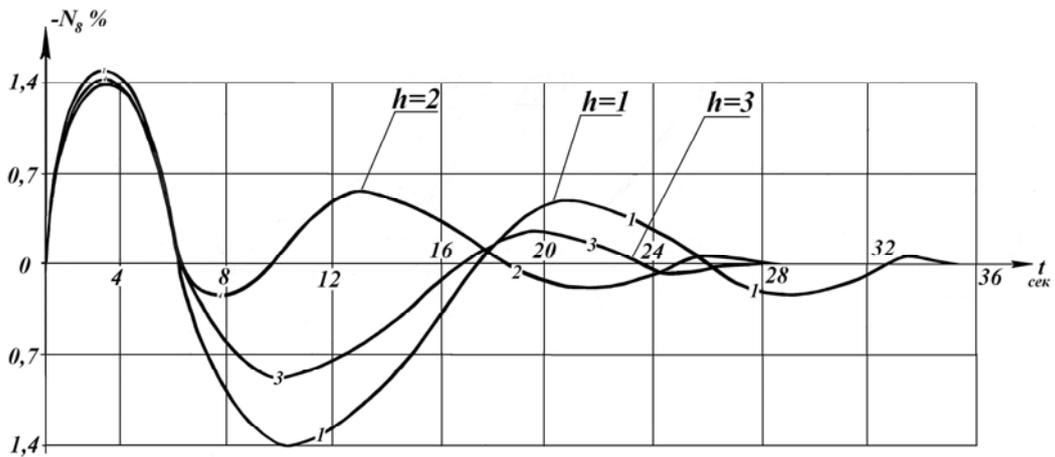
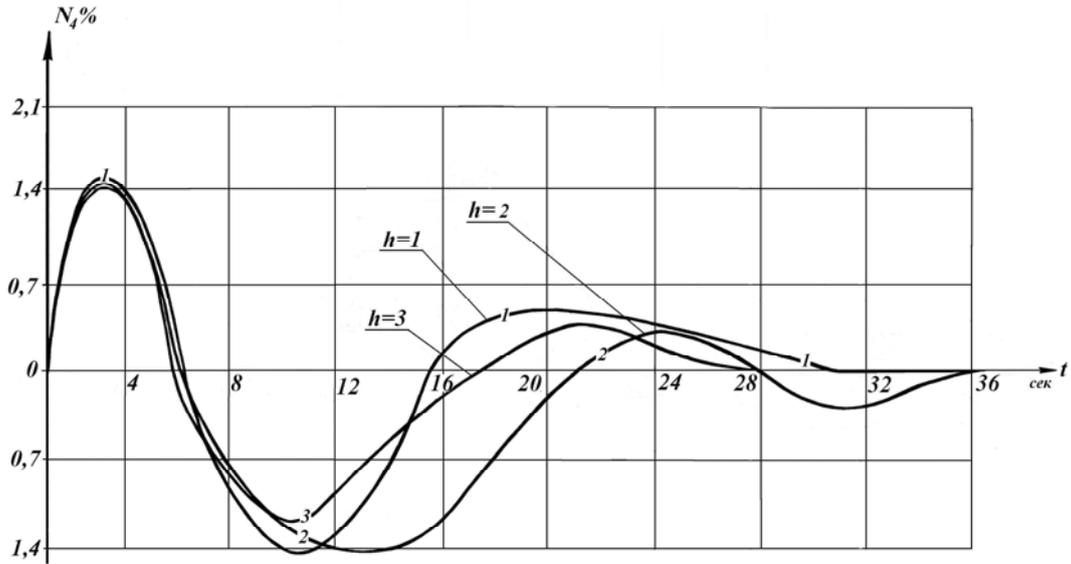
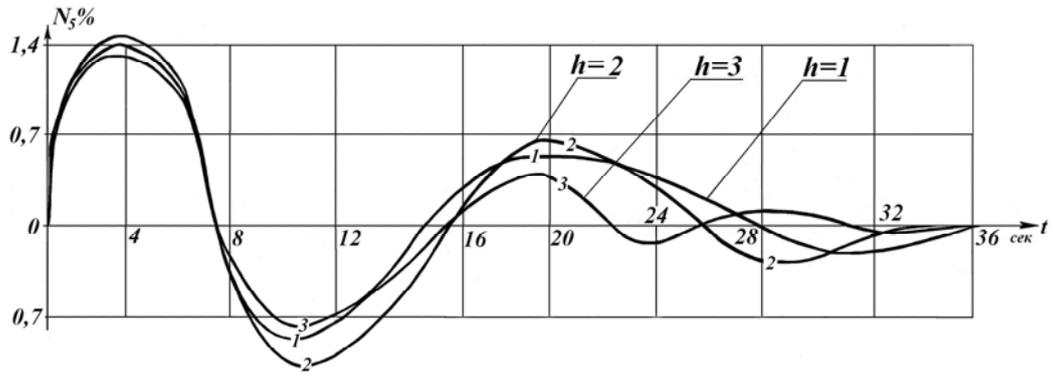


Рис. 4.19. Переходные процессы при обработке возмущения по реактивности в каналах циклической МСАР

Поставим задачу обеспечить устранение взаимодействия между локальными регуляторами и регулятором средней мощности таким об-

разом, чтобы изменение уровня средней мощности не вызывало возмущения в работе локальных регуляторов. Эта задача равносильна задаче достижения односторонней автономности каналов ЛАР от работы канала регулирования средней мощности и может быть решена при переходе структуры МСАР к виду рис. 4.20.

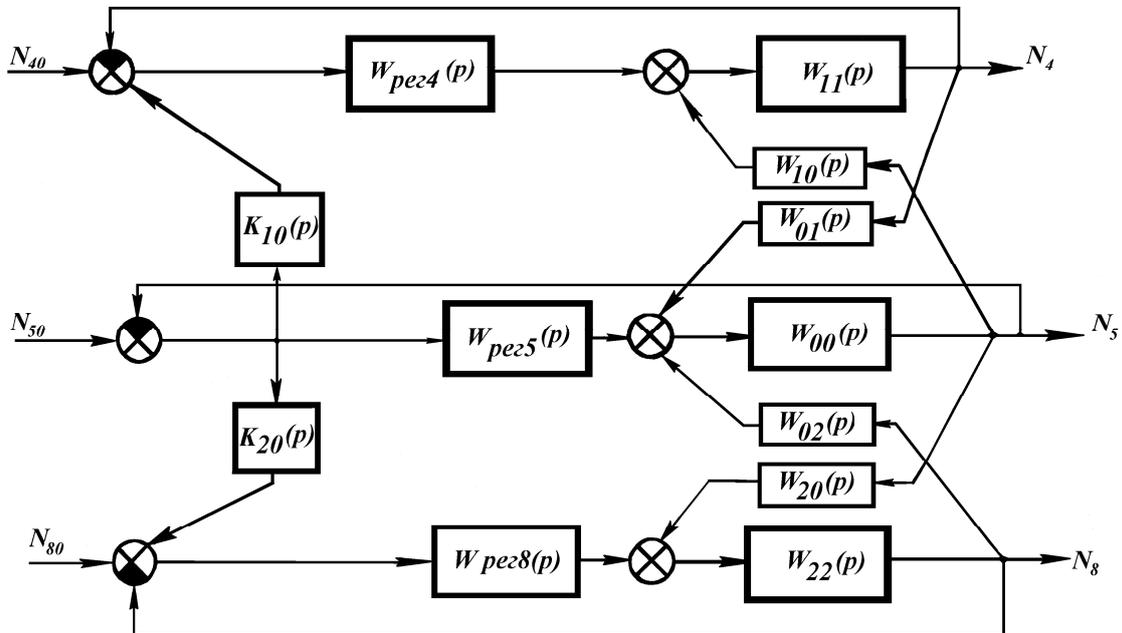


Рис. 4.20. Структурная схема односторонне автономной циклической МСАР

Корректирующие связи $K_{12}(p)$ и $K_{21}(p)$ рассчитываются по методу перекрестных компенсирующих связей [12] и представляют собой активные четырехполюсники с небольшим коэффициентом усиления. С помощью этих перекрестных связей возмущения, возникающие в канале регулирования средней мощности, распределяются между каналами ЛАР, что приводит к их заметному ослаблению. Это видно по переходным процессам. На рис. 4.21 показаны переходные процессы в каналах МСАР по структуре рис. 4.22 при разнополярном изменении уставки в каналах ЛАР и на рис. 4.23 при внесении общего возмущения по реактивности. Сравнение их с переходными процессами рис. 4.16 ÷ рис. 4.19 показывает, что при прочих разных условиях время переходного процесса и перерегулирование в каналах системы сокращается более чем в два раза. Видно также, что удаление датчиков локальных регуляторов от своих управляющих стержней незначительно сказывается на ухудшении качества переходных процессов. Можно считать, что размеры зоны управления распределением МСАР с перекрестными компенсаторами могут быть увеличены значительно без ухудшения качества регулирования.

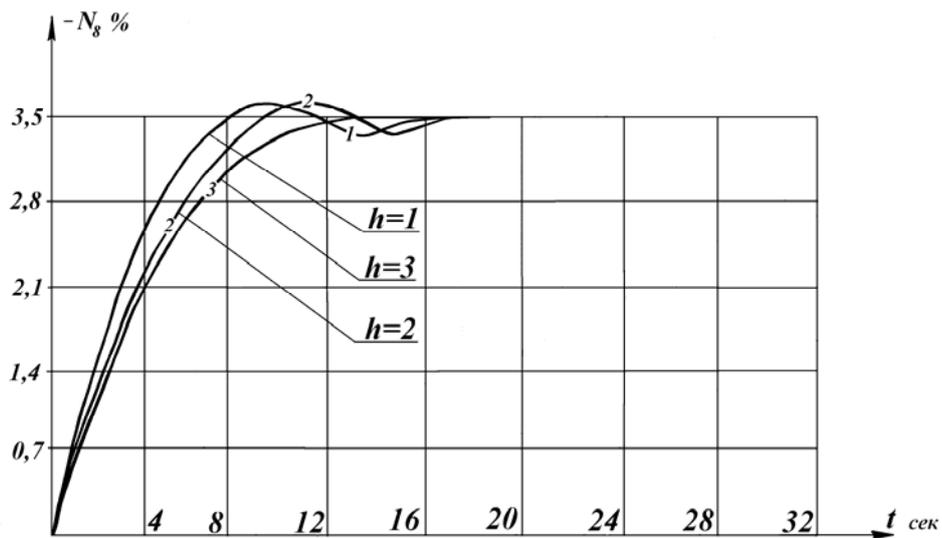
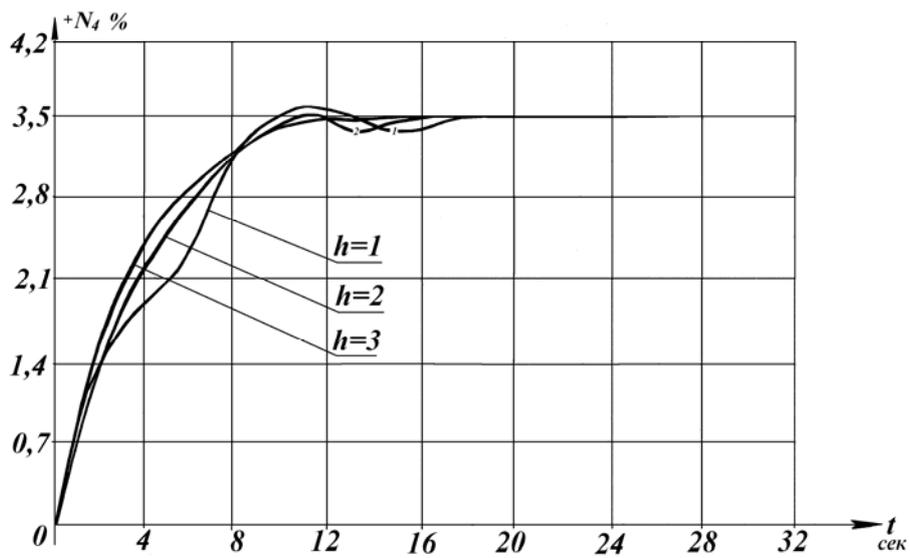
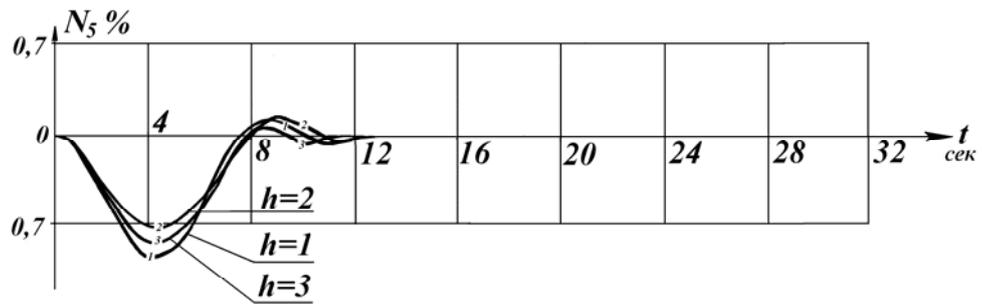


Рис. 4.21. Переходные процессы в циклической автономной МСАР при отработке противофазных уставок в каналах ЛАР

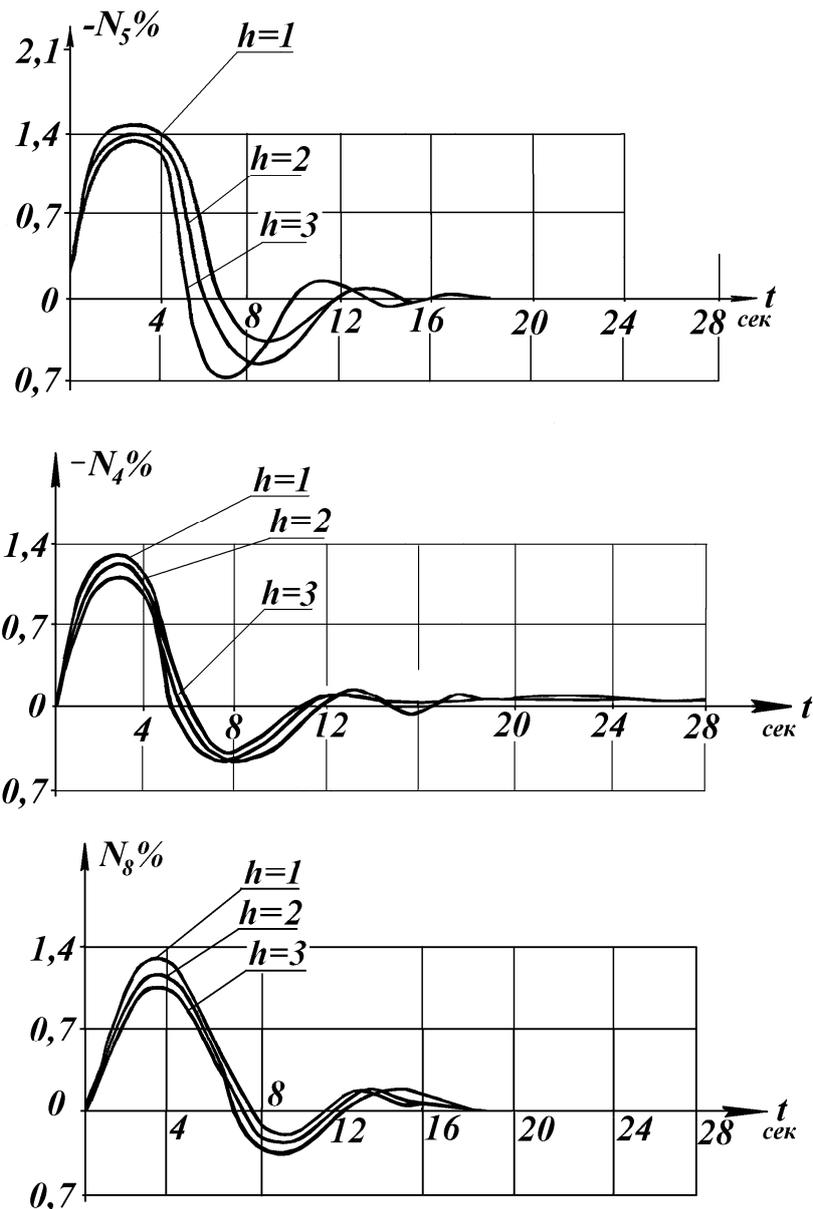


Рис. 4.22. Переходные процессы в каналах автономной циклической МСАР при обработке общего возмущения реактивности

4.3. Алгоритм регулирования по относительным значениям потока в зонах управления

Рассмотрим систему, как МСАР, состоящую из двух функционально самостоятельных подсистем: одномерного канала регулирования интегральной мощности и многомерной подсистемы каналов регулирования формы распределения. В качестве датчиков в канале регулирования общей мощности могут быть использованы штатные камеры каналов СУЗ, установленные в отражателе. Во-первых, это практически удобно – использовать в полном техническом составе регуляторы общей мощности

реактора без переделки, а во-вторых, стремление использовать в этом канале регулирования сумму сигналов с внутриреакторных датчиков, как справедливо указано в [16], приведет только к усилению нарушения баланса между регулируемой нейтронной и заданной тепловой мощностью реактора, что увеличит неравномерности распределения потока.

Для обеспечения устойчивого режима работы необходимо разработать такую структуру системы, в которой осуществляется по возможности полная компенсация взаимных связей каналов регулирования. Дадим краткий анализ взаимосвязей, имеющих место в нашей системе:

- взаимосвязь между подсистемами, имея в виду, что N каналов регулирования распределения (ЛАР) развивают некоторое суммарное возмущение, действующее на канал регулирования интегральной мощности;
- взаимосвязь между регуляторами формы распределения потока.

Оба типа связей являются двухсторонними, то есть действуют в обоих направлениях.

Однако компенсация связей в обоих направлениях ввиду физических основ работы реактора является ненужной. Это очевидно для первой группы связей: условие критичности реактора делает бессмысленным устранение влияния регуляторов формы распределения на регулятор интегральной мощности. Обратная задача имеет смысл, так как ее решение позволяет регулировать общую мощность реактора без искажения формы распределения потока.

Что касается второй группы связей, то задача их компенсации в обоих направлениях физически осуществима и оправдана тем, что позволяет обеспечить независимое ведение процесса во всех зонах регулирования.

При разработке алгоритма будем учитывать режимы работы системы:

- 1) следящий режим, в котором производится перераспределение формы нейтронного поля;
- 2) режим стабилизации формы распределения, в котором работа системы рассматривается в двух вариантах: стабилизация обоих подсистем или стабилизация формы распределения при переходе на новый уровень интегральной мощности.

Очевидно, что в режиме стабилизации необходимо обеспечить независимость работы локальных регуляторов и регулятора общей мощности и обеспечить автономную отработку возмущений формы в каждом локальном канале регулирования формы. Оба этих требования могут быть осуществлены при следующем алгоритме работы.

Рассмотрим произвольное распределение потока в виде функции:

$$\Phi(r, t) = \Phi'(r, t) + \psi(r, t),$$

где $\psi(r, t)$ – функция, характеризующая отклонение действительного распределения от желаемого $\Phi'(r, t)$.

Считая, что распределение может быть реализовано в результате действия управляющей системы, имеем:

$$\int_r \psi(r, t) dr = 0 \quad (4-21)$$

Условие (4-21) является условием устойчивости системы при обработке управляющих воздействий по изменению формы распределения потока, поэтому можно рассматривать составляющие функции $\psi(r, t)$ как уставки всех регулирующих каналов подсистемы ЛАР.

В пределах малых отклонений можно считать, что изменение потока в реакторе происходит по закону

$$\Phi(r, t) = \Phi_0(r) \exp\left(\frac{t}{T}\right) \quad (4-22)$$

Тогда изменение функции формы также можно представить в виде:

$$\psi(r, t) = \Phi_0(r) e^{\frac{t}{T}} - \Phi_0'(r) e^{\frac{t}{T}}. \quad (4-23)$$

Пронормируем функцию (4-23) на действительное значение потока и получим:

$$\frac{\psi(r, t)}{\Phi(r, t)} = 1 - \frac{\Phi_0'(r, t)}{\Phi_0(r)} = \gamma(r) \quad (4-24)$$

Таким образом, если рассматривать величины $\gamma(r)$ как нормированные уставки каналов ЛАР, то в пределах малых отклонений они не будут зависеть от изменения интегрального значения нейтронного потока. Очевидно, чем более распределенным по пространству является воздействие интегрального регулятора, тем справедливее выражение (4-24).

Указанный алгоритм управления может быть реализован в структуре МСАР, представленной на рис. 4.23. Здесь уставка регулятора интегральной мощности Φ_0^* задается фиксированной, а уставки локальных регуляторов формы распределения потока Φ_{0n} в любой момент времени определяются суммой текущих значений потоков в зонах управления $\sum_{i=1}^n \Phi_{gi}$ и формой желаемого распределения, которая задается коэффициентами передачи **Kn**.

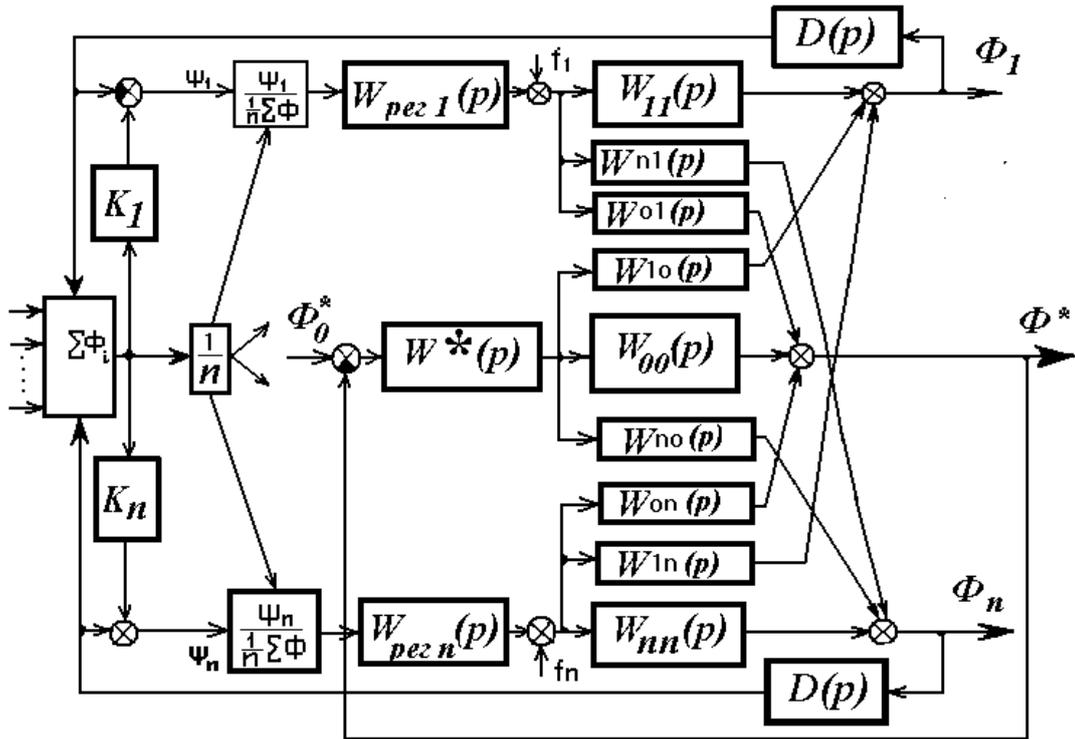


Рис. 4.23. Структурная схема МСАР по относительным координатам потока в зонах управления

Сохранение условия критичности требует, чтобы сумма коэффициентов K_n была всегда равна единице:

$$K_1 + K_2 + \dots + K_n = 1. \quad (4-25)$$

Сумма текущих значений потоков в зонах пропорциональна в общем случае уровню интегрального потока, если регулирование этого потока производится по показаниям штатных ионизационных камер и равна Φ^* , если интегральное значение потока определяется по усреднению показаний всех датчиков внутривреакторного контроля.

Будем считать, что регуляторы ЛАР идентичны по своим динамическим характеристикам, то есть

$$W_{pez1}(p) = W_{pez2}(p) = \dots = W_{pezN}(p).$$

Фактически это условие выполнимо, если регулирующие органы всех ЛАР имеют одинаковую эффективность. Составим уравнение движения системы относительно интегрального потока:

$$\Phi^*(p) = W^*(p)W_{00}(p)[\Phi^* - \Phi_0^*] + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n W_{pez i}(p)A_{0i}(p) \left[\frac{\Phi_{gi} - \Phi_{0i}}{\Phi_{gi}} \right], \quad (4-26)$$

где $W_{00}(p)$ – передаточная функция реактора по каналу регулирования интегральной мощности; A_{0i} – численное значение коэффициента взаимосвязи i -го канала ЛАР и канала регулирования интегральной мощности.

Тогда, если передаточная матрица объекта симметрична а сумма коэффициентов усилителей ЛАР равна единице, то получаем уравнение движения в виде:

$$\Phi^*(p) = W^*(p)W_{00}(p)[\Phi^*(p) - \Phi_0^*(p)] \quad (4-27)$$

так как согласно принятому алгоритму управления (4-21), всегда выполняется

$$\sum_{i=1}^n \left[\frac{\Phi_{gi} - \Phi_{0i}}{\Phi_{gi}} \right] = 0.$$

Уравнение (4-27) показывает, что в данной структуре системы достигается автономность системы каналов ЛАР относительно канала регулирования интегральной мощности. Необходимо отметить при этом, что автономность здесь достигается не по абсолютным значениям потока, а по их отклонениям от интегральной мощности, то есть уже в другой системе координат.

Таким образом, одностороннее устранение взаимосвязей между подсистемами МСАР реактора в данной структуре позволяет в режиме стабилизации регулировать интегральный уровень мощности с сохранением заданной формы распределения.

Рассмотрим теперь вопрос об отработке локальных возмущений реактивности в системе, характер переходных процессов при этом будет определяться уже взаимосвязями ЛАР между собой. Определим, при каких условиях каждый из регуляторов ЛАР будет обрабатывать возмущения потока, действующие только в его зоне управления, и будет слабо чувствителен к «чужим», несобственным возмущениям.

Предположим, что в общем виде передаточная матрица реактора может быть представлена в виде:

$$\bar{H}(p) = W_{00}(p)\bar{A},$$

где \bar{A} – числовая матрица, элементами которой являются коэффициенты передачи подсистем МСАР. Представим передаточные функции каналов передачи одного и того же возмущения F_j на выходные координаты ψ_i и ψ_j :

$$B_{ij}(p) = (A_{ij} - K_i \sum_{i=1}^n A_{ij}) W_{00}(p) D(p);$$

$$B_{jj}(p) = (A_{jj} - K_j \sum_{i=1}^n A_{ij}) W_{00}(p) D(p),$$

где K_i и K_j – коэффициенты усиления каналов ЛАР; $D(p)$ – передаточная функция детекторов контроля потока, одинаковая для всех каналов ЛАР; A – соответствующие коэффициенты числовой матрицы взаимосвязей; $W_{00}(p)$ – передаточная функция реактора.

Перепишем выражения в виде:

$$B_{ij}(p) = (A_{ij} - K_i A_{jj} - K_i \sum_{i=1}^n A_{ij} \delta_{ij}) W_{00}(p) D(p),$$

$$B_{jj}(p) = (A_{jj} - K_j A_{jj} - K_j \sum_{i=1}^n A_{ij} \delta_{ij}) W_{00}(p) D(p),$$

где δ_{ij} – символ Кронекера.

Предположим, что $A_{jj} > A_{ij}$ и $A_{ij} = A_{ji} (i \neq j)$. Последнее справедливо, если заданной формой распределения является равномерное распределение. Тогда выражения для передаточных функций принимает вид:

$$B_{ij}(p) = [A_{ij} - K_i A_{jj} - K_i (n-1) A_{ij}] W_{00}(p) D(p),$$

$$B_{jj}(p) = [A_{jj} - K_j A_{jj} - K_j (n-1) A_{ij}] W_{00}(p) D(p).$$

Для равномерного распределения потока справедливо равномерное распределение коэффициентов передачи между каналами ЛАР-ов:

$K_i = K_j = \frac{1}{N}$, следовательно, окончательно имеем:

$$B_{ij}(p) = [A_{ij} - \frac{1}{n} A_{jj} - \frac{n-1}{n} A_{ij}] W_{00}(p) D(p),$$

$$B_{jj}(p) = [A_{jj} - \frac{1}{n} A_{jj} - \frac{n-1}{n} A_{ij}] W_{00}(p) D(p).$$
(4-28)

Отсюда видно, что при устремлении количества точек контроля N к бесконечности

$$B_{ij}(p) \rightarrow 0,$$

что обеспечивает селективную инвариантность от любого возмущения F_j . В случае конечного числа точек контроля выражения (4-28) принимают вид:

$$\begin{aligned} B_{ij}(p) &= -\frac{1}{n}(A_{jj} - A_{ij})W_{00}(p)D(p), \\ B_{jj}(p) &= \frac{n-1}{n}(A_{jj} - A_{ij})W_{00}(p)D(p). \end{aligned} \quad (4-29)$$

Определив отношение,

$$b = \frac{B_{ij}(p)}{B_{jj}(p)} = \frac{-1}{n-1}, \quad (4-30)$$

можно найти конечное число точек контроля n , при котором будут выполняться условия селективной инвариантности каналов регулирования при заданной величине точности регулирования:

$$\frac{1}{N-1} < \frac{\varepsilon}{L_{\max}} \quad \text{или} \quad N > 1 + \frac{L_{\max}}{\varepsilon} \quad (4-31)$$

где L_{\max} – максимальное значение коэффициента взаимосвязи зон; ε – заданная точность регулирования.

Таким образом задача синтеза МСАР в режиме слежения сводится к конструированию регуляторов в каналах ЛАР на основе принятых требований к качеству переходных процессов. Методика синтеза состоит в эквивалентировании системы относительно i -го сепаратного канала и его конструировании с помощью классических методов одномерных систем. В этом случае доведение расчета до количественного результата требует определения элементов передаточной матрицы коэффициентов взаимосвязи реактора.

При работе МСАР реактора в режиме слежения при смене заданной формы распределения $\Phi(r,t)$ на желаемое $\Phi'(r,t)$ первостепенное значение приобретают вопросы, касающиеся собственно задания желаемого распределения с учетом ограничений на распределение запаса реактивности на органах управления, предистории работы реактора и с учетом определенной функции цели. Но решение оптимизационных задач выходит за рамки данной работы.

Представляет интерес сопоставление полученной структуры системы, работающей по относительным координатам, со структурой односторонней

автономной итерационной МОСАР реактора рассмотренной ранее. В обоих случаях регулирование интегральной мощности реактора осуществляется отдельным регулятором, а регулирование формы распределения потока производится многомерной подсистемой ЛАР по относительным координатам. Здесь синтез этой структуры был произведен на основании физических принципов работы реактора. Нетрудно заметить, что с помощью метода неособых эквивалентных преобразований мы получили ранее ту же структуру системы. Это позволяет рассматривать метод декомпозиции как метод общего синтеза структур односторонних МСАР, содержащих в своей структуре синхронизирующие и усредняющие связи [12].

Важнейшим свойством МСАР, работающей по относительным управляемым координатам является достижение независимой работы регуляторов ЛАР от регулятора интегральной мощности. Это свойство можно рассматривать как проявление односторонней автономности подсистемы ЛАР от САР интегральной мощности, но выполненное другими техническими средствами. Это иллюстрируют структурные схемы циклической системы и системы с относительными координатами

Достижение односторонней развязки между подсистемами данной МСАР можно трактовать как искусственное выделение управляемой части системы. Действительно, при переходе к новому базису координат мы получаем структуру, в которой уравнение МСАР разбивается на две группы так, что в уравнения второй группы (ЛАР) не входят фазовые координаты и входные сигналы первой группы (по интегральной мощности). Такие МСАР называются не полностью управляемыми. С точки зрения достигаемого результата: стабилизации формы при изменении интегральной мощности, оба варианта наложения связей в регуляторе являются равнозначными, но техническая реализация системы ЛАР, регулирующей форму распределения потока по относительным координатам, является более простой.

Исследования на сеточной модели МСАР, работающей по относительным значениям потока

Рассмотрим результаты лабораторных исследований вышеописанной МСАР на сеточной модели реактора. Цель этих исследований заключалась в том, чтобы:

- определить параметры настройки регуляторов формы распределения потока, оптимальные с точки зрения качества переходных процессов,
- оценить работоспособность и динамические характеристики системы в режимах стабилизации и слежения,
- подготовить макет измерительной части системы к производственным испытаниям на реакторе.

Макет МСАР, испытанный на модели, состоял из регулятора интегральной мощности реактора непрерывного действия и четырех регуляторов релейного действия для регулирования формы распределения потока. Датчики регулятора общей мощности реактора являются безинерционными и располагаются в отражателе сеточной модели. Инерционные датчики регуляторов формы распределения были расположены в ячейках модели активной зоны в окрестности своих стержней управления. В пульте управления были расположены сервоприводы и усилительные элементы регуляторов.

Измерительная часть системы, задатчики мощности и формы распределения, осуществляющие математические операции согласно принятого алгоритма, были собраны на базе операционных усилителей аналогового типа. Общая структурная схема макета МСАР приведена на рис. 4.21. Качество переходных процессов оценивалось на выходе измерительной части МСАР.

Настройка параметров регулятора каждой сепаратной системы регулирования производилась по найденному минимуму функции

$$t_{\text{рег}} = f\left(\frac{d}{dt} \delta K\right) \quad (3-32)$$

при заданных значениях постоянной времени датчиков T_d , точности регулирования ϵ и коэффициента возврата реле m . Определение функциональной зависимости производилось при совместной работе системы регулирования общей мощности и одного из каналов ЛАР. На рис. 4.24 представлены найденные зависимости длительности переходного процесса в канале от скорости введения реактивности при различных значениях постоянной времени датчиков нейтронов.

Из анализа кривых видно, что для значений постоянных времени датчиков $T_d = 0 \div 3$ сек минимуму функции соответствует диапазон изменения реактивности в пределах $(0,4 \div 0,8) \cdot 10^{-4}$ [1/сек]. При увеличении постоянной времени датчиков минимум функции (3-31) смещается в сторону меньших скоростей введения реактивности.

Поскольку в дальнейшем производственные испытания системы производились на датчиках типа ТНД-С с постоянной времени около 3 сек, то найденные значения скорости введения реактивности использовались для установления параметров настройки всех регуляторов формы распределения потока. При этом заданная точность регулирования ϵ составляла 1 %, а величина $m=0,8$.

Переходные процессы рисунка рис. 3.28. получены при отработке внешнего возмущения реактивности $\delta K=5 \cdot 10^{-4}$ в зоне регулирования

второго сепаратного канала. Как видно из графика, длительность переходного процесса составляет около 18 сек.

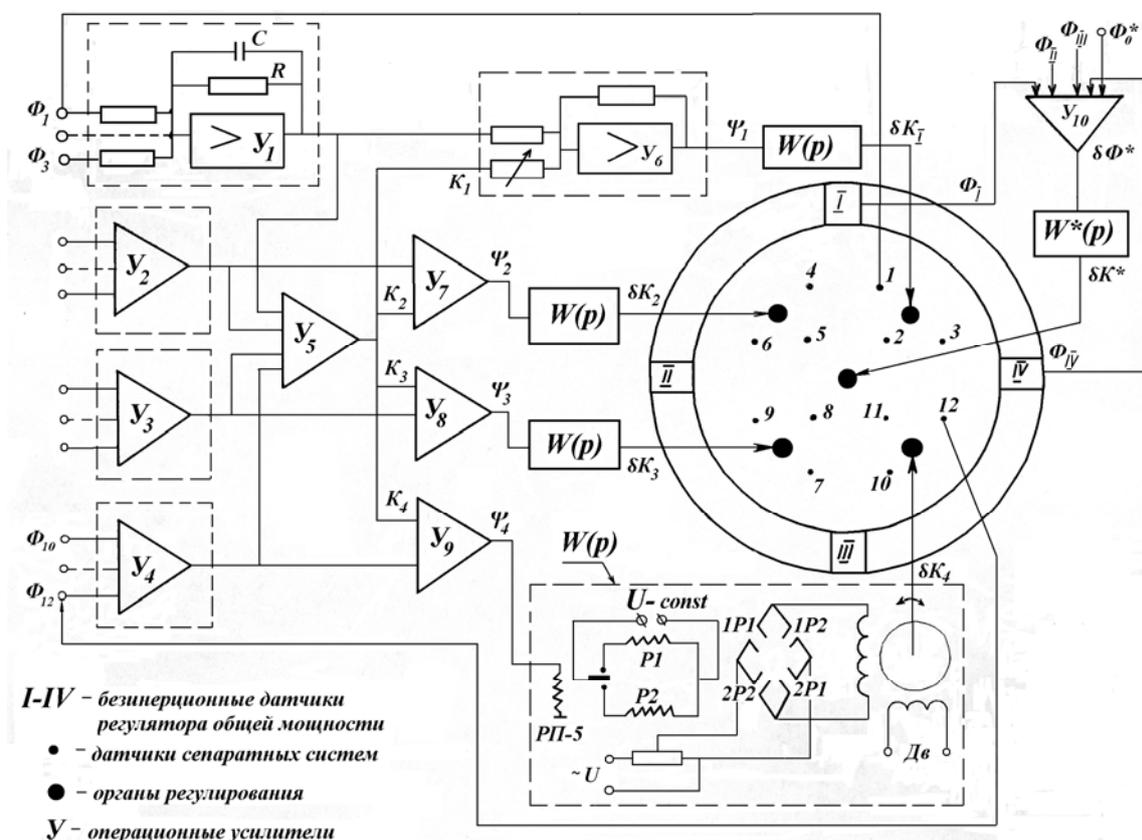


Рис. 4.27. Структура модели для исследования МСАР по относительным координатам

Рис. 4.28 иллюстрирует работу системы в режиме слежения, то есть при смене уставок формы рсараделения потока в двух зонах управления на $\pm 5\%$. Длительность переходного процесса в сепаратных каналах не превышает 25 сек, а форма переходной кривой близка к аperiодической.

Таким образом лабораторные испытания МСАР по относительным координатам на сеточной модели реактора нулевой мощности подтвердили ее работоспособность при отработке управляющих воздействий и внешних возмущений и позволили выбрать оптимальные с точки зрения длительности переходных процессов параметры настройки сепаратных каналов регулирования.

Производственные испытания системы на уран-графитовом ядерном реакторе

Исследуемая многосвязная система состояла из двух самостоятельных каналов регулирования: канала стабилизации интегральной мощности

реактора, работающего от штатных ионизационных камер СУЗ и одного канала регулирования формы распределения нейтронного потока, работающего от точечных детекторов внутриреакторного контроля типа ТНД-С штатной системы контроля распределения нейтронного потока по радиусу активной зоны. Геометрия эксперимента представлена на рис. 4.29.

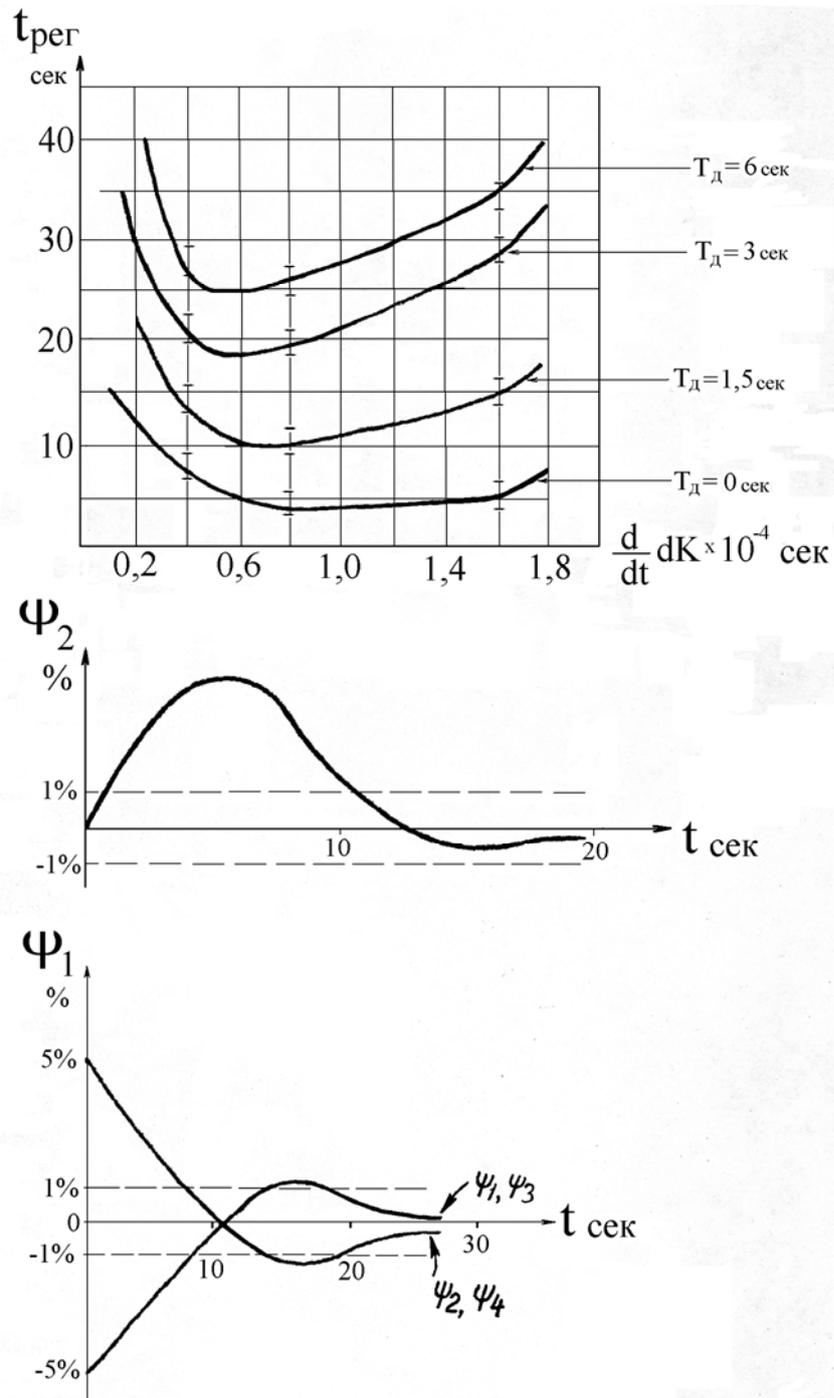


Рис. 4.28. Переходные процессы в МСАР по относительным координатам, полученные на сеточной модели

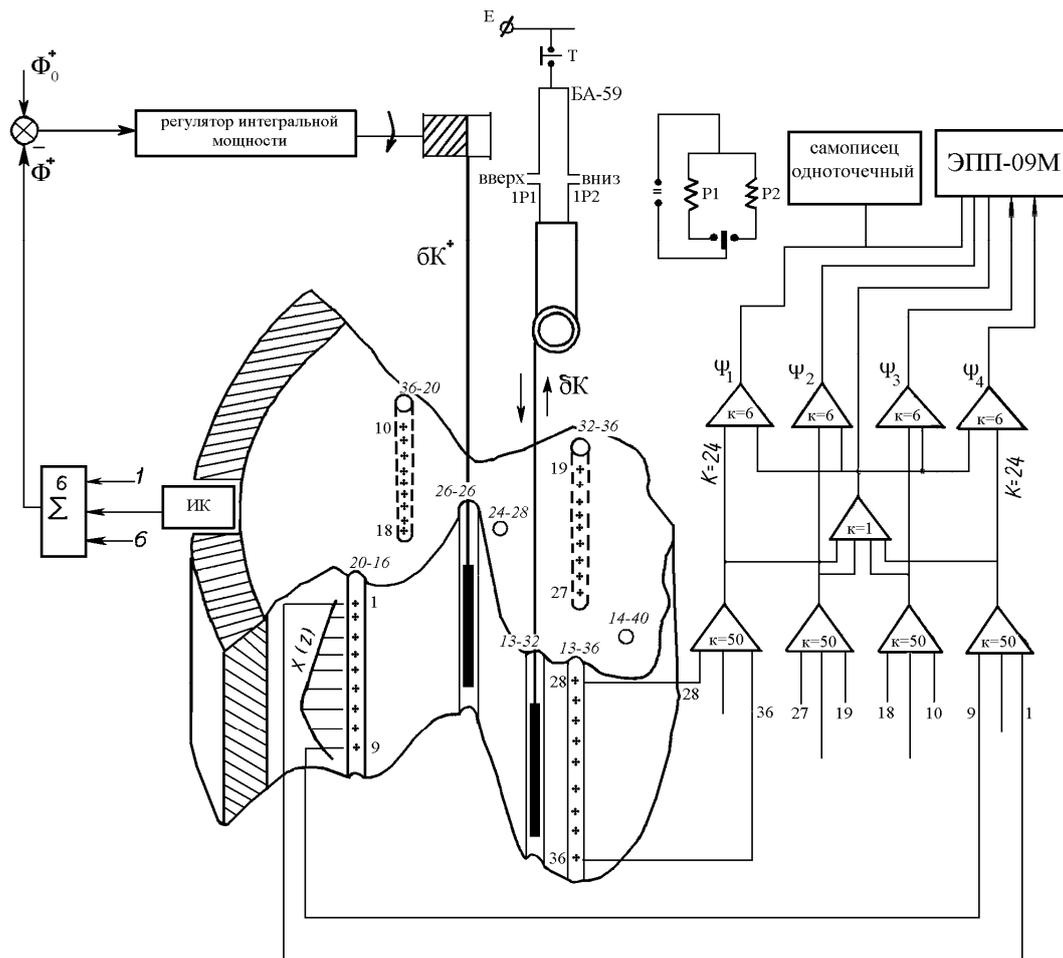


Рис. 4.29. Геометрия производственных испытаний МСАР по относительным координатам на ядерном реакторе

Испытания производились при очередном пуске реактора на 50 % номинальной мощности. В качестве регулирующего органа канала ЛАР системы использовался один из стержней ручной регулировки со штатным сервоприводом. Изменение формы распределения в зоне регулирования ЛАР-а осуществлялось при линейном перемещении стержня. Параметры настройки релейной системы регулирования в канале ЛАР были установлены следующие: $\varepsilon=0.7\%$, $m=0.8$, $V_{ст}=0.3$ м/сек. $\delta K_{ст}=3.6$ линейных метров реактивности. Заданным распределением считалось распределение потока в стационарном состоянии на определенном, неизменном уровне мощности. При этом выходные величины измерительного блока системы (сигналы рассогласования в сепаратных каналах регулирования) устанавливались нулевыми с помощью потенциометров задания профиля распределения. На рис. 3.30а представлена кривая переходного процесса в канале ЛАР при внесении положительного изменения реактивности в ячейке 14-40. Величина внесенного воз-

мушения была равна $5 \cdot 10^{-4}$ 1/сек. Длительность переходного процесса составила 12 сек, колебания отсутствуют. Максимальное значение динамической ошибки не превышает $\pm 2\%$ от номинального значения регулируемого потока. Регулятор интегральной мощности реактора устойчиво отработал внесенное внешнее возмущение реактивности.

Положение стержней во время одного из подобных экспериментов иллюстрирует табл. 3:

Положение стержней до внесения возмущения	PP(14-40)	6,5 м
	AP4(13-32)	0,9 м
	AP2(26-26)	4,3 м
Положение стержней после отработки возмущения	PP(14-40)	4 м
	AP4(13-32)	4,1 м
	AP2(26-26)	4,1 м

Незначительное несоответствие положения стержня AP2 до и после внесения возмущения можно объяснить наличием зоны нечувствительности релейной системы ЛАР, а также наличием не предусмотренных программой испытаний ДТП, установленных в ячейках (13-34) и (14-30), снизивших эффективность стержня AP4. Результаты эксперимента свидетельствуют о достаточно хорошем качестве регулирования в МСАР при отработке сигналов на изменение формы распределения нейтронного потока.

Испытания МСАР на выполнение условий автономности канала ЛАР от канала регулирования интегральной мощности проводились при снижении уровня мощности от номинального до 80% и при внесении внешних возмущений реактивности. При этом записывались изменения дискретных значений функции отклонения ψ , развивающиеся на 4-х выходах устройства контроля формы распределения (измерительной части МСАР). На рис. 4.26б представлены изменения составляющих функции отклонения ψ при внесении отрицательных возмущений $5 \cdot 10^{-4}$ 1/сек с помощью стержня AP4(13-32). При этом канал ЛАР был разомкнут. Как видно из графика, величина рассогласования ψ_4 превышает абсолютные значения ψ_1 , ψ_2 , ψ_3 примерно в три раза, причем изменения последних практически не выходят за пределы зоны нечувствительности системы. Следует отметить, что при количестве зон контроля, равном $N=4$ величина B в выражении (4-30) равна

$$|B| = \frac{1}{N-1} = \frac{1}{3}$$

что совпадает с экспериментальными результатами.

Таким образом, учитывая ψ_{\max} из графика рис. 3.30а, можно сделать вывод, что для автономности каналов ЛАР от канала регулирования интегральной мощности при отработке сигналов возмущения реактивности не более $5 \cdot 10^{-4}$ и точности регулирования $\epsilon = 0.7\%$, количество зон контроля и, соответственно количество одновременно работающих каналов ЛАР, согласно (4-31) должно быть не менее шести.

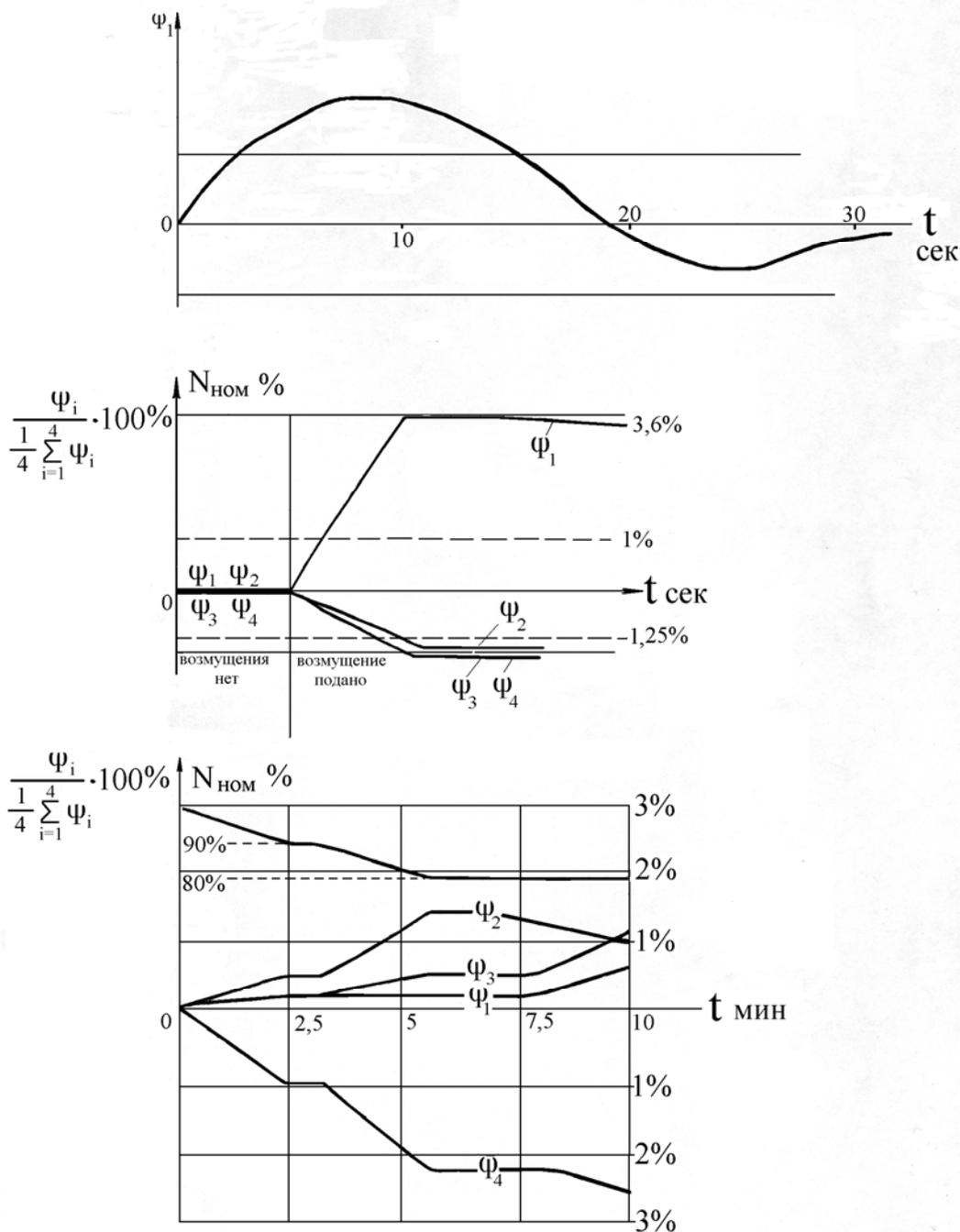


Рис. 4.30. Переходные процессы в МСАР по относительным координатам, полученные в результате производственных испытаний на реакторе

Изменения составляющих функции ψ при спаде интегральной мощности реактора представлены на рис. 4.30в. Как видно из графика, при изменениях мощности на **10 %** значения функции ψ в контролируемых точках не выходят за пределы зоны, составляющей $\pm 1 %$ от интегрального значения мощности. Это говорит о том, что в данном диапазоне изменения мощности изменение интегрального значения потока не приводит к существенному изменению относительных значений потоков в зонах регулирования ЛАР, и предложенный алгоритм управления работоспособен.

При дальнейшем снижении уровня мощности отклонения составляющих функции ψ увеличиваются.

Следует отметить, что в аналогичных опытах на сеточной модели отклонения ψ составляли **1 %** от номинальных значений при изменении общей мощности на **50 %**. На реальном реакторе это выполняется при изменении интегральной мощности лишь на **10 %**. При больших изменениях мощности начинают сказываться температурные эффекты и эффекты отравления, искажающие форму распределения.

Таким образом, проведенные испытания показали, что алгоритм работы МСАР по регулированию относительных потоков в зонах управления работоспособен. Система регуляторов формы распределения потока работает устойчиво совместно с системой поддержания критичности и является автономной по отношению к ней. Существующая система сервоприводов стержней ручного регулирования и схема управления ими могут быть использованы без существенных конструктивных изменений в МСАР распределения нейтронного потока. Хорошее качество регулирования и относительная простота технической реализации системы открывает возможности для исследования на реакторах МСАР с большим количеством каналов ЛАР.

Существует точка зрения, что МСАР реактора с разделенными функциями управления нейтронным полем нежизнеспособна, поскольку стержни регулятора САР, не участвуя в управлении распределением мощности, только искажают достигнутое распределение потока [14]. Наши исследования на сеточных моделях реактора, подобных описанным в [3], и на промышленных реакторах позволяют нам утверждать, что МСАР с разделенными функциями обладает определенными преимуществами при управлении нейтронного поля реактора.

Рассмотрим динамику взаимодействия подсистем САР и ЛАР в системе с разделенными и совмещенными функциями. Передаточную матрицу реактора без учета тепловой обратной связи примем в общем виде состоящей из трех зон управления:

$$\bar{H} = \begin{bmatrix} h_{11}(p) & h_{12}(p) & h_{13}(p) \\ h_{21}(p) & h_{22}(p) & h_{23}(p) \\ h_{31}(p) & h_{32}(p) & h_{33}(p) \end{bmatrix}. \quad (4-33)$$

Для МСАР с совмещенными функциями управления это будут три канала ЛАР, а для МСАР с разделенными функциями это будут два канала ЛАР и один канал САР, например, канал с зоной управления $h_{22}(p)$.

Рассмотрим вид элементов передаточной матрицы реактора. Известно, что в первый момент после внесения локального возмущения реактивности происходит перераспределение потока нейтронов по активной зоне за счет высших гармоник. Этот процесс заканчивается за доли секунды, после чего устанавливается некоторый одинаковый асимптотический период изменения потока нейтронов во всех зонах управления.

В этот момент элементы передаточной матрицы (4-33) могут быть вычислены с помощью метода локальной кинетики для одногруппового приближения. Как показано ранее в главе 2, передаточная матрица реактора может быть принята в виде:

$$\bar{H} = \left[\frac{1}{l_{\text{эф}} p + \beta} * \bar{B} + \frac{\lambda}{p(l_{\text{эф}} p + \beta)} * \bar{M} \right], \quad (4-34)$$

$$\text{где } \bar{B}(p) = \begin{bmatrix} 1 & L_{12} & L_{13} & L_{1n} \\ L_{21} & 1 & L_{23} & L_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ L_{n1} & L_{n2} & L_{n3} & 1 \end{bmatrix} \quad \bar{M} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

Поэтому для диагональных элементов матрицы, которые определяют передаточные функции зон управления, получаем:

$$h_{ii}(p) = \frac{p + \lambda}{p(l_{\text{эф}} p + \beta)}. \quad (4-35)$$

А для недиагональных элементов матрицы, которые определяют передаточные функции взаимосвязей, имеем:

$$h_{ij}(p) = \frac{L_{ij} p + \lambda}{p(l_{\text{эф}} p + \beta)}. \quad (4-36)$$

Матричное уравнение движения МСАР представим в виде:

$$[\bar{I} + \bar{H} * \bar{R}] * \bar{\varphi} = \bar{H} * \bar{\Delta k} + \bar{H} * \bar{R} * \bar{\varphi}_0, \quad (4-37)$$

где $\bar{R}(p)$ – передаточная матрица регулятора диагонального вида; $\bar{\Delta k}$ – вектор возмущений реактивности; $\bar{\varphi}_0$ – вектор задающих воздействий.

Для анализа устойчивости МСАР реактора используем метод декомпозиции. Перейдем к эквивалентной системе, в которой каналы МСАР будут являться независимыми друг от друга. С этой целью введем новый базис координат, связанный со старым невырожденной матрицей преобразования \bar{C} :

$$\bar{\Phi} = \bar{C}^{-1} * \bar{\varphi}; \quad \bar{\Delta K} = \bar{C}^{-1} * \bar{\Delta k}; \quad \bar{\Phi}_0 = \bar{C}^{-1} * \bar{\varphi}_0. \quad (4-38)$$

Матрицы уравнения (3-37) также подвергаем преобразованию подобия:

$$\bar{H}^* = \bar{C}^{-1} * \bar{H} * \bar{C}; \quad \bar{R}^* = \bar{C}^{-1} * \bar{R} * \bar{C}. \quad (4-39)$$

Но если диагональная матрица \bar{R} не изменяется при преобразовании подобия, то вид матрицы \bar{H} зависит от вида матрицы преобразования. Если мы хотим, чтобы матрица \bar{H} стала диагональной, то матрицу преобразования \bar{C} , пользуясь произволом ее выбора, необходимо специально подобрать. Выбираем матрицу \bar{C} как матрицу канонического базиса, подставляем (4-38) и (4-39) в уравнение (4-37) и получаем уравнение эквивалентной системы, в котором каналы регулирования МСАР не будут связаны друг с другом. Анализ такой системы на устойчивость может быть проведен N – кратным применением какого-либо критерия к каждому сепаратному каналу. Если все каналы эквивалентной системы окажутся устойчивыми, то и исходная связанная система будет устойчива. Значительного сокращения анализа можно добиться, если представить матрицу реактора симметричной. В этом случае анализ на устойчивость сводится к исследованию всего двух каналов, соответствующих двум собственным числам $(N-1)L$ и $(-L)$ матрицы \bar{H} :

$$\bar{H}^* = \bar{C}^{-1} * \bar{H} * \bar{C} = \begin{bmatrix} (N-1)L & 0 & 0 \\ 0 & -L & 0 \\ 0 & 0 & -L \end{bmatrix},$$

где N – количество сепаратных каналов системы.

Сепаратный канал с собственным числом $(N-1)L$ носит название усредненного эквивалентного движения, а канал с собственным числом $(-L)$ называют относительным движением. Количество одинаковых каналов относительного движения равно $N-1$. Передаточные функции объектов по усредненному и относительному движению определяются следующим образом [5]:

$$H_{уср}(p) = h_{ii}(p) + (N-1) * h_{ij}(p); \quad (4-40)$$

$$H_{отн}(p) = h_{ii}(p) - h_{ij}(p). \quad (4-41)$$

Можно показать, что устойчивость системы будет сильно зависеть от расстояния между датчиками соседних ЛАР. Обозначим R_{ii} – расстояние стержня управления i -го ЛАР-а от своего внутрореакторного датчика, а R_{ij} – расстояние этого же датчика от стержня j -го соседнего ЛАР-а. Очевидно, что при увеличении расстояния R_{ii} оно стремится сравняться с R_{ij} и поэтому взаимосвязи ЛАР-ов выравниваются $h_{ii}(p) \rightarrow h_{ij}$. При этом передаточная функция реактора по относительному движению из выражения (4-41) вырождается в ноль. Потеря относительного движения в МСАР приводит к невозможности выравнивания плотности потока в данной зоне управления относительно соседней зоны. Именно это обстоятельство подтверждает тот факт, что при работе МСАР по известному алгоритму зонного регулирования все каналы ЛАР прекрасно справляются с задачей регулирования средней мощности реактора, но попытка выровнять распределение потока нейтронов изменением задающих воздействий на входах ЛАР-ов обречена на неудачу, если детекторы ЛАР-ов находятся в непосредственной близости друг от друга. Без специального регулятора средней мощности подсистема ЛАР может лишь стабилизировать распределение потока нейтронов, но не управлять им по какой-либо внешней программе.

Рассмотрим взаимодействие каналов МСАР по второму варианту, по алгоритму с разделенными функциями подсистем. Допустим, вторая зона управления $h_{22}(p)$ используется для управления средней мощностью, а остальные две – для регулирования потока в своих зонах управления. При этом характер взаимных связей в матрице объекта меняется. Взаимосвязи $h_{12}(p)$ и $h_{32}(p)$ становятся усредняющими, то есть проявляются как результат влияния суммы выходных потоков (то есть средней мощности) на ЛАР-ы. Взаимосвязи $h_{13}(p)$ и $h_{31}(p)$

проявляются в случае, когда появляется разность между выходными потоками в зонах ЛАР. Что касается взаимосвязей $h_{21}(p)$ и $h_{23}(p)$, то они являются внешними возмущениями для канала регулирования средней мощности со стороны каналов ЛАР. Воспользуемся выражениями для передаточных функций усредненного и относительного движения для такой системы. Как показано в главе 2, для МСАР, содержащих и усредняющие и синхронизирующие связи одновременно, при составлении схемы усредненного движения надо учитывать только усредняющие перекрестные связи

$$H(p)_{уср} = h_{ii}(p) + h_{ij}(p), \quad (4-42)$$

а при составлении схемы относительных движений учитывать только синхронизирующие перекрестные связи

$$H(p)_{отн} = h_{ii}(p) + N * h_{ij}(p). \quad (4-43)$$

Из выражения (4-43) можно видеть, что сближение детекторов ЛАР в этом случае не приводит к вырождению сепаратного канала вания по относительному движению, что открывает возможности оперативного управления формой распределения потока нейтронов в зонах управления.

Компенсация взаимных связей подсистем САР и ЛАР может быть сравнительно просто обеспечена системными средствами. В частности компенсация усредняющих связей выполняется при организации управления потоками в зонах ЛАР по относительному принципу, как показано на рис. 4.31, где Φ_0 – уставка средней мощности реактора, а уставки в каналах ЛАР организованы по относительному принципу.

Компенсация синхронизирующих связей между каналами ЛАР, возникающих при управлении формой нейтронного поля, может быть обеспечена любыми средствами, обеспечивающими условие

$$\sum_i \Delta k_i = 1 \quad (4-44)$$

для всех вносимых реактивностей Δk_i . При этом структурная схема МСАР приобретает вид, указанный на рис. 4.31, где подсистемы можно считать не связанными. Добиться этого можно, например, увеличением зоны нечувствительности регуляторов ЛАР в нужных пределах, или введением запрета на перемещение стержней управления тех ЛАР, у которых знак движения совпадает со знаком движения стержня САР. В общем случае компенсирующие связи между регуляторами ЛАР проектируются по известной методике [12].

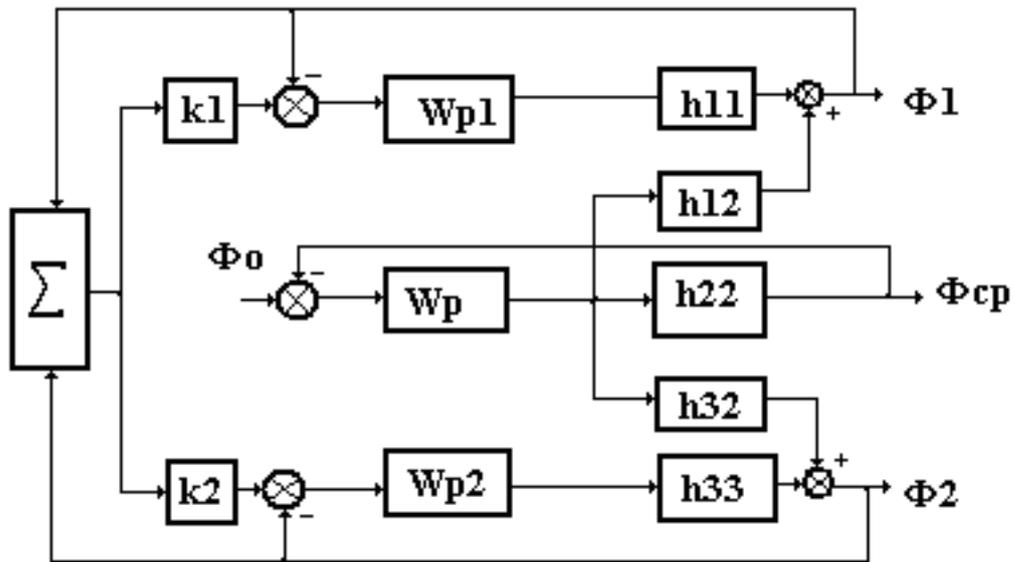


Рис. 4.31. Структура MCSAP реактора по относительным потокам в зонах ЛАР

ГЛАВА 5. МНОГОСВЯЗНЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ МОЩНОСТЬЮ РЕАКТОРА БЕЗ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО РАЗДЕЛЕНИЯ ПОДСИСТЕМ

Управление нейтронным полем ядерного реактора можно при желании вести без специально выделенного канала регулирования интегральной мощности. Так как в отечественных реакторах не существует механизма регулирования интегральной мощности по расходу теплоносителя, как, например, в английских газо-охлаждаемых реакторах, то перемещение специального стержня, управляющего критичностью всей системы, расположенного в самой энергонапряженной области реактора – в центре, мешает решению задачи выравнивания потока нейтронов. Поэтому лучшим выходом из ситуации является перевод центральной зоны реактора в одну из зон управления формой нейтронного поля, а функцию управления интегральной мощностью можно поручить всем регуляторам ЛАР.

Такая система носит название *функционально – совмещенной МОСАР* реактора или, как ее стали называть на производстве, – *МОСАР зонного управления*. В отличие от системы функционально-разделенного управления мощностью реактора эта МСАР является однотипной, то есть все каналы регулирования здесь абсолютно идентичны по техническим и динамическим характеристикам. Это говорит о том, что такая система может быть создана только тогда, когда быстродействие каналов системы является достаточно высоким для выполнения обеих функций – и регулирования средней по объему реактора мощности и регулирования мощности в отдельных зонах управления. Прогресс, достигнутый в области создания безинерционных детекторов внутриреакторного контроля, позволяет это сделать.

Для систем регулирования мощности без функционального разделения методом анализа является метод декомпозиции. Передаточная матрица реактора в этом случае может рассматриваться как симметричная, что значительно упрощает и ускоряет анализ, сводя его к анализу двух эквивалентных движений – усредненного и относительного.

Рассмотрим анализ МСАР реактора без функционального разделения подсистем методом декомпозиции. Целью анализа будем считать оценку устойчивости и качества регулирования в сепаратных каналах системы. Оценим также качество работы системы в режимах стабилизации заданной формы распределения и в следящем режиме при смене уставок на форму распределения.

Матричная структура системы рассматривается в прежнем виде (рис. 5.01а), где обозначены:

$\bar{R} = r_{ii}(p)\bar{E}$ – диагональная передаточная матрица регулятора с одинаковыми элементами;

$\bar{H} = W_T(p)\bar{E}$ – диагональная матрица прямых связей в реакторе с одинаковыми элементами;

$\bar{M} = W(p)\bar{E}$ – матрица перекрестных связей в реакторе;

$\bar{D} = d_{ii}(p)\bar{E}$ – диагональная матрица детекторов с одинаковыми элементами;

$\bar{\lambda}$ – вектор задающих воздействий;

$\bar{\mu}$ – вектор регулирующих воздействий.

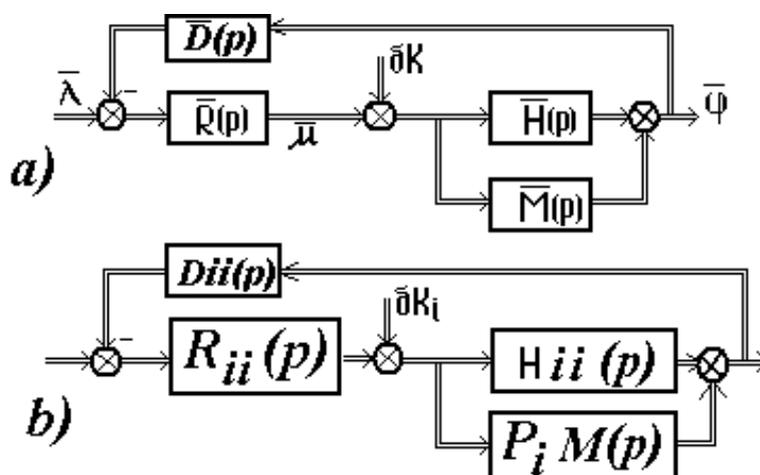


Рис. 5.01. Структурные преобразования МСАР по методу декомпозиции

Исходя из схемы, запишем матричные уравнения движения системы:

$$\begin{aligned} \bar{\varphi} &= (\bar{H} + \bar{M}) * (\bar{\Delta K} + \bar{\mu}); \\ \bar{\mu} &= \bar{R} * (\bar{\lambda} - \bar{D}\bar{\varphi}). \end{aligned} \quad (5-01)$$

Исключая $\bar{\mu}$ и полагая матрицу $[\bar{E} + (\bar{H} + \bar{M})\bar{D}\bar{R}]$ неособой, получаем уравнение движения выходных координат реактора в векторной форме:

$$\bar{\varphi} = [\bar{E} + (\bar{H} + \bar{M})\bar{D}\bar{R}]^{-1} [(\bar{H} + \bar{M})\bar{\Delta K} + (\bar{H} + \bar{M})\bar{R}\bar{\lambda}]. \quad (5-02)$$

Будем предполагать, что точки приложения регулирующего и возмущающего воздействий в реакторе совпадают, то есть другими словами, что детекторы контроля потока расположены непосредственно в канале СУЗ. Проведем декомпозицию уравнения (5-02), применяя к нему неособое преобразование подобия матриц. Координаты эквивалентной системы регулирования принимают вид:

$$\begin{aligned}\bar{\Phi} &= C^{-1}\bar{\varphi}; \\ \bar{\delta K} &= C^{-1}\bar{\Delta K}; \\ \bar{\Lambda} &= C^{-1}\bar{\lambda}.\end{aligned}\tag{5-03}$$

Уравнение МОСАР в новой системе координат принимает вид:

$$\bar{\Phi} = [\bar{E} + (\bar{H}^* + \bar{M}^*)\bar{D}^*\bar{R}^*]^{-1}[(\bar{H}^* + \bar{M}^*)\bar{\delta K} + (\bar{H}^* + \bar{M}^*)\bar{R}^*\bar{\Lambda}]\tag{5-04}$$

где

$$\bar{H}^* = C^{-1}\bar{H}C; \quad \bar{D}^* = C^{-1}\bar{D}C; \quad \bar{R}^* = C^{-1}\bar{R}C; \quad \bar{M}^* = C^{-1}\bar{M}C = W(p)C^{-1}\bar{A}C;\tag{5-05}$$

Так как диагональные матрицы $\bar{H}; \bar{D}; \bar{R}$ являются перестановочными с матрицей C^{-1} , то преобразование подобия не меняет их вида, то есть $\bar{H}^* = \bar{H}$; $\bar{D}^* = \bar{D}$; $\bar{R}^* = \bar{R}$. Выберем матрицу преобразования \bar{C} так, чтобы матрица \bar{M} стала диагональной, тогда многосвязная система распадется на n независимых одномерных систем.

Как известно [12], если в качестве матрицы перехода к новым координатам взять канонический базис матрицы \bar{M} , то мы получим вместо матрицы \bar{M} ее каноническую форму \bar{M}^* , которая является диагональной матрицей, а элементами ее диагонали являются характеристические числа исходной матрицы \bar{M} .

Характеристические числа матрицы \bar{M} или, что то же самое, матрицы \bar{A} являются корнями ее векового уравнения:

$$\det(\bar{A} - p\bar{E}) = 0.\tag{5-06}$$

Согласно описанному выше правилу перехода к эквивалентной системе необходимо найти характеристические числа матрицы \bar{A} . Так как исходная многосвязная система является симметричной, то характеристические числа матрицы \bar{A} вещественны и соответственно равны:

$$P_1 = n-1; \quad P_2 = P_3 = \dots = P_{n-1} = -1.\tag{5-07}$$

Столбцы матрицы преобразования \bar{C} образуются линейно независимыми собственными векторами матрицы \bar{A} . Ввиду неоднозначности, обусловленной кратностью корней уравнения (5-06), выбор векторов канонического базиса матрицы \bar{C} в нашем случае можно подчинить дополнительным условиям, облегчающим переход к эквивалентной системе или пересчет результатов исследования эквивалентной системы на исходную. Исходя из этих соображений выберем матрицу C^{-1} в следующей форме:

$$\overline{C^{-1}} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & \dots & 1 \\ 1 & -1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & -1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & 0 & 1 & -1 \end{bmatrix}. \quad (5-08)$$

Подставляя (5-08) в (5-03), определим:

$$\Phi_1 = \sum_{i=1}^n \varphi_i; \quad \Phi_2 = \varphi_1 - \varphi_2; \quad \Phi_3 = \varphi_2 - \varphi_3 \quad \text{и т. д.}$$

Аналогичным образом определяются возмущающие и задающие воздействия эквивалентной системы δK_i и Φ_{i0} .

Эквивалентная система состоит из n изолированных сепаратных каналов, которые отличаются друг от друга только коэффициентами P_i в звеньях, замещающих перекрестные связи исходной системы. Структурная схема для i -й эквивалентной сепаратной системы регулирования приведена на рис. 5.01b. При этом эквивалентная одномерная структура с коэффициентом усиления $P_1 = n-1$ в замещающем звене характеризует поведение усредненного движения выходных координат исходной системы, а остальные $n-1$ эквивалентных одномерных структур идентичны и характеризуют относительные движения выходных координат исходной системы. Так как порядок уравнений, описывающих эквивалентные сепаратные каналы, в n раз ниже порядка уравнения, описывающего исходную многосвязную систему, то исследование МСАР значительно упрощается.

С целью анализа устойчивости определим характеристическое уравнение МСАР. Так как исходная МСАР распадается на несколько эквивалентных сепаратных систем, то характеристическое уравнение эквивалентной системы распадается на несколько характеристических уравнений эквивалентных сепаратных систем. В рассматриваемой системе корни P_i для $(n-1)$ относительных движений оказались кратными поэтому достаточно проанализировать устойчивость лишь двух движений – усредненного и относительного.

Признак устойчивости МОСАР распределения плотности потока можно сформулировать следующим образом: для устойчивости МОСАР необходимо и достаточно, чтобы были устойчивыми эквивалентные сепаратные системы по усредненному и относительному движениям.

Для конкретного численного анализа зададимся видом скалярных передаточных функций элементов системы, Передаточные функции реактора $W(p)$ и $W_t(p)$ были определены ранее:

$$W_T(p) = \frac{p + \lambda}{p(l^* p + \beta)} = \frac{K_R (T_1 p + 1)}{p(T_2 p + 1)} \quad W(p) = \frac{L_{ij} p + \lambda}{p(l^* p + \beta)}. \quad (5-09)$$

Передаточную функцию внутриреакторного детектора нейтронов определим как инерционную:

$$d(p) = \frac{K_d}{T_d p + 1}. \quad (5-10)$$

Структуру регулятора каждого сепаратного канала регулирования представим как типичное последовательное соединение интегрирующего усилительного и инерционного звеньев. Необходимо добавить, что, как и в одномерной системе регулирования мощности реактора, в каждом сепаратном канале должна осуществляться нормировка сигнала рассогласования на начальное значение плотности нейтронов в соответствующей зоне управления. Передаточную функцию регулятора принимаем в виде:

$$r(p) = \frac{K_p}{p(pT_p + 1)}. \quad (5-11)$$

Подставляя выражения (5-09), (5-10) и (5-11) в характеристические уравнения усредненного и относительного движений, получаем значения характеристических полиномов для построения областей устойчивости системы. Численные значения коэффициентов передаточных функций взяты близкими к значениям параметров систем управления мощностью отечественных ядерных реакторов:

Устойчивость усредненного движения будет зависеть от количества сепаратных каналов регулирования МОСАР n , в то же время параметр n определяет точность регулирования формы распределения плотности нейтронов. Поэтому было бы целесообразным выявить каким образом влияет параметр n на устойчивость МОСАР. Анализируя кривые областей устойчивости усредненного и относительного движений, можно сделать следующие выводы:

1. Увеличение постоянной времени детекторов контроля плотности нейтронов в зонах управления приводит к резкому сокращению числа сепаратных каналов в МОСАР, что, соответственно, снижает точность регулирования формы распределения. Более того, при значениях постоянной времени датчиков T_d порядка 10 сек и более даже наличие только одного сепаратного канала регулирования при заданной структуре регулятора не обеспечивает устойчивости системы по усредненному движе-

нию, т. е. одномерная САР плотности нейтронов в реакторе будет неустойчивой. Хорошо известно, что в одномерных САР требования увеличения точности регулирования и обеспечения устойчивости являются противоречивыми. Полученные результаты показывают, что в МОСАР формы распределения плотности нейтронов, это противоречие, усугубляется противоречивостью требований увеличения точности регулирования формы распределения и устойчивости МОСАР в целом, так как для увеличения точности регулирования формы распределения необходимо увеличивать число каналов n .

2. Относительное движение устойчиво во всем диапазоне вещественных положительных значений параметра постоянной времени датчика T_d .

3. Уменьшение коэффициента усиления сепаратного канала МОСАР расширяет область устойчивости системы.

Таким образом, рассмотренная МОСАР будет неустойчивой при достаточно больших значениях постоянной времени датчика T_d , так как эквивалентное усредненное движение неустойчиво.

В проведенных выше исследованиях предполагалось, что точки приложения возмущающего и регулирующего воздействий в объекте совпадают, т. е. регулирующей орган и детектор каждого сепаратного канала МОСАР геометрически совмещены. Очевидно, однако, что технологические и конструкционные особенности, как самой активной зоны реактора, так и детекторов и регулирующих органов не всегда позволяют осуществить такую ситуацию. Это ограничение может оказать существенное влияние на работу МОСАР, следовательно, анализ такой системы необходимо проводить с учетом её практической реализации.

Рассмотрим ситуацию, когда детекторы контроля значений плотности нейтронов в каждой зоне управления геометрически разнесены с регулирующими органами соответствующих сепаратных каналов МОСАР. Предполагаем, что каждый сепаратный канал имеет один регулирующей орган и один детектор, при этом расстояние между регулирующими органами и детекторами различных сепаратных каналов много больше расстояния между i -ым детектором и i -ым регулирующим органом. Обозначим эти расстояния соответственно h_{ij} и h_{ii} причем $h_{ij} \geq h_{ii}$.

Действие любого регулирующего органа на собственный детектор можно рассматривать как действие локализованного возмущения, при этом, если детектор и регулирующей орган геометрически разнесены, то передаточные функции объекта по регулирующему воздействию и возмущению в сепаратном канале будут различны.

Так как при увеличении расстояния h_{ii} , величина коэффициента взаимосвязи зон L стремится к постоянной величине уже через 4 шага решетки технологических каналов, то передаточная функция $W_R(p) \rightarrow W(p)$. При этом относительное движение неуправляемо, так как цепь управления по относительному движению будет разомкнута. Физически этот факт означает, что МОСАР распределения плотности нейтронов будет осуществлять только регулирование некоторого среднего значения плотности нейтронов по активной зоне и не будет регулировать форму распределения плотности нейтронов.

Из анализа следует, что удаление детекторов от собственных стержней регулирования незначительно влияет на устойчивость усредненного движения. Так как по относительным движениям реактор является устойчивым статическим звеном, можно сказать, что МОСАР в целом будет устойчива и при разомкнутой цепи управления по относительному движению. Однако разомкнутость цепи регулирующих воздействий по относительному движению, приводит к тому, что всегда существует вероятность выхода части регулирующих стержней ЛАР за пределы линейности их характеристик. Это означает, что регулировать распределение потока с помощью смены уставок регуляторов ЛАР становится невозможно.

Проведенные расчеты позволяют сделать следующие выводы:

1. Передаточная матрица реактора за счет формы распределения нейтронного потока в общем случае является несимметричной, однако в частном случае, когда начальная форма распределения потока имеет вид «плато», можно полагать матрицу реактора симметричной. Это обстоятельство резко упрощает расчет однотипной МОСАР, потому что анализ системы теперь можно проводить только для двух эквивалентных каналов регулирования: для усредненного движения и относительного движения.

2. Передаточная функция реактора по усредненному движению имеет астатизм первого порядка и характеризует изменение средней мощности реактора, а передаточная функция реактора по относительному движению имеет астатизм нулевого порядка и характеризует изменение формы распределения нейтронной плотности по активной зоне.

3. Анализ устойчивости системы показывает, что количество сепаратных каналов в МОСАР зависит от величины постоянной времени датчиков нейтронного потока. Увеличение постоянной времени внутриреакторных датчиков приводит к необходимости резкого сокращения количества ЛАР для сохранения устойчивой работы.

4. Если постоянная времени датчиков ВРК будет больше **10 сек**, то МСАР является неустойчивой по усредненному движению и при количестве каналов $n = 1$, и надо принимать меры по обеспечению устой-

чивой работы системы. Для того, чтобы МОСАР без функционального разделения подсистем была устойчивой, необходимо и достаточно, чтобы была устойчива эквивалентная система, соответствующая усредненному движению.

5. Увеличение расстояния между датчиками ВРК и регулирующими стержнями в каждом канале ЛАР приводит к неуправляемости относительного движения в этом канале.

5.1. Многосвязная однотипная система автоматического регулирования распределения с организацией сепаратных каналов на основе структур, допускающих неограниченное увеличение коэффициента усиления

Проведенный выше анализ показал, что *МОСАР распределения плотности нейтронов с временным разделением* сепаратных каналов при заданной одноконтурной структуре каналов регулирования не удовлетворяет, требованиям эксплуатации ядерного реактора с точки зрения качества процессов регулирования, К тому же, данная структура системы регулирования не может быть признана достаточно надежной, так как устойчивость всей системы в целом обеспечивается лишь одним каналом регулирования, при этом нагрузкой для данного канала является совокупность всех инерционных каналов. Одномерная система в этом смысле является более надежной.

Целесообразно было бы организовать структуру системы таким образом, чтобы отказ одного из каналов регулирования не приводил к нарушению устойчивости и отказу всей системы в целом. Однотипность регулируемых координат ядерного реактора, а также равнозначность требований, предъявляемых к их динамике, делают желательным выбор каналов регулирования (регуляторов) однотипными. В этом случае каждый из n регуляторов будет выполнять двойную функцию:

а) поддержание объекта в критическом состоянии, т. е. регулирование усреднённого движения в объекте;

б) регулирование заданного значения выходной координаты относительно среднего в собственном канале, т. е. регулирования распределения. Это следует из того, что движение любой выходной координаты реактора является суперпозицией двух эквивалентных движений: усредненного и относительного.

Однако, как указывалось выше, организация МОСАР по принципу однотипности сепаратных регуляторов не обеспечивает устойчивости МОСАР при достаточно больших значениях постоянной времени детекторов контроля плотности нейтронов и увеличении количества каналов МОСАР, если структура каждого регулятора представляет собой одно-

контурную цепь, содержащую интегрирующее, инерционное и усиленные звенья.

Поставим задачу синтеза такой структуры регулятора каждого сепаратного канала регулирования МОСАР, при которой обеспечивалось бы устойчивость всей системы при достаточно больших значениях постоянной времени датчиков T_d и и количества каналов регулирования n .

Синтез передаточной функции стабилизирующих звеньев

Полагая, что точки приложения регулирующего и возмущающего воздействий в системе совпадают, структурную схему МОСАР в векторно-матричной форме можно представить, как и раньше, рисунком рис. 5.01а, где обозначены:

$H(p)$ – передаточная матрица объекта регулирования;

$R(p)$ – скалярная диагональная матрица регуляторов;

$D(p)$ – скалярная диагональная матрица детекторов.

Матрица $\overline{H}(p)$ может быть представлена в виде суммы двух матриц – матрицы перекрестных связей $\overline{A}(p)$ и матрица прямых связей $\overline{B}(p)$

$$\overline{H}(p) = \overline{B}(p) + \overline{A}(p) \quad (5-12)$$

где $\overline{B}(p) = \overline{W}_T(p) * \overline{E}$

$$\overline{A}(p) = W(p) * \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1... & 1 \\ 1 & 0 & 1... & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & 1 & 1... & 0 \end{bmatrix}$$

$W_T(p)$ и $W(p)$ – скалярные передаточные функции прямых и перекрестных связей в реакторе, описываемые соответственно выражениями:

$$W(p) = \frac{p + \lambda}{p(lp + \beta)} \quad W_T(p) = \frac{L_{ij} p + \lambda}{p(lp + \beta)}$$

При этом рассматривается случай симметричности матрицы $\overline{H}(p)$, т. е. $L_{ij} = L_{ji} = L$. Уравнение движения выходных координат МОСАР в соответствии со схемой рис. 5.01а имеет следующий вид:

$$\overline{\varphi} = \left[\overline{E} + (\overline{B} + \overline{A}) \overline{DR} \right]^{-1} \left[(\overline{B} + \overline{A}) \overline{\Delta k} + (\overline{B} + \overline{A}) \overline{R} \delta \varphi_0 \right]. \quad (5-13)$$

Применение метода декомпозиции [12] позволяет заменить исследование сложной исходной МОСАР (уравнение (5-13)), исследованием

лишь двух эквивалентных одномерных систем регулирования. Так как декомпозиция осуществляется с помощью неособого преобразования, соответствующего переходу к новым координатам, то вид скалярных матриц не меняется, следовательно, синтез структуры передаточной функции регулятора можно осуществить непосредственно с помощью эквивалентных одномерных систем, получающихся из исходной связанной системы (5-13).

Характеристические числа матрицы перекрестных связей \mathbf{A} равны:

$$\lambda_1 = n - 1; \quad \lambda_2 = \lambda_3 = \dots \lambda_n = -1. \quad (5-14)$$

Следовательно, в соответствии с правилами перехода к эквивалентной системе получаем n одномерных эквивалентных систем, из которых $n-1$ систем идентичны. Уравнения движения эквивалентных систем имеют вид соответственно для $\lambda = n - 1$ и $\lambda = -1$.

$$\delta\Phi_{уср.} = \left(1 + W_{уср.}(p)d(p) \cdot r(p)\right)^{-1} \left(W_{уср.}(p)\Delta K_{уср.} + W_{уср.}(p) \cdot r(p) \cdot \delta\Phi_{0уср.}\right); \quad (5-15)$$

$$\delta\Phi_{отн.} = \left(1 + W_{отн.}(p)d(p) \cdot r(p)\right)^{-1} \left(W_{отн.}(p)\Delta K_{отн.} + W_{отн.}(p) \cdot r(p) \cdot \delta\Phi_{0отн.}\right), \quad (5-16)$$

где:

$W_{уср.}(p)$; $W_{отн.}(p)$ – скалярные передаточные функции, описываемые соответственно выражениями:

$$W_{уср.}(p) = \frac{[1 + (n-1)L]p + n\lambda}{p(lp + \beta)}; \quad W_{отн.}(p) = \frac{1-L}{lp + \beta}.$$

$d(p)$; $r(p)$ – скалярные передаточные функции, соответственно детектора и регулятора, при этом полагаем, что передаточная функция детектора описывается выражением $D(p) = \frac{K_d}{T_d p + 1}$;

$\delta\varphi_i$; ΔK_i – скалярные величины, являющиеся координатами эквивалентной системы. Связь их с координатами исходной МОСАР определяется выражениями:

$$\Delta K_{уср.} = \sum_{i=1}^n \Delta k_i; \quad \delta\Phi_{уср.} = \sum_{i=1}^n \delta\varphi_i$$

$$\Delta K_{отн.} = \Delta k_i - \Delta k_j; \quad \delta\Phi_{отн.} = \delta\varphi_i - \delta\varphi_j.$$

Для обеспечения устойчивости МОСАР при достаточно больших постоянных времени детекторов T_d и неограниченном увеличении количества каналов МОСАР n проведем синтез передаточной функции ре-

гулятора на основе структуры, допускающей неограниченное увеличение коэффициента усиления без нарушения устойчивости. Такие структуры предполагают охват регуляторов одноконтурной структуры исходной САР стабилизирующим устройством. Естественно, что охваченными стабилизирующим устройством в реальных сепаратных каналах МОСАР могут быть только звенья, входящие в передаточную функцию регулятора. Полагая, как и выше, цепь регулятора, состоящей из последовательно соединенных апериодического, интегрирующего и нескольких усилительных звеньев, включим стабилизирующее устройство по схеме рис. 5.02.

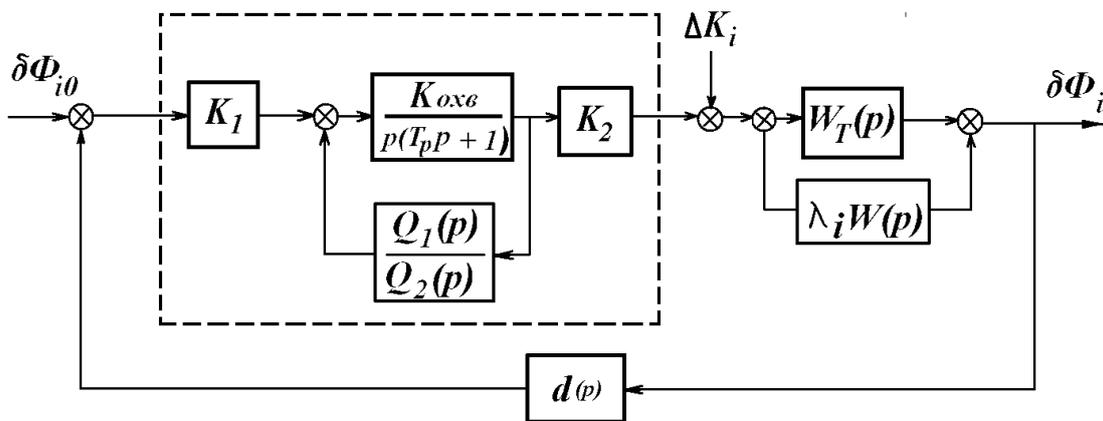


Рис. 5.02. Структура эквивалентного канала МОСАР, допускающая бесконечное увеличение коэффициента усиления

Известно [24], что порядок уравнения, описывающего охваченную часть контура цепи регулирования, не должен превышать более чем на два разность порядков операторов стабилизирующего устройства $Q_1(p)$ и $Q_2(p)$. Как видно на рис. 5.02, порядок уравнения, описывающего охватываемое звено равен 2, следовательно, в качестве стабилизирующего устройства могут быть использованы многие звенья, например, звенья с передаточной функцией $K; Tp; \frac{Tp}{Tp+1}$ и т. д. Однако требование обеспечения устойчивости системы при любом количестве сепаратных каналов, другими словами при $n \rightarrow \infty$ налагает определенные ограничения на передаточную функцию стабилизирующего устройства. Пусть $Q_1(p)$ и $Q_2(p)$ имеют вид:

$$Q_1(p) = a_0 p^{m_1} + a_1 p^{m_1 - 1} + \dots$$

$$Q_2(p) = b_0 p^{m_2} + b_1 p^{m_2 - 1} + \dots$$

Анализ уравнения усредненного движения системы показал, что система будет устойчива при стремлении коэффициента усиления охваченной части регулятора к бесконечности, если порядки уравнений стабилизирующего устройства одинаковы, то есть $m_1 = m_2$.

Таким образом, для того, чтобы эквивалентное усредненное движение было устойчиво при увеличении количестве каналов МОСАР n , необходимо увеличить коэффициент усиления охваченного звена **Кохв**, при этом стабилизирующее звено должно иметь равные порядки полиномов числителя и знаменателя. Очевидно, что относительное движение также будет устойчиво при $K_{охв} \rightarrow \infty$, если $m_1 = m_2$. С точки зрения простоты технической реализации целесообразно применять в системе либо стабилизирующее устройство с передаточной функцией K (жесткая обратная связь), либо $\frac{T_p}{T_p+1}$ (гибкая инерционная обратная связь). Известно, что для достижения лучших динамических свойств системы более приемлемым является гибкая инерционная обратная связь. Таким образом, полагаем: $Q_1(p) = Tp$; $Q_2(p) = Tp + 1$.

Анализ устойчивости МОСАР

Основной признак устойчивости МОСАР формулируется следующим образом для устойчивости МОСАР необходимо и достаточно, чтобы были устойчивыми все n эквивалентные сепаратные системы.

В нашем случае достаточно проанализировать устойчивость лишь усреднённого и относительного движений при изменении коэффициента усиления регулятора, охваченного стабилизирующим устройством **Кохв**, и изменении количества каналов регулирования системы n . Однако в этом случае остается открытым вопрос о малости этих параметров, другими словами, необходимо выяснить, при каких минимальных значениях величин **Кохв** и n справедливы приведённые выше рассуждения. Это тем более важно, так как условия эксплуатации ядерного реактора накладывают определенные ограничения на скорость введения реактивности в активную зону, а, следовательно, и на коэффициент усиления автоматической системы регулирования.

Следовательно, необходимо определить пределы изменения **Кохв** и n , при которых будут справедливы полученные результаты. С этой целью были построены кривые D-разбиения в плоскости параметров **Кохв** и n .

На рис. 5.03 приведены кривые D-разбиения в плоскости параметров $\nu = \frac{1}{K_{охв}}$ и n , построенные при различных значениях постоян-

ной времени датчика T_d и постоянной времени стабилизирующего устройства T .

Анализ построенных кривых показывает, что эквивалентное усреднённое движение устойчиво при $n \rightarrow \infty$, если $K_{охв} \rightarrow \infty$, что подтверждает полученный выше результат. Нетрудно видеть, что вид области устойчивости зависит от соотношения параметров T и T_d . При $T_d > T$ система характеризуется определенным минимальным значением $K_{охв\text{-min}}$ и минимальным значением каналов n_{min} (кривая 3, рис. 5.03а), которые определяют нижнюю границу области устойчивости по данным параметрам. Влияние коэффициента усиления неохваченных звеньев (рис. 5.03б) на область устойчивости аналогично влиянию коэффициента усиления одноконтурной цепи регулирования – при уменьшении α область устойчивости увеличивается. Сравнивая кривые 2 рис. 5.03а и 1 рис. 5.03б, можно видеть, что область устойчивости зависит не только от соотношения параметров T_d и T , но и от их абсолютных значений. Увеличение T_d и T приводит к сдвигу границы D-разбиения в область больших значений $K_{охв}$ при одном и том же значении n .

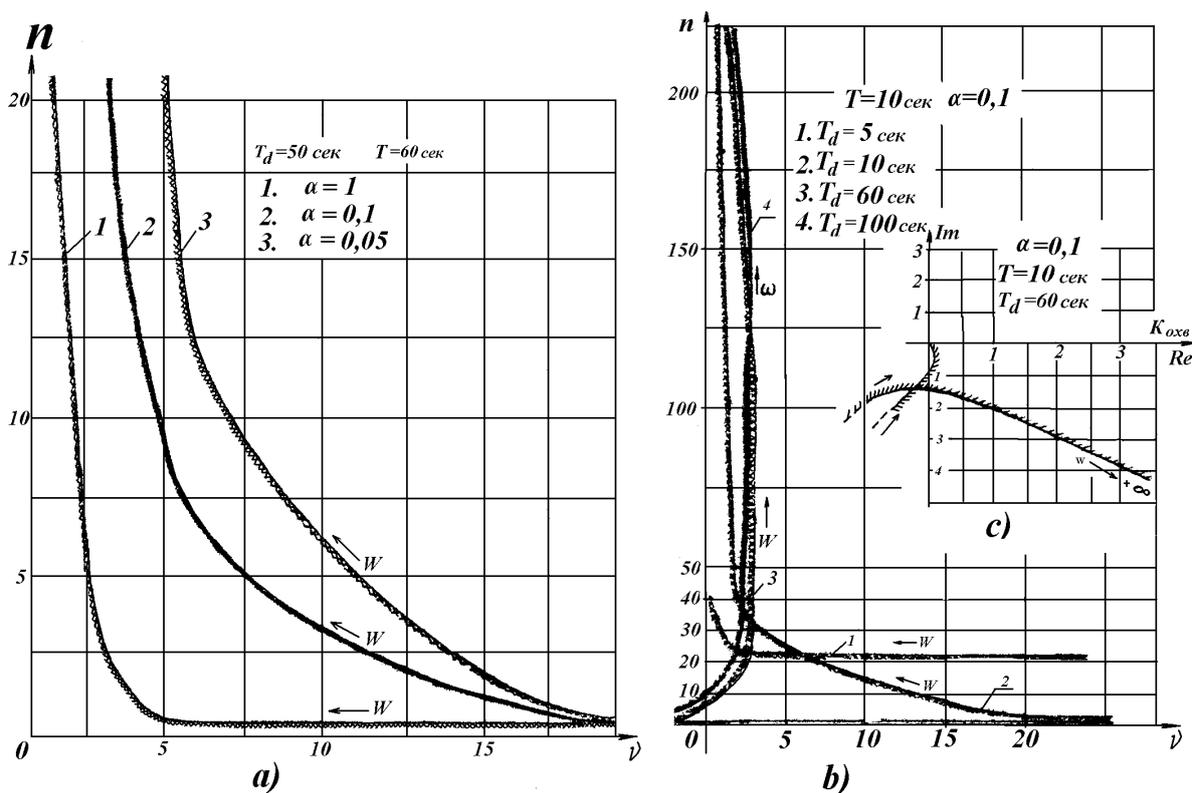


Рис. 5.03. Области устойчивости исследуемой МОСАР

На рис. 5.03с приведена кривая D-разбиения для относительного движения. Кривая на рис. 5.03с характеризует область устойчивости эк-

вивалентного относительного движения в плоскости параметра **Кохв**. Из рисунка видно, что относительное движение устойчиво при любом значении **Кохв**, в том числе и при $K_{охв} \rightarrow \infty$.

Подводя итоги анализа устойчивости можно сделать следующие выводы:

1. Введение стабилизирующего устройства в цепь регулятора позволяет не только увеличить точность регулирования в каждом сепаратном канале за счет увеличения коэффициента усиления, но также делает возможным увеличение количества сепаратных каналов МОСАР с целью увеличения точности регулирования распределения плотности нейтронов, при этом соответствующим подбором параметров стабилизирующего звена устойчивость может быть обеспечена при изменении параметра **Тд** в достаточно широких пределах. Этот факт делает возможным применение для целей регулирования детекторов с достаточно большой постоянной времени запаздывания.

2. Рассмотренная структура МОСАР накладывает ограничения на **Кохв** снизу при увеличении точности регулирования распределения (увеличении числа каналов).

3. При проведении анализа предполагалось, что точки приложения возмущающего и регулирующего воздействия совпадают, однако, это не является существенным ограничением, так как устойчивость усредненного движения в данной системе обеспечивается и в случае несовпадения указанных воздействий, а по относительному движению объект регулирования является устойчивым сам по себе. Несовпадение точек приложения возмущающего и регулирующего воздействий в худшем случае приводит к неуправляемости относительных движений в объекте. МОСАР в этом случае выполняет такую же функцию, как и одномерная САР регулирования уровня плотности нейтронов.

4. Организация структуры системы регулирования распределения по принципу однотипности сепаратных каналов, каждый из которых представляет собой структуру, допускающую неограниченное увеличение коэффициента усиления без нарушения устойчивости, позволит значительно повысить надежность всей системы в целом с точки зрения безопасности эксплуатации реактора. Это объясняется тем фактом, что в данной структуре не происходит разделения функционального назначения отдельных каналов системы, таким образом, основная функция системы, обеспечение устойчивости усредненного движения, выполняется всеми сепаратными каналами, и нарушение работы одного из каналов системы приведет только к неуправляемости относительной составляющей выходной координаты данного канала.

Экспериментальное исследование МОСАР на сеточной модели

С целью анализа качества переходных процессов в МОСАР были проведены экспериментальные исследования данной системы на модели. Модель представляет собой совокупность двухканальной системы регулирования, которая моделировалась с помощью аналоговых блоков и сеточной модели реактора, которая описана выше. Исследовалась, как и в случае МОСАР с временным разделением, реакция системы на локальное возмущающее воздействие $\Delta K = 6 \cdot 10^{-5}$ и на задающее воздействие. На рис. 4.06 приведены осциллограммы переходных процессов в двухканальной МОСАР при различных значениях постоянной времени детекторов и параметров настройки регуляторов. При моделировании использовалась переходная функция стабилизирующего устройства в следующем виде:

$$W_{cm}(p) = \frac{K_{cm} \cdot T_p}{T_p + 1}.$$

Величина K на осциллограммах определяет коэффициент усиления каждого сепаратного канала, приведенного к одноконтурному виду.

Как видно на рис. 4.06а и 4.06б, колебательность переходного процесса зависит от коэффициента усиления стабилизирующего устройства **Кст**. Чем больше величина **Кст**, тем более монотонный переходный процесс, при этом длительность его увеличивается. Увеличение постоянной времени детектора приводит к необходимости увеличения коэффициента усиления в канале с целью сохранения желаемых показателей качества процесса регулирования (рис. 4.06а и 4.06в), при этом увеличение общего коэффициента усиления должно осуществляться за счет увеличения коэффициента усиления звена, охваченного стабилизирующим устройством.

При изменении задающего воздействия переходный процесс характеризуется значительным перерегулированием, например, при $\Delta U_0 = 6\%$ величина перерегулирования достигает $\sim 90\%$, (рис. 4.06д). Это объясняется запаздыванием в цепи главной обратной связи канала регулирования, которые определяется постоянной времени детектора. Очевидно, что при одном и том же коэффициенте усиления канала величина перерегулирования полностью определяется значением параметра **Тд**. Для уменьшения перерегулирования задающее воздействие подавалось на сравнивающее устройство через звено, аналогичное детектору, т. е. через инерционное звено с постоянной времени **ТЗ**. Экспериментально было получено, что наиболее качественный переходный процесс имеет место при **ТЗ=Тд** (рис. 4.06е).

Таким образом, проведенные экспериментальные исследования качества переходных процессов показали, что данная структура МОСАР позволяет получить переходный процесс при достаточно больших значениях $T_d \approx 60$ сек. не хуже, чем переходный процесс в одномерной системе с безинерционным детектором, которая в настоящее время применяется для автоматического регулирования общего уровня плотности нейтронов в ядерном реакторе.

На основании полученных результатов можно сделать следующие выводы:

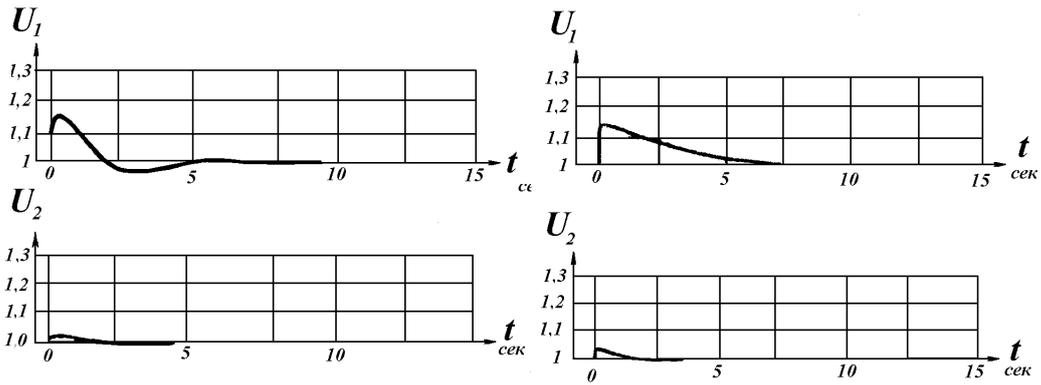
1. Для обеспечения устойчивости МОСАР распределения плотности нейтронов при произвольном количестве каналов регулирования системы необходимо осуществлять синтез регуляторов на основе структур, допускающих неограниченное увеличение коэффициента усиления без нарушения устойчивости. Это следует из того, что при эквивалентировании исходной МОСАР одна из эквивалентных одномерных систем – усредненное движение – имеет в своей структуре звено, коэффициент усиления которого зависит от количества каналов исходной системы. Увеличение точности регулирования формы распределения приводит к необходимости увеличения количества каналов, а, следовательно, к увеличению коэффициента усиления эквивалентного усредненного движения. В этом смысле многосвязная система эквивалентна одномерной системе, в которой увеличение точности регулирования требует увеличения коэффициента усиления.

2. Дополнительное требование обеспечения устойчивости при $n \rightarrow \infty$ накладывает определенные ограничения на вид передаточной функции стабилизирующего устройства. В рассмотренной структуре МОСАР стабилизирующее устройство каждого сепаратного канала должно удовлетворять условию равенства порядков полиномов числителя и знаменателя

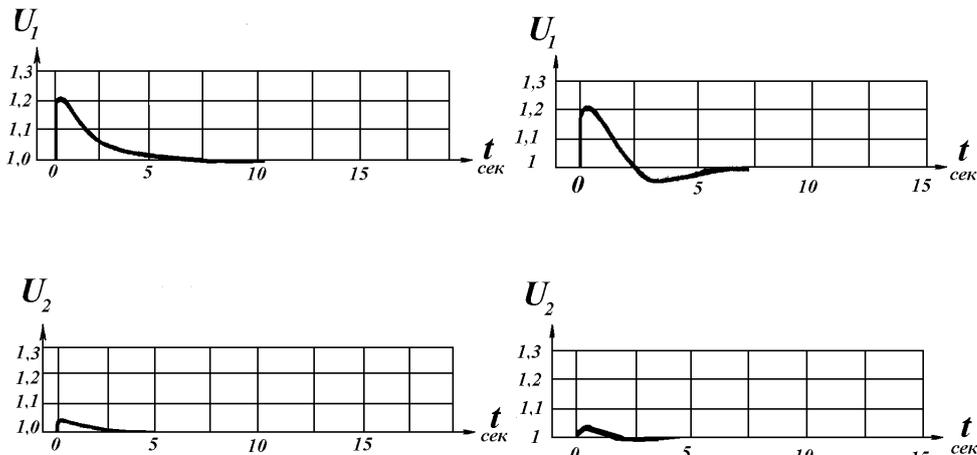
3. Из кривых D-разбиения, построенных в плоскости параметров ν и n для усредненного движения следует, что при $T_d > T$ и определенном значении α , система характеризуется предельным минимальным значением n_{\min} , когда не может быть обеспечена устойчивость при любом значении $K_{охв}$. Относительное движение устойчиво при любом $K_{охв}$.

4. Исследованная МОСАР позволяет получить высококачественный процесс при использовании любых известных детекторов внутриреакторного контроля плотности нейтронов с различными постоянными времени T_d .

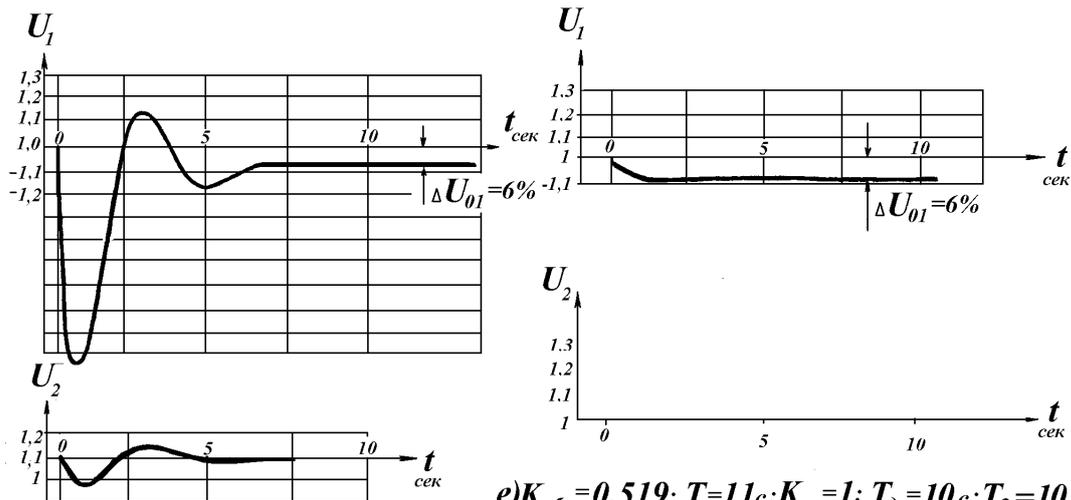
5. Многосвязная однотипная система автоматического регулирования позволит обеспечить по указанным выше причинам более высокую надежность с точки зрения безопасности эксплуатации реактора по сравнению с системами, основанными на функциональном разделении сепаратных каналов.



а) $K_{\text{общ}}=0,519; T=11c; K_{\text{см}}=1; T_{\text{д}}=10c;$ б) $K_{\text{общ}}=0,519; T=11c; K_{\text{см}}=5; T_{\text{д}}=10c;$



в) $K_{\text{общ}}=0,519; T=11c; K_{\text{см}}=2; T_{\text{д}}=20c;$ г) $K_{\text{общ}}=1,35; T=11c; K_{\text{см}}=1; T_{\text{д}}=60c;$



д) $K_{\text{общ}}=0,519; T=11c; K_{\text{см}}=1; T_{\text{д}}=10c; T_3=0c;$ е) $K_{\text{общ}}=0,519; T=11c; K_{\text{см}}=1; T_{\text{д}}=10c; T_3=10c;$

Рис. 5.04. Переходные процессы в каналах исследуемой МОСАР

5.2. Многосвязная система с обратной моделью реактора

Алгоритм работы системы базируется на методе обратных операторов [32], который заключается в том, что на основании известной математической модели объекта получают математическую модель, обратную исходной. Затем по этой обратной модели реализуют управляющую программу на ЭВМ, которая включается в контур регулирования последовательно по отношению к регулируемому объекту. Таким образом МСАР создается как система непосредственного цифрового управления. Если в реакторе вектор входных управляющих воздействий вызывает появление на выходе системы вектора отклонений нейтронных потоков в зонах управления МСАР, то в ЭВМ вектор расогласований нейтронного потока в зонах управления преобразуется в вектор управляющих воздействий по реактивности, то есть решается обратная задача. При хорошей настройке обратной модели процесса можно с ее помощью скомпенсировать взаимную связь каналов ЛАР друг с другом и добиться таким образом практически независимой работы выравнивающих каналов ЛАР.

При синтезе обратной модели реактора используем известные уравнения нейтронного поля в одногрупповом приближении:

$$\begin{cases} \frac{\partial N_0}{\partial t} = \frac{K}{l} N_0 + \frac{K_0 - 1}{l} N_0 + \frac{M^2}{l} \nabla^2 N - \sum_i^n \frac{\partial C_i}{\partial t} \\ \frac{\partial C_i}{\partial t} = \frac{\beta_i}{l} N_0 - \lambda_i C_i \end{cases} \quad (4-36)$$

Если расписать оператор $\nabla^2 N$ через конечные разности, например: $\nabla^2 N = \frac{1}{h} (N_1 + N_2 + N_3 + N_4 - 4N_0)$; где h – шаг дискретизации по пространству, то можно получить систему уравнений:

$$\begin{aligned} N_1(p) &= H_{11}(p)K_1(p) + H_{12}(p)K_2(p) + \dots + H_{1n}(p)K_n(p); \\ N_2(p) &= H_{21}(p)K_1(p) + H_{22}(p)K_2(p) + \dots + H_{2n}(p)K_n(p); \\ &\dots\dots\dots \\ N_n(p) &= H_{n1}(p)K_1(p) + H_{n2}(p)K_2(p) + \dots + H_{nn}(p)K_n(p). \end{aligned} \quad (4-37)$$

которая преобразует n -мерный вектор входного сигнала δK в вектор выходных отклонений δN . В матричном виде эта система имеет вид:

$$\overline{\delta N}(p) = \overline{H}(p) * \overline{\delta K}(p). \quad (4-38)$$

Матричное уравнение для обратной модели реактора имеет вид:

$$\overline{\delta K(p)} = \overline{H^{-1}(p)} * \overline{\delta N(p)}. \quad (4-39)$$

Запишем уравнение системы в матричном виде:

$$\overline{\delta N(p)} = \overline{H(p)} * \overline{W_r(p)} * \overline{H^{-1}(p)} * \overline{K_{yc}} * [\overline{N_0(p)} - \overline{\delta N(p)}]. \quad (4-40)$$

Если регуляторы идентичны, то матрица регуляторов $\overline{W_r(p)}$ является диагональной скалярной матрицей, обладающей свойством перестановочности в произведении, и тогда:

$$\overline{\delta N(p)} = \overline{W_r(p)} * \overline{K_{yc}} * [\overline{\delta N(p)} - \overline{N_0(p)}]. \quad (4-41)$$

Как видно из выражения (4-41), задача многомерного управления сводится к одномерной, движение каждой координаты определяется только собственной уставкой, так как матрицы $\overline{W_r(p)}$ и $\overline{K_{yc}}$ диагональны.

Однако необходимо помнить, что обратная матрица $\overline{H^{-1}(p)}$ может быть реализована точно только с помощью идеальных дифференцирующих звеньев. Применение реальных дифференциаторов нарушает условие $\overline{H(p)} * \overline{H^{-1}(p)} = \overline{E}$, где \overline{E} – единичная матрица и практически к тому же снижается помехозащищенность системы.

Кроме того, для точного построения модели $\overline{H^{-1}(p)}$ шаг дискретизации должен быть достаточно мал, в противном случае точность модели невелика. Все сказанное затрудняет реализацию МСАР с обратной моделью ядерного реактора. Тем не менее имеется положительный опыт ее применения на учебном реакторе МИФИ [2].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Никитин В.С. Аппаратура системы управления и защиты реактора и регулирования мощности энергоблока с РУ В-187 и В-320. – Нововоронеж, 1988.
2. Никитин В.С., Южаков А.Ю. Справочное пособие по физике РУ ВВЭР-1000. – Нововоронеж, 1988.
3. Емельянов И.Я, Гаврилов П.А, Селиверстов Б.Н. Управление и безопасность ядерных энергетических реакторов. – М.: Атомиздат, 1975.
4. Филипчук Е.В., Потапенко П.Т., Постников В.В. Управление нейтронным полем ядерного реактора. – М.: Энергоиздат, 1981.
5. Хитчкок А. Устойчивость ядерных реакторов. – М.: Атомиздат, 1963.
6. Волынский Б.А., Бухман В.Е. Модели для решения краевых задач. – М.: Физматгиз, 1960.
7. Меррей Д. Физика ядерных реакторов. – М.: Атомиздат, 1959.
8. Лавренюк А.Ф., Смиренский О.В., Авторское свидетельство «Аналоговая модель ядерного реактора» № 692403 с приоритетом от 25.04.1977.
9. Винтизенко И.Г., Смиренский О.В., Титов В.Н. Авторское свидетельство «Статический интегратор.» № с приоритетом от.
10. Смиренский О.В. и другие. Авторское свидетельство «Ячейка сеточного процессора для моделирования ядерного реактора» № 1634022 с приоритетом от 26.06.1989.
11. Карплюс У. Моделирующие устройства для решения задач теории поля. – М.: ИИЛ, 1962.
12. Морозовский В.Т. Многосвязные системы автоматического регулирования. – М.: Энергия, 1970.
13. Мезарович М. Многосвязные системы регулирования. Труды 1 Международного конгресса ИФАК. Том 1, АН СССР. 1960.
14. Потапенко П.Т., Синтез системы связанных регуляторов для управления распределением мощности в ядерном реакторе. «Атомная энергия», т. 27, вып. 3, 1969.
15. Белов Е.М., Дурновцев В.Я., Нагорный Г.П. и др. Авторское свидетельство «Способ обнаружения, индикации и измерения наибольшего значения сигнала» № 49127 с приоритетом от 25.04.67.
16. Юркевич Г.П. Системы управления энергетическими реакторами. – М.: Элекс-КМ, 2001.

17. Эйвери Р. Теория связанных реакторов. Труды II Международной конференции по мирному использованию атомной энергии, Женева, том 3. – М.: Атомиздат, 1959.
18. Schweizer G, Lauber R. «Stabilitätsuntersuchung von lose gekoppelten Reactor-systemen.» Atomkernenergie, № 6, 1961.
19. Boldwine G. «Kinetics of a reactor composed of two loosely coupled cores». Nucl. Sci. and Engng., 1959., 6., № 4.
20. Danofsky R., Uhrig R. «The kinetic behaviour of the coupled regions of the UTR-10 reactor», Nucl.Sci. and Engng. 1963, 15, № 1.
21. Plaza H. «Nucl. Sci. and Engng.» 1966, № 26.
22. Гарабедян Х.Л. Кинетика активной зоны реактора. В сб. Теория ядерных реакторов под ред. Биркхофа Г. и Вигнера Э. – М.: Госатомиздат, 1963.
23. Тагаевская А.А. Определение амплитудно-фазовой характеристики линейной системы по кривой ее переходного процесса. Ж. Автоматика и телемеханика т. XIY, № 2, 1953.
24. Мееров М.В. Синтез структур систем автоматического регулирования высокой точности. – М.: Наука, 1967.
25. Джефффри А. Устойчивость взаимосвязанных систем регулирования. «Труды 1 Международного конгресса ИФАК», том 1, АнС-ССР, 1961.
26. Шишлов В.И., Белов Е.М. Сходимость многошаговых процессов регулирования распределения мощности в реакторе. В сб. Вопросы атомной науки и техники. Серия «Динамика ядерных энергетических установок», Выпуск 2. – М.: Атомиздат, 1972.
27. Шишлов В.И., Дурновцев В.Я., Нагорный Г.П., Белов Е.М. Авторское свидетельство «Устройство для поиска экстремума» № 65666 с приоритетом от 09.10.1970.
28. Кипин Д.Р. Физические основы кинетики ядерных реакторов. – М.: Атомиздат, 1967.
29. Ракитский Ю.В., Устинов С.М., Черноруцкий И.Г. Численные методы решения жестких систем. – М.: Наука, 1979.
30. Карначук В. И, Тотьменинов М.Е, Рябов С.П, Волынский Ю.Б. Авторское свидетельство № 132906 с приоритетом от 02.10.1978.
31. Карначук В.И. Алгоритмы управления нейтронным полем большого ядерного реактора. Ж. Известия высших учебных заведений, серия Физика, № 11, 2004.
32. Пухов Г.Е., Жук К.Д. Синтез многосвязных систем управления по методу обратных операторов, Наукова думка. – Киев, 1966.

СОДЕРЖАНИЕ

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ.....	3
ОТ АВТОРА	4
ВВЕДЕНИЕ	9
ГЛАВА 1. СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ МОЩНОСТИ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕАКТОРОВ.....	13
1.1. Система автоматического регулирования мощности реактора ВВЭР-1000	13
1.1.1. Аппаратура контроля нейтронного потока.....	13
1.1.2. Автоматическое регулирование мощности реакторной установки В-320.....	28
1.1.3. Выравнивание распределения потока по высоте активной зоны	58
1.2. Система автоматического управления мощностью реактора РБМК.....	67
ГЛАВА 2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МНОГОМЕРНОГО УПРАВЛЯЕМОГО ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА.....	70
2.1. Однорупповая модель кинетики реактора.....	70
2.2. Конечно-разностные модели кинетики многомерного ядерного реактора	83
2.3. Методы локальной кинетики.....	103
ГЛАВА 3. АНАЛИТИЧЕСКОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ МСАР ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА	129
ГЛАВА 4. МНОГОСВЯЗНЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ МОЩНОСТЬЮ ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА С ФУНКЦИОНАЛЬНЫМ РАЗДЕЛЕНИЕМ КАНАЛОВ.....	143
4.1. Многосвязная система с временны'м разделением каналов регулирования	144
4.2. Многосвязная система итерационного регулирования потоков в зонах управления.....	164
4.3. Алгоритм регулирования по относительным значениям потока в зонах управления	178

ГЛАВА 5. МНОГОСВЯЗНЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ МОЩНОСТЬЮ РЕАКТОРА БЕЗ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО РАЗДЕЛЕНИЯ ПОДСИСТЕМ	198
5.1. Многосвязная однотипная система автоматического регулирования распределения с организацией сепаратных каналов на основе структур, допускающих неограниченное увеличение коэффициента усиления	205
5.2. Многосвязная система с обратной моделью реактора.....	215
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	217
СОДЕРЖАНИЕ	219

Учебное издание

КАРНАЧУК Виктор Иванович

СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО ВЫРАВНИВАНИЯ НЕЙТРОННОГО ПОТОКА В ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРАХ

Учебное пособие

Научный редактор
*доктор физико-математических наук,
профессор И.В. Шаманин*
Компьютерная верстка *К.С. Чечельницкая*
Дизайн обложки *О.Ю. Аршинова*

Подписано к печати 27.12.2009. Формат 60x84/16. Бумага «Снегурочка».
Печать XEROX. Усл. печ. л. 12,85. Уч.-изд. л. 11,62.
Заказ 225-11. Тираж 100 экз.



Национальный исследовательский Томский политехнический университет
Система менеджмента качества
Томского политехнического университета сертифицирована
NATIONAL QUALITY ASSURANCE по стандарту ISO 9001:2008



ИЗДАТЕЛЬСТВО  ТПУ. 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30
Тел./факс: 8(3822)56-35-35, www.tpu.ru