

УДК 621.039.56

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И МОДЕЛЬНОЕ
ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ДИНАМИКИ
ИМПУЛЬСНОГО РЕАКТОРА ПЕРИОДИЧЕСКОГО
ДЕЙСТВИЯ ИБР-2**

Е. А. Бондарченко, Ю. Н. Пепельшев, А. К. Попов

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

ВВЕДЕНИЕ	929
ИМПУЛЬСНЫЙ РЕАКТОР ПЕРИОДИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ НА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНАХ	930
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК РЕАКТОРА ИБР-2	960
МОДЕЛЬ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ДИНАМИКИ РЕАКТОРА ИБР-2 В ГИПОТЕТИЧЕСКОМ ВАРИАНТЕ БУСТЕРНОГО РЕЖИМА	972
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	980
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	981

УДК 621.039.56

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И МОДЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ДИНАМИКИ ИМПУЛЬСНОГО РЕАКТОРА ПЕРИОДИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ ИБР-2

Е. А. Бондарченко, Ю. Н. Пепельшев, А. К. Попов

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Приведены результаты исследования динамики импульсного реактора периодического действия ИБР-2, полученные для обоснования надежной и безопасной работы реактора в период его эксплуатации. Представлена модель реактора ИБР-2 для моделирования переходных процессов. Модель построена на основе модульной структуры с использованием дискретных передаточных функций блоков кинетики, мощностной обратной связи и автоматического регулятора с учетом нелинейных зависимостей. Получено хорошее согласие расчетных и экспериментальных переходных процессов мощности при изменении реактивности. В качестве примера использования модели приведены результаты исследования влияния параметров автоматического регулятора на переходные процессы и даны рекомендации по их оптимальной комбинации. Приведены также результаты использования модельных представлений для оценки устойчивости реактора ИБР-2. Дана оценка параметров и температурной динамики сборки, представляющей собой гипотетическое объединение действующих установок: мощного ускорителя протонов и активной зоны реактора ИБР-2 при ее подкритическом состоянии. Приведены некоторые результаты экспериментов по исследованию шумов энергии импульсов реактора ИБР-2 как одного из разделов динамики. Представлены диапазоны частот, характеризующиеся повышенными колебаниями мощности, и указаны возможные причины колебаний. Приведены данные по модулированным колебаниям мощности, вызванным периодическими колебаниями внешней реактивности, на основании которых дана оценка степени устойчивости реактора и принята структура модели мощностной обратной связи.

The results of the investigation of the dynamics of the pulsed reactor of periodic operation IBR-2 obtained with the aim of substantiation of reliable and safe operation of the reactor in the course of exploitation are discussed. An IBR-2 model for the modeling of transitional processes is presented. The model is constructed on the basis of a module structure using discrete transfer functions of the kinetics blocks, power feedback and automatic regulator with accounting for nonlinear dependence functions. Good agreement between the calculated and experimental power transitional processes at reactivity changes is obtained. As an illustration of the application of the model the data from the investigation of the influence of the automatic regulator parameters on the transitional processes are presented and recommendations on their optimal combination are given. In addition, the results of the use of the model representations to assess the IBR-2 reactor stability are reported. The parameters and temperature dynamics of an assembly representing a hypothetical combination of two presently operating facilities: a powerful proton accelerator and the IBR-2 active zone in a subcritical state, are estimated. Some results of experiments to investigate IBR-2 pulse energy noises as a part of dynamics are presented. The frequency ranges for which increased power oscillations are characteristic are pointed out indicating probable causes of the oscillations. The data on the modulated

power oscillations due to periodic oscillations of external reactivity that lie in the basis of estimates of the reactor stability are given and the structure of the power feedback model is accepted.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в мире существуют около 50 высокопоточных источников нейтронов, предназначенных для широкого круга исследований с помощью нейтронов в различных областях науки, техники, медицины и экологии. Особую группу среди современных источников занимают импульсные источники нейтронов (ИИН). Наряду с уникальными действующими установками на базе импульсных реакторов (ИБР-2), протонных ускорителей с неразмножающимися мишенями (IPNS, LANSE и др.), подкритических систем с электронными ускорителями (например, ИБР-30), существует ряд проектов в Японии, Европе, Корее, Китае, России по разработке и созданию ИИН, ориентированных на получение интенсивных импульсных потоков нейтронов для научных целей и для «трансмутации» долгоживущих продуктов деления. Кроме того, рассматривается вопрос об экологически безопасной утилизации на базе ИИН оружейного и наработанного на АЭС «технического» плутония. В связи с этим в последнее время резко усилился интерес к проблеме безопасности действующих и вновь создаваемых ядерных установок. Обеспечение безопасности ИИН, как и любой другой ядерной установки, включает в себя множество задач научно-технического, организационного и социального плана, направленных на исключение возможности развития неконтролируемой цепной реакции и выброса радиоактивности. Одной из главных проблем безопасности ИИН является полный контроль за коэффициентом размножения нейтронов и удержание его значения на нужном уровне в эксплуатационных и в любых нештатных ситуациях.

Безопасность такой уникальной установки, как импульсный реактор периодического действия ИБР-2, пущенный в эксплуатацию в 1984 г. в ЛНФ ОИЯИ (Дубна), обеспечивается многими средствами, в том числе и проведением периодических измерений динамических и шумовых характеристик реактора. Это позволяет диагностировать многие эффекты, происходящие внутри и в ближайшем окружении активной зоны. Поведение реактора в различных нештатных (или аварийных) ситуациях, которые нельзя проверить прямым путем экспериментально, может быть предсказано на основе модельных экспериментов. В этом случае модель динамики, надежность которой проверена экспериментальным путем, позволяет моделировать переходные процессы мощности при различных изменениях параметров реактора или возмущениях внешней реактивности.

В обзоре приведены основные результаты экспериментальных и модельных исследований динамики реактора ИБР-2, полученные в процессе эксплу-

атации реактора, которые, по мнению авторов этих работ, показывают, что проблеме безопасности ИБР-2 в ОИЯИ уделяется большое внимание.

1. ИМПУЛЬСНЫЙ РЕАКТОР ПЕРИОДИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ НА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНАХ

Импульсный реактор ИБР-2 является уникальным ИИН и по принципу работы, и по конструкции [1], что требует повышенного внимания к его динамике. Эксплуатация импульсного реактора имеет специфическую особенность, при которой знание переходных процессов является крайне важным для безопасной и надежной работы реактора. Например, реактор оснащен системой аварийной защиты (АЗ), в том числе и по отклонению пиковой мощности на +100 и –50 % и средней мощности на ± 20 % от заданных значений. Вследствие высокой чувствительности импульсного реактора к флуктуациям реактивности случайные изменения пиковой мощности достаточно велики и достигают ± 40 % от среднего уровня (для сравнения: в стационарном реакторе с урановым топливом флуктуации мощности в 20 раз меньше). Это означает, что запас возмущений мощности до срабатывания АЗ мал. Кроме того, динамические параметры реактора в процессе его эксплуатации изменяются. Соответственно необходимы дополнительные модельные исследования для обоснования безопасной работы реактора.

В период с 1964 по 2001 гг. в ОИЯИ успешно работали ИИН малой и средней мощности, представлявшие собой бустеры: объединение импульсных реакторов на быстрых нейтронах ИБР и ИБР-30, находившихся в подкритическом состоянии, и ускорителей электронов [2, 3]. В процессе проектирования реактора ИБР-2 планировалась его работа и в режиме бустера с мощным электронным ускорителем [4].

Краткое описание конструкции реактора ИБР-2. Импульсный исследовательский реактор периодического действия на быстрых нейтронах ИБР-2 представляет собой уникальный импульсный источник нейтронов большой мощности [1, 4, 5]. С апреля 1984 г. реактор начал работать на штатной частоте импульсов 5 Гц при номинальной средней мощности 2 МВт [6, 7]. С этого времени началось активное использование ИБР-2 в качестве мощного источника нейтронов для физических исследований [8].

В отличие от обычных (стационарных) реакторов, в которых поддерживается постоянный поток нейтронов, реактор ИБР-2 генерирует периодические нейтронные импульсы, длительность которых на половине высоты на три порядка меньше интервала между импульсами. В табл. 1 приведены основные характеристики реактора ИБР-2, соответствующие номинальному уровню средней мощности.

Таблица 1. Основные характеристики реактора ИБР-2

Средняя тепловая мощность, МВт	2
Пиковая мощность в импульсе, МВт	1500
Мощность, выделяемая между импульсами (мощность фона), МВт	0,15
Частота импульсов, Гц	5
Ширина импульсов быстрых нейтронов на половине высоты, мкс	215
Тепловыделяющие элементы	PuO ₂
Объем активной зоны, л	22
Теплоноситель	Жидкий натрий
Интенсивность потока тепловых нейтронов с поверхности гребенчатого водяного замедлителя, см ⁻² · с ⁻¹	
средняя во времени	10 ¹³
максимальная в импульсе	10 ¹⁶

Активная зона реактора имеет форму неправильной шестигранной призмы, расположенной вертикально. Мимо одной из граней проходят два вращающихся подвижных отражателя, представляющих собой модулятор реактивности. К пяти остальным граням примыкают стационарные отражатели, используемые для аварийной защиты и регулирования реактора. Схема реактора ИБР-2 показана на рис. 1.

Компенсирующие стержни КР-1 и КР-2 предназначены для компенсации выгорания плутония Pu-239 и отрицательного эффекта температурной реактивности, обуславливающего понижение реактивности реактора при его разогреве. Стержень автоматического регулятора (АР) предназначен для поддержания мощности реактора на заданном уровне. В качестве приводного двигателя АР используется шаговый электродвигатель с малой инерционностью. Чтобы в процессе стабилизации мощности АР всегда работал в своей средней зоне, предусмотрен промежуточный регулятор (ПР), которым вручную обеспечивается необходимая компенсация медленных изменений реактивности. Безопасность реактора обеспечивается аварийной защитой (АЗ), включающей в себя два вольфрамовых блока медленной аварийной защиты

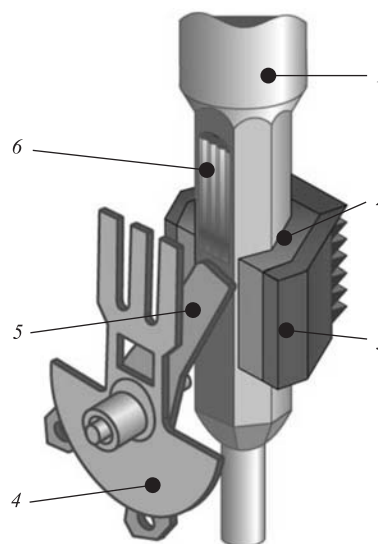


Рис. 1. Схема реактора ИБР-2: 1 — корпус реактора; 2 — стационарный отражатель; 3 — замедлитель; 4 — дополнительный подвижный отражатель; 5 — основной подвижный отражатель; 6 — активная зона

Таблица 2. Некоторые характеристики перемещающихся отражателей

Модулятор реактивности (до 2004 г.)			
Отражатель	Частота вращения, Гц	Эффективность, %	Материал
Основной подвижный отражатель	25	2,5	Специальная сталь
Дополнительный подвижный отражатель	5	0,65	Специальная сталь
Органы управления			
Название		Эффективность, %	Материал
Компенсирующий отражатель КО-1		1,58	Вольфрам
Компенсирующий отражатель КО-2		1,76	Вольфрам
Промежуточный (ручной) регулятор (ПР)		0,25	Вольфрам
Автоматический регулятор (АР)		0,03	Бериллий

(МАЗ) общей эффективностью 1,99 % от эффективного коэффициента размножения $k_{эф}$ и два вольфрамовых блока быстрой аварийной защиты (БАЗ) общей эффективностью 0,16 %. Аварийное перемещение блоков БАЗ осуществляется за 0,02 с, т. е. за время между импульсами мощности. Некоторые характеристики подвижных отражателей и органов управления приведены в табл. 2.

Активная зона реактора представляет собой набор кассет, вставленных в опорную решетку с шагом 27 мм и размещенных в двухстенном стальном корпусе (рис. 2). Каждая кассета состоит из 7 тепловыделяющих элементов (ТВЭЛ), каждый ТВЭЛ представляет собой вертикальный набор таблеток из двуокиси плутония. Таблетки заключены в стальную цилиндрическую оболочку с наружным диаметром 8,6 мм и толщиной стенки 0,45 мм. Высота активной части ТВЭЛа 445 мм.

Система охлаждения реактора выполнена в виде трех контуров охлаждения, каждый из которых состоит из двух петель по соображениям безопасности. Теплоносителем в первом и втором контурах является жидкий натрий, в третьем — воздух. Номинальный расход натрия при средней мощности реактора 2 МВт составляет 90 м³/ч. В биологической защите, окружающей реактор, имеется 14 горизонтальных и 3 наклонных канала для пролета нейтронов от реактора к экспериментальному оборудованию.

Импульсный реактор ИБР-2 занимает промежуточное положение между реакторами непрерывного действия (стационарными) и реакторами, генериру-

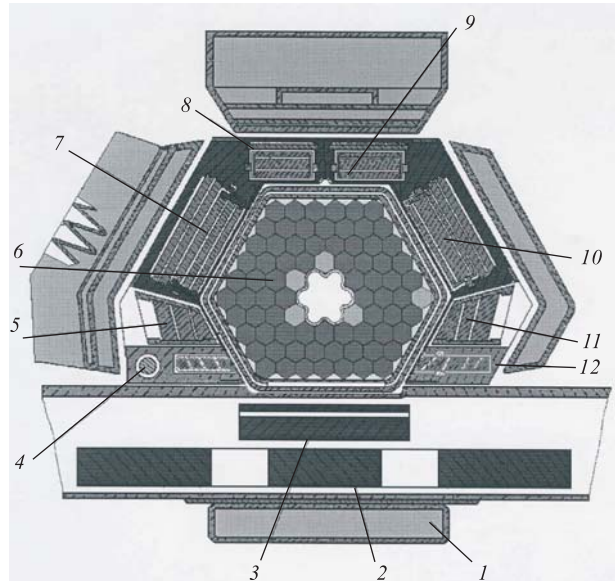


Рис. 2. Вид реактора ИБР-2 в горизонтальном разрезе: 1 — замедлитель модулятора реактивности (гребенчатый водяной замедлитель); 2 — дополнительный подвижный отражатель (ДПО); 3 — основной подвижный отражатель (ОПО); 4 — стержень автоматического регулятора АР; 5 — блок быстрой аварийной защиты БАЗ-2; 6 — активная зона; 7 — блок компенсирующего отражателя КО-2; 8 — блок медленной аварийной защиты МАЗ-2; 9 — блок медленной аварийной защиты МАЗ-1; 10 — блок компенсирующего отражателя КО-1; 11 — блок быстрой аварийной защиты БАЗ-1; 12 — блок промежуточного регулятора ПР

ющими одиночные (не периодические) импульсы. Он характеризуется достаточно высоким потоком нейтронов в импульсе, а также усредненным потоком за период следования импульсов. Реактор ИБР-2 уступает по средней мощности стационарным реакторам. Однако для многих физических экспериментов решающее значение имеет не большая мощность, генерируемая непрерывно, а мощность в течение малого промежутка времени, необходимого для эксперимента. В частности, реактор ИБР-2 представляет широкие возможности для экспериментов по физике конденсированных сред с использованием метода исследований по времени пролета нейтронов.

Принцип формирования пульсирующей реактивности. Основной (ОПО) и дополнительный (ДПО) подвижные отражатели расположены соосно и кинематически связаны между собой. ОПО вращается со скоростью ~ 1500 об/мин, а ДПО — со скоростью в пять раз меньшей (~ 300 об/мин).

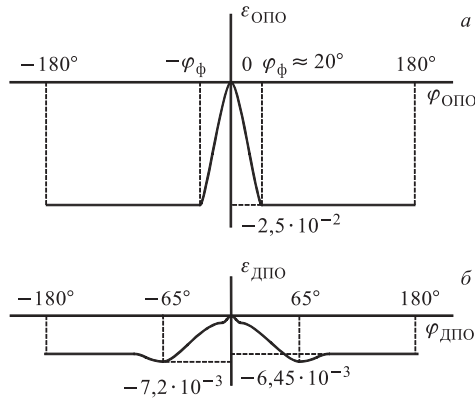


Рис. 3. Реактивность основного $\epsilon_{\text{ОПО}}$ (а) и дополнительного $\epsilon_{\text{ДПО}}$ (б) подвижных отражателей как функция угла их смещения относительно физического центра активной зоны

На рис. 3 показано изменение реактивности, вносимое подвижными отражателями в зависимости от угла их смещения относительно физического центра активной зоны.

При вращении подвижные отражатели создают в реакторе ИБР-2 периодические импульсы реактивности (рис. 4). Каждый пятый импульс реактивности имеет наибольшую амплитуду. Он создается при прохождении мимо активной зоны одновременно ОПО и ДПО.

Органы управления реактором вводятся в такое положение, что реактивность реактора, обусловленная каждым пятым импульсом модулятора реактивности, периодически (с периодом $T_u = 0,2$ с) на короткое время (~ 400 мкс) становится положительной на мгновенных нейтронах.

Вследствие этого реактор генерирует мощные нейтронные импульсы (импульсы мощности) с частотой 5 Гц (рис. 4). В моменты времени, когда мимо активной зоны проходит лишь ОПО, реактивность создаваемых им импульсов остается отрицательной. Это приводит к образованию побочных

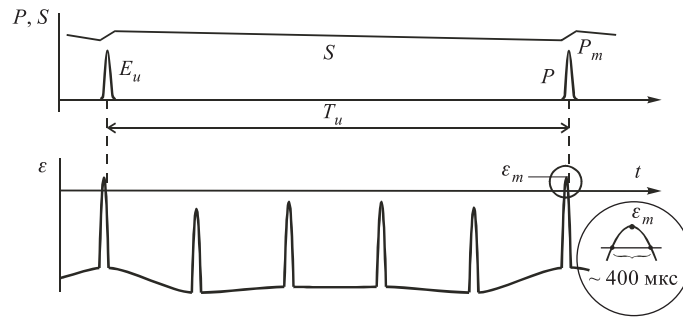


Рис. 4. Реактивность ϵ , мощность P и интенсивность источников запаздывающих нейтронов S реактора ИБР-2 как функции времени t в режиме работы с частотой импульсов мощности 5 Гц. T_u — период импульсов мощности; ϵ_m — надкритичность на мгновенных нейтронах (в равновесном режиме $\epsilon_m \approx 1 \cdot 10^{-3}$); t — время; E_u — энергия импульса мощности

нейтронных импульсов с незначительной амплитудой (на три порядка меньшей, чем амплитуда импульса мощности). В интервалах между импульсами, т. е. когда напротив активной зоны нет ни ОПО, ни ДПО, мощность реактора (мощность фона) меньше амплитуды импульса мощности примерно на четыре порядка (рис. 5). В результате такого принципа формирования пульсирующей реактивности почти вся энергия, выделяемая в реакторе, выделяется в течение импульсов мощности (93 %), на долю же пауз приходится лишь 7 % всей энергии.

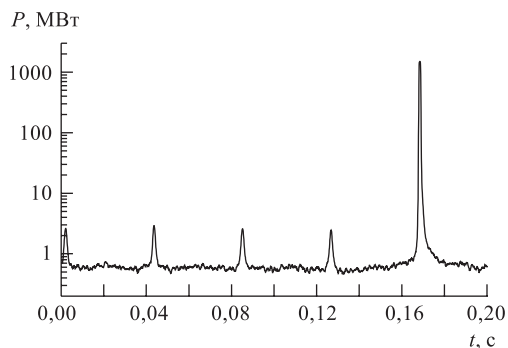


Рис. 5. Усредненная форма измеренного фона между импульсами мощности реактора ИБР-2 при средней мощности реактора 2 МВт

Предшественники и нереализованные конкуренты реактора ИБР-2.

При создании уникального мощного импульсного реактора ИБР-2 был использован богатый опыт эксплуатации стационарного реактора на быстрых нейтронах БР-5 (Обнинск) и импульсных реакторов периодического действия небольшой мощности ИБР и ИБР-30.

Теория импульсных реакторов периодического действия была впервые разработана в Физико-энергетическом институте (Обнинск) [9].

Первый импульсный реактор периодического действия ИБР был пущен в эксплуатацию в Дубне в 1960 г. при средней мощности 1 кВт [10]. В дальнейшем его средняя мощность была доведена до 6 кВт. После реконструкции реактора ИБР (1969 г.) его средняя мощность достигала 25 кВт. Реконструированный реактор получил название ИБР-30. Пульсация реактивности в реакторах ИБР и ИБР-30 достигалась с помощью подвижной части активной зоны.

После появления реактора ИБР в ряде стран (США, Индия, Япония, страны, объединенные в Евроатом) начиная с 1960-х гг. были предприняты попытки создания мощных импульсных реакторов. Наиболее продвинутым оказался проект Евроатома — реактор SORA (Испра, Италия), первое упоминание о котором появилось в 1964 г. [11], а развернутая публикация — в 1965 г. В 1975 г. в Японии реактор на быстрых нейтронах YAYOI после реконструкции стал работать в периодическом импульсном режиме [13], но на малой средней мощности (2 кВт).

В настоящее время реактор ИБР-2 в Дубне является единственным в мире мощным импульсным реактором периодического действия на быстрых нейтронах. Обширные сведения по импульсным реакторам как непериодиче-

ского, так, в основном, и периодического действия, включая проектные материалы, относящиеся к реактору ИБР-2, представлены в книге Е. П. Шабалина [14].

Потребность в создании модели реактора ИБР-2 для исследования переходных процессов и концепция ее построения. Инициатор создания импульсных реакторов периодического действия Д. И. Блохинцев образно охарактеризовал принцип их работы (периодические кратковременные выходы в надкритическое состояние на мгновенных нейтронах) выражением «дразнить тигра в клетке», показывая этим, что и «клетка» должна быть надежной, и действовать надо очень аккуратно. Создание динамической модели любого реактора крайне важно с точки зрения оценки его безопасности. Создание же модели реактора, у которого нет аналога, важно вдвойне. С помощью модели можно оценить переходные процессы при различных возмущениях, в том числе при нештатных возмущениях, изменение параметров реактора путем сравнения зарегистрированных переходных процессов с процессами, полученными на модели, и тем самым определить возможные изменения запаса устойчивости реактора.

При создании модели к ней предъявлялись следующие требования.

1. Модель динамики реактора должна быть основана на максимально возможном использовании экспериментальных данных по параметрам обратных связей в различных режимах работы реактора. Это связано с тем, что при теоретическом описании сложных процессов, происходящих в активной зоне, таких, например, как искривление топливных кассет при изменении мощности, нельзя получить точного однозначного решения.

2. Модель должна учитывать влияние на мощность как быстрых процессов, происходящих в активной зоне, так и медленных, связанных с влиянием контура системы охлаждения активной зоны.

3. Модель должна представлять собой такую систему автоматического регулирования мощности реактора, в которой предусмотрена возможность исследования влияния различных возмущающих воздействий и изменений параметров системы. Структура модели должна быть блочной для возможности внесения любых изменений и дополнений простым путем, не затрагивающим саму структуру.

4. Поскольку длительность импульсов мощности (215 мкс на половине высоты импульса) на три порядка меньше периода их следования (0,2 с) и еще меньше постоянных времени источников запаздывающих нейтронов и постоянных времени, характеризующих мощностную обратную связь, то допустимо представлять импульсы мощности пропорциональными дельта-функциям.

Ниже приведены уравнения, характеризующие динамику реактора, блок-схемы модели и некоторые примеры моделирования переходных процессов.

Исходные уравнения кинетики. В качестве исходных уравнений (1) приняты известные уравнения кинетики одноточечной модели реактора [15],

которые широко используются при рассмотрении динамики стационарных реакторов [16, 17] и применимы к импульсным реакторам на быстрых нейтронах [18]. Во время физического пуска реактора ИБР-2 справедливость одноточечной модели для него была подтверждена экспериментально при измерении среднего времени жизни мгновенных нейтронов методом Росси- α .

$$\begin{aligned}\frac{dn}{dt} &= \frac{k_{\text{эф}}(1 - \beta) - 1}{\bar{\tau}}n + \sum_i \lambda_i C_i, \\ \frac{dC_i}{dt} &= \frac{k_{\text{эф}}\beta_i}{\bar{\tau}}n - \lambda_i C_i, \quad i = 1, \dots, 6.\end{aligned}\tag{1}$$

После введения понятия реактивности уравнения (1) приведены к виду

$$\begin{aligned}\frac{dn}{dt} &= \frac{\delta k - \beta}{\tau}n + \sum_i \lambda_i C_i, \\ \frac{dC_i}{dt} &= \frac{\beta_i}{\tau}n - \lambda_i C_i, \quad i = 1, \dots, 6.\end{aligned}\tag{1a}$$

В этих уравнениях использованы следующие обозначения: n — плотность нейтронов в реакторе; $\bar{\tau}$ — среднее время жизни мгновенных нейтронов; $k_{\text{эф}}$ — эффективный коэффициент размножения нейтронов; β_i , $\beta = \sum_i \beta_i$ — соответственно доля запаздывающих нейтронов группы i и суммарная; C_i , λ_i — соответственно концентрация и постоянная распада источников запаздывающих нейтронов группы i ; $\delta k = (k_{\text{эф}} - 1)/k_{\text{эф}}$ — реактивность; $\tau = \bar{\tau}/k_{\text{эф}}$ — эффективное время жизни мгновенных нейтронов; t — время.

Путем замены переменных сделан переход от уравнений (1a) к уравнениям, в которых переменные P и S выражены в единицах мощности:

$$T_0 \frac{dP}{dt} = \frac{\varepsilon}{\beta}P + S,\tag{2}$$

$$S = \sum_i S_i,\tag{3}$$

$$T_i \frac{dS_i}{dt} + S_i = \mu_i P,\tag{4}$$

где $P = k_n n$ — мощность реактора (k_n — коэффициент пропорциональности между мощностью и плотностью нейтронов); $T_0 = \tau/\beta$, $T_i = 1/\lambda_i$ — соответственно постоянные времени мгновенных нейтронов и запаздывающих нейтронов группы i ; $\varepsilon = \delta k - \beta$ — реактивность на мгновенных нейтронах; $S_i = k_n \tau \lambda_i C_i / \beta$, $S = \sum_i S_i$ — соответственно нормированная интенсивность

источников запаздывающих нейтронов группы i и суммарная; $\mu_i = \beta_i/\beta$ — относительная доля запаздывающих нейтронов группы i .

Полная энергия. Энергия E , выделяемая в реакторе за период импульсов мощности (полная энергия), представлена в виде суммы энергии E_u , выделяемой в импульсе мощности, и энергии фона E_ϕ , выделяемой в интервале между импульсами мощности:

$$E = E_u + E_\phi. \quad (5)$$

В качестве базового режима работы реактора принят режим со стабильными импульсами мощности (равновесное состояние). Соответствующие этому режиму базовые значения переменных далее помечены верхним индексом 0 (E^0 , S^0 и т. д.).

Уравнения кинетики для интервалов времени между импульсами мощности. В уравнении (2) для интервалов между импульсами мощности можно считать $dP/dt \approx 0$. Такое обоснованное допущение приводит к следующему выражению для мощности фона:

$$P_\phi = \frac{\beta}{-\varepsilon_\phi} S, \quad (6)$$

где ε_ϕ — реактивность фона.

Энергия фона E_ϕ составляет примерно 7% от полной энергии E . Поэтому для упрощения анализа и без существенной потери точности приняты два допущения: во-первых, энергия фона выделяется не непрерывно, а также в виде импульсов, совмещенных с импульсами мощности; во-вторых, из-за глубокой подкритичности реактора в интервалах между импульсами мощности пульсация реактивности фона не учитывается, поскольку обусловленные этой пульсацией побочные импульсы имеют амплитуду на три порядка меньшую, чем амплитуда импульса мощности.

Реактивность фона описана уравнением

$$\varepsilon_\phi = \varepsilon_m - \Delta K_{\text{МР}}, \quad (7)$$

где ε_m — наибольшее значение реактивности, соответствующее импульсу мощности; $\Delta K_{\text{МР}}$ — эффективность модулятора реактивности, представляющая собой сумму эффективностей ОПО и ДПО ($\Delta K_{\text{МР}} = \Delta K_{\text{ОПО}} + \Delta K_{\text{ДПО}} = 3,145 \cdot 10^{-2}$).

В результате энергия фона

$$E_\phi = P_\phi T_u = \frac{\beta T_u}{\Delta K_{\text{МР}} - \varepsilon_m} S, \quad (8)$$

где T_u — период импульсов мощности.

Энергия импульса мощности. На основании проведенных экспериментов реактивность основного подвижного отражателя в районе максимума реактивности описана параболой в диапазоне углов поворота ОПО от -4° до 4° относительно физического центра активной зоны. Предшествующий рост реактивности описан сопряженной параболой. Аналогично описан и последующий спад реактивности. Энергия импульса мощности за интервал времени, соответствующий смещению ОПО от $-\varphi_\Phi$ до φ_Φ (рис. 3), представлена выражением [14]

$$E_u = MS, \quad (9)$$

где S — интенсивность источников запаздывающих нейтронов в момент времени, соответствующий началу развития импульса реактивности (т. е. углу смещения $-\varphi_\Phi$ на рис. 3); M — импульсный коэффициент передачи, представляющий собой нелинейную функцию от максимальной реактивности в импульсе ε_m .

Импульсный коэффициент передачи M вычислен из уравнений (2)–(4) [19]. При его вычислении учтено изменение интенсивности источников запаздывающих нейтронов в течение импульса реактивности. Зависимость M от ε_m показана на рис. 6.

На рис. 6 помечены базовые значения M^0 и ε_m^0 , соответствующие равновесному состоянию реактора. При скорости ОПО 1444 об/мин, т. е. при $T_u = 0,208$ с, $M^0 = 0,202$, $\varepsilon_m^0 = 1,03 \cdot 10^{-3}$. При расчетах использованы следующие значения параметров: $\mu_i = 0,038; 0,28; 0,216; 0,328; 0,103; 0,035$, $\lambda_i = 0,0129; 0,0311; 0,134; 0,331; 1,26; 3,21$ с $^{-1}$ [15], $\tau = 6 \cdot 10^{-8}$ с, $\beta = 2,16 \cdot 10^{-3}$.

В модели реактора используется вычисленная зависимость $\ln M = f(\varepsilon_m)$. Она задана таблично, промежуточные значения с достаточной точностью определяются путем линейной интерполяции.

Уравнения кинетики реактора ИБР-2. С учетом уравнений (5), (6), (8), (9) из уравнений кинетики (2)–(4) получены следующие уравнения кинетики в относительных единицах для дискретных моментов времени. Значения переменных и параметров, помеченные индексами n и $n - 1$, относятся соответственно к n -му и $(n - 1)$ -му импульсам мощности:

$$\frac{E_{un}}{E_u^0} = \frac{S_n}{S^0} \frac{M}{M^0} = \frac{S_n}{S^0} \exp(\ln M - \ln M^0), \quad (10)$$

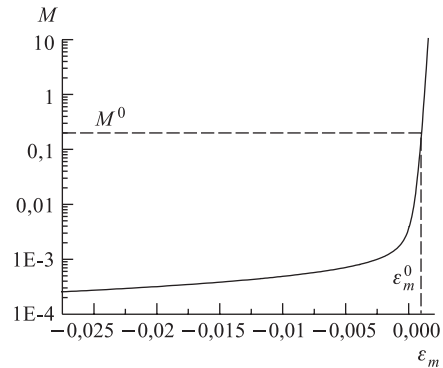


Рис. 6. Зависимость импульсного коэффициента передачи M реактора ИБР-2 от ε_m

$$\frac{E_{\Phi n}}{E^0} = k_{\Phi n} \frac{S_n}{S^0}, \quad (11)$$

$$k_{\Phi n} = \frac{\beta T_u}{\Delta K_{MP} - \varepsilon_{mn}} \frac{S^0}{E^0}, \quad (12)$$

$$\frac{S_n}{S^0} = \sum_i \frac{S_{in}}{S^0}, \quad (13)$$

$$\frac{S_{in}}{S^0} = \left(\frac{S_{in-1}}{S^0} + \mu_i \lambda_i \frac{E^0}{S^0} \frac{E_{n-1}}{E^0} \right) \exp(-\lambda_i T_u). \quad (14)$$

При этом базовому режиму соответствуют следующие соотношения:

$$\frac{S^0}{E^0} = \sum_i \mu_i \lambda_i \frac{\exp(-\lambda_i T_u)}{1 - \exp(-\lambda_i T_u)}, \quad (15)$$

$$E^0 = \bar{P}^0 T_u, \quad (16)$$

где \bar{P}^0 — базовое значение средней мощности реактора. Соотношение (15) следует из уравнений (13) и (14).

При моделировании удобно использовать отклонения переменных от их базовых значений:

$$\Delta E_u = E_u - E_u^0, \quad \Delta E = E - E^0, \quad \Delta S_i = S_i - S_i^0, \quad \Delta S = S - S^0 \quad (17)$$

и относительные отклонения переменных

$$\Delta e_u = \Delta E_u / E_u^0 = (E_u / E_u^0) - 1, \quad \Delta e = \Delta E / E^0 = (E / E^0) - 1, \quad (18)$$

$$\Delta s_i = \Delta S_i / S^0, \quad \Delta s = \sum_i \Delta s_i = \Delta S / S^0 = (S / S^0) - 1.$$

В связи с этим вместо уравнений (13) и (14) в модели использованы соответствующие им уравнения:

$$\Delta s_n = \sum_i \Delta s_{in}, \quad (19)$$

$$\Delta s_{in} = \left(\Delta s_{in-1} + \mu_i \lambda_i \frac{E^0}{S^0} \Delta e_{n-1} \right) \exp(-\lambda_i T_u). \quad (20)$$

Импульсная доля запаздывающих нейтронов. Для режимов работы реактора, при которых энергия импульса мощности изменяется не более чем в 3–4 раза относительно базового значения, допустима экспоненциальная аппроксимация импульсного коэффициента передачи M [19]. В этом случае ошибка аппроксимации, например в 5%, достигается, если M изменяется

относительно M^0 в диапазоне от $0,4M^0$ до $2,9M^0$. Ошибка же в 10% достигается при существенно больших изменениях M : от $0,3M^0$ до $4,5M^0$.

При экспоненциальной аппроксимации M формуле (9) соответствует следующая формула для относительной энергии импульса мощности:

$$\frac{E_u}{E^0} = \frac{S}{S^0} \exp\left(\frac{\varepsilon_m - \varepsilon_m^0}{\beta_u}\right) = \frac{S}{S^0} \exp(\rho_m - \rho_m^0), \quad (21)$$

где

$$\beta_u = 1 \left/ \frac{d \ln M}{d\varepsilon_m} \right|_{\varepsilon_m^0} = M^0 \left/ \frac{dM}{d\varepsilon_m} \right|_{\varepsilon_m^0}, \quad (22)$$

$$M^0 = \frac{E_u^0}{S^0} \approx \frac{1}{\sum_{i=1}^6 \mu_i \lambda_i \frac{\exp(-\lambda_i T_u)}{1 - \exp(-\lambda_i T_u)}} - \frac{\beta T_u}{\Delta K_{MP} - \varepsilon_m^0}. \quad (23)$$

Параметр β_u введен в работе [9] и назван импульсной долей запаздывающих нейтронов. Реактивность импульсного реактора периодического действия весьма удобно выражать в долях β_u (по аналогии с β для стационарного реактора) при небольших изменениях мощности. В уравнении (21) реактивность ρ есть реактивность на мгновенных нейтронах, выраженная в долях β_u :

$$\rho = \varepsilon / \beta_u. \quad (24)$$

Для реактора ИБР-2 $\beta_u = 1,6 \cdot 10^{-4}$.

Уравнения мощностной обратной связи. Увеличение мощности реактора приводит к увеличению температуры составляющих его частей, к расширению топлива, теплоносителя, опорной плиты, изгибу топливных кассет, корпуса модулятора реактивности и т. д. При уменьшении мощности происходят обратные изменения. Все это приводит к изменению реактивности реактора и, следовательно, мощности. Эта обратная связь оказывает сильное влияние на переходные процессы мощности, на устойчивость реактора. Она влияет на выбор структуры и параметров системы автоматического управления мощностью реактора.

На этапе проектирования реактора ИБР-2 были проведены исследовательские работы по оценке обратной связи, сделан вывод о том, что реактивность обратной связи пропорциональна температуре топлива и теплоносителя. В реакторе ИБР-2 измерение температуры топлива не предусмотрено. Не было оно предусмотрено и в реакторе ИБР-30. В связи с этим при оценке влияния разогрева реактора на реактивность целесообразно рассматривать не температурную обратную связь (температура–реактивность), а мощностную обратную связь (МОС) (мощность–реактивность).

До пуска реактора ИБР-2 были проведены эксперименты на импульсном реакторе ИБР-30 для оценки его мощностной обратной связи. Для аппроксимации МОС был использован частотный метод. В первом приближении

МОС была представлена в виде инерционного (апериодического) звена, т. е. описана линейным дифференциальным уравнением первого порядка [20, 21].

В 1982 г. на первом этапе энергетического пуска были проведены аналогичные эксперименты на реакторе ИБР-2 при частоте импульсов мощности 25 Гц. Эксперименты проводились при средней мощности реактора от 0,4 до 1,9 МВт и различных значениях расхода теплоносителя (номинальный, а также 40 и 70 % от номинального). Мощностная обратная связь также была аппроксимирована в первом приближении одним инерционным звеном [22].

В серии экспериментов в 1988–1989 гг. при частоте импульсов мощности 5 Гц, средней мощности 2 МВт и расходе теплоносителя 90 м³/ч были зарегистрированы переходные процессы мощности, вызванные периодическими прямоугольными колебаниями реактивности в широком диапазоне частот от 0,022 до 2,5 Гц. И временной, и частотный методы обработки переходных процессов показали, что в линейном приближении МОС следует описывать тремя дифференциальными уравнениями первого порядка, т. е. представлять МОС в виде трех инерционных звеньев [23–25], при этом одна составляющая МОС является положительной.

При симметричных колебаниях реактивности зарегистрированные колебания мощности заметно несимметричны. В связи с этим в работе [26] один из трех коэффициентов передачи МОС был принят зависимым от температуры теплоделяющих элементов. В связи с тем, что температура топлива не регистрировалась, а оценивалась расчетным путем, в работе [27] коэффициенты передачи были приняты зависимыми от реактивности МОС на основании предположения, что реактивность МОС пропорциональна температуре топлива.

В 1992–1996 гг. была зарегистрирована серия переходных процессов мощности, вызванных прямоугольными колебаниями реактивности с периодом колебаний 33 с при средней мощности реактора от 1,7 до 2 МВт и расходе теплоносителя 90 м³/ч. МОС была представлена в виде трех параллельных инерционных звеньев с коэффициентами передачи, зависимыми от ее реактивности, т. е. были введены местные обратные связи. Это дало хорошее приближение рассчитанных переходных процессов к зарегистрированным [28]. Звено с наибольшей постоянной времени (7–8 с) отображает расширение топлива активной зоны, что согласуется с расчетной оценкой [29]. Два других звена с меньшими постоянными времени, по-видимому, отображают изгиб топливных кассет и расширение опорной плиты, с которой связаны кассеты. МОС, моделируемая этими звеньями и отражающая процессы в активной зоне реактора, названа быстрой.

Анализ длительного переходного процесса, вызванного разовым уменьшением уровня реактивности при отключенном автоматическом регуляторе, показал, что, помимо быстрой МОС, необходимо ввести в модель медленную МОС в виде двух параллельно соединенных инерционных звеньев с постоян-

ными времени на два порядка большими, чем постоянные времени быстрой МОС [30]. Медленная МОС, по-видимому, отображает влияние контура теплоносителя. Проанализированный длительный переходный процесс (1000 с) соответствовал средней мощности ИБР-2 1,87 МВт, расходу теплоносителя 80 м³/ч (меньшему, чем номинальный) и был обусловлен быстрым смещением промежуточного регулятора на 3,41 мм вниз, т. е. уменьшением реактивности на 0,194 β_u . Этот переходный процесс, измеренный в 1997 г., отличался существенными колебаниями мощности (более 40 % от исходного уровня). Рассматривалось несколько вариантов аппроксимации МОС, имеющих различия в учете нелинейностей коэффициентов передачи МОС. Наилучшему приближению соответствовал вариант, в котором быстрая МОС была представлена только двумя инерционными звеньями. Коэффициент передачи звена с большей постоянной времени (звена отрицательной обратной связи) был принят зависимым от реактивности, обусловленной именно этим звеном, а коэффициент передачи звена с меньшей постоянной времени (звена положительной обратной связи) — от суммарной реактивности МОС. Такое различие можно объяснить, если предположить, что отрицательная составляющая быстрой МОС обусловлена, в основном, расширением тепловыделяющих элементов, вызванным их разогревом. Положительная же составляющая быстрой МОС обусловлена многими факторами, формирующими суммарную реактивность МОС. Простейшим является вариант, когда коэффициенты передачи быстрой МОС принимаются зависимыми от отклонений мощности, т. е. без использования местных обратных связей внутри модели быстрой МОС. Такое описание не отображает физической сущности возникновения МОС, но математически является наиболее простым и дает приемлемые результаты при моделировании переходных процессов при умеренных (до 10 %) отклонениях энергии импульсов мощности [31–35].

Введение того или иного вида нелинейностей в быструю МОС требует особого изучения. В последнем варианте модели динамики реактора ИБР-2 коэффициент передачи наиболее медленной составляющей быстрой МОС принят зависимым от реактивности этой составляющей (она, предположительно, обусловлена расширением топлива). Коэффициенты же передачи более быстрых составляющих быстрой МОС приняты зависимыми от суммарной реактивности МОС (в настоящее время такой вариант представляется наиболее приемлемым по физическим соображениям). В результате реактивность МОС, соответствующая n -му импульсу мощности, представлена суммой пяти составляющих:

$$\rho_{\theta n} = \sum_{j=1}^5 \rho_{\theta j n}. \quad (25)$$

Три составляющие ($j = 1, 2, 3$) с нелинейными коэффициентами передачи $k_{\theta j N}$ соответствуют быстрой МОС и для n -го импульса описаны следу-

ющими уравнениями:

$$\rho_{\theta j n} = \left(\rho_{\theta j n-1} + \Delta E_{n-1} \frac{k_{\theta j N}}{T_{\theta j}} \right) \exp \left(-\frac{T_u}{T_{\theta j}} \right), \quad (26)$$

где $T_{\theta j}$ — постоянная времени j -й составляющей МОС.

Для $j = 1$ нелинейный коэффициент передачи для n -го импульса выражен формулой

$$k_{\theta j N} = k_{\theta j} (1 + c_j \rho_{\theta j n-1}), \quad (27a)$$

т. е. зависит от $\rho_{\theta 1}$, а для $j = 2, 3$

$$k_{\theta j N} = k_{\theta j} (1 + c_j \rho_{\theta n-1}), \quad (27б)$$

т. е. зависит от ρ_{θ} .

Здесь $k_{\theta j}$, c_j — соответственно составляющая коэффициента передачи, не зависящая от реактивности МОС, и коэффициент нелинейности, учитывающий зависимость коэффициента передачи $k_{\theta j N}$ от реактивности.

Две составляющие ($j = 4, 5$) с линейными коэффициентами соответствуют медленной МОС и описаны уравнениями (26), но вместо нелинейных коэффициентов $k_{\theta j N}$ в них входят не зависящие от реактивности коэффициенты $k_{\theta j}$. При этом параметры медленной МОС удовлетворяют условию

$$k_{\theta 4}/T_{\theta 4} = -k_{\theta 5}/T_{\theta 5}. \quad (28)$$

Условие (28) выбрано из физических соображений и означает, что реактивность медленной МОС не изменяется скачком.

Уравнения (26) и (27) соответствуют предположению, что реактивность МОС, соответствующая n -му импульсу мощности, обусловлена только предшествующими импульсами. Влиянием энергии n -го импульса мощности на реактивность МОС, соответствующую этому же n -му импульсу, пренебрегаем, поскольку самая малая постоянная времени быстрой МОС на три порядка больше длительности импульса мощности.

Соответствующая n -му импульсу мощности реактивность МОС в абсолютных единицах равна

$$\varepsilon_{\theta n} = \rho_{\theta n} \beta_u. \quad (29)$$

Регулируемый параметр реактора ИБР-2. В качестве регулируемого параметра реактора ИБР-2 принята относительная амплитуда импульса мощности

$$p_m = P_m / P_m^0, \quad (30)$$

где P_m , P_m^0 — соответственно амплитуда импульса мощности и ее базовое значение.

Поскольку скорость вращения основного подвижного отражателя поддерживается с высокой точностью ($7 \cdot 10^{-4}$), то относительная амплитуда p_m практически равна относительной энергии импульса мощности:

$$p_m \approx E_u / E_u^0. \quad (31)$$

Базовое значение E_u^0 , как следует из уравнений (23), (15) и (16), равно

$$E_u^0 = \bar{P}^0 T_u \left(1 - \frac{\beta T_u}{\Delta K_{MP} - \varepsilon_m^0} \sum_{i=1}^6 \mu_i \lambda_i \frac{\exp(-\lambda_i T_u)}{1 - \exp(-\lambda_i T_u)} \right). \quad (32)$$

Автоматический регулятор импульсного реактора. Основное назначение АР состоит в автоматическом выводе реактора на заданный уровень средней мощности и стабилизации мощности реактора на заданном уровне. Структура и параметры АР существенно влияют на переходные процессы мощности.

На этапе проектирования ИБР-2 был выведен алгоритм формирования реактивности АР, обеспечивающий статистически оптимальное поддержание уровня мощности, а именно достижение минимума среднеквадратического отклонения энергии для будущего импульса мощности на основании информации, соответствующей предыдущим импульсам [36]. При выводе алгоритма АР предполагалось, что на реактор воздействует случайное возмущение реактивности с нормальным законом распределения. Предполагалось также, что АР оценивает значения реактивности с некоторой статистической ошибкой, характеризующейся нормальным законом распределения. Кроме того, было введено понятие степени старения информации в АР. В результате было показано, что АР должен представлять собой интегрирующее звено, на вход которого подается отклонение энергии текущего импульса мощности от его базового значения.

В штатный АР реактора ИБР-2 помимо регулирующего стержня с шаговым электродвигателем и его блоком управления входит также блок сглаживания. Выходной сигнал блока сглаживания формируется путем сглаживания отклонений энергии импульсов мощности относительно базового значения и поступает на блок управления шаговым двигателем. Блок сглаживания представляет собой инерционное звено, а шаговый двигатель совместно с регулирующим стержнем и блоком управления — интегрирующее звено [37].

Автоматический регулятор представляет собой фильтр низких частот и обеспечивает достаточно хорошую стабилизацию мощности реактора ИБР-2 в среднем, естественно, не обрабатывая те возмущения реактивности (детерминированные или случайные), спектр частот которых лежит за пределами полосы пропускания АР.

Исследования, проведенные на стадии физического и энергетического пусков реактора, а также на стадии его эксплуатации, позволили получить

ряд дополнительных данных, которые не были известны при проектировании АР. В частности, это относится и к характеру возмущений реактивности и к особенностям мощностной обратной связи. Так, достаточно высоким (до 40 %) флуктуациям энергии импульсов мощности (вызванным вибрацией подвижных отражателей и топливных кассет, флуктуациями температуры и расхода теплоносителя в активной зоне и т. д.) соответствует сложный реальный частотный спектр колебаний. Он включает в себя помимо компоненты белого шума ряд детерминированных гармонических колебаний во всем диапазоне частот вплоть до наибольшей частоты 2,5 Гц [38], равной половине частоты импульсов мощности, т. е. включает частоты, существенно большие граничной частоты реакции АР. Кроме того, на стадии проектирования не были известны реальные параметры мощностной обратной связи.

Выбор структуры и параметров АР, учитывающий все особенности работы реактора, крайне важен, так как без АР реактор находится вблизи границы устойчивости [28]. Запас устойчивости по какому-либо параметру обычно оценивают как отношение его значения, соответствующего состоянию реактора на границе устойчивости, к значению, определенному для исследуемого устойчивого состояния. При таком подходе запас устойчивости, например, по одному из трех коэффициентов передачи МОС, а именно положительному, оценен всего в 17–19% для четырех зарегистрированных режимов работы: 1,9 и 2 МВт (май 1993 г.), 1,9 МВт (декабрь 1993 г.) и 1,95 МВт (январь 1996 г.). Расход теплоносителя для всех режимов работ был номинальным (90 м³/ч). В одном из зарегистрированных в январе 1997 г. процессов (при средней мощности 1,87 МВт и расходе теплоносителя 80 м³/ч) состояние реактора без АР оценено как неустойчивое [30].

Уравнения автоматического регулятора. Блок сглаживания формирует по инерционному закону из входного сигнала, представляющего собой последовательность импульсов с амплитудами p_{mn-1} , p_{mn} , p_{mn+1} и т. д., непрерывный выходной сигнал \tilde{p}_n ступенчатой формы. Высота ступени \tilde{p}_n в интервале времени между импульсами с номерами n и $n + 1$ формируется по закону

$$\tilde{p}_n = \tilde{p}_{n-1} + \frac{1}{q}(p_n - \tilde{p}_{n-1}), \quad (33)$$

где q — коэффициент сглаживания.

Предусмотрен выбор четырех фиксированных значений $q = 4, 8, 16$ и 32 .

После блока сглаживания формируется непрерывный ступенчатый сигнал управления двигателем АР, представляющий собой разность

$$\Delta\tilde{p}_n = \tilde{p}^0 - \tilde{p}_n = 1 - \tilde{p}_n. \quad (34)$$

В выражении (34) учтено, что \tilde{p}^0 представляет собой задающее (желаемое) значение сигнала \tilde{p}_n , равное единице.

В блоке управления двигателем АР предусмотрен выбор четырех фиксированных значений коэффициентов пропорциональности между разбалансом $\Delta\tilde{p}$ и скоростью шагового двигателя. Это осуществляется выбором одного из четырех возможных значений параметра Δ (0,05; 0,10; 0,15; 0,20), т. е. выбирается соответствие между разбалансом $\Delta\tilde{p}$ (когда $\Delta\tilde{p} = \Delta$) и скоростью шагового двигателя $v_\Delta = 5,5$ шаг/с. Каждый шаг двигателя приводит к изменению реактивности АР на $m_A = 0,0146 \beta_u$. Эта величина оценена путем обработки переходных процессов при прямоугольных колебаниях реактивности с низкой частотой (с периодом 125 с). В результате реактивность, вносимая при вращении шагового двигателя, описана уравнением

$$\frac{d\rho_A}{dt} = k_A \Delta\tilde{p} \quad (35)$$

или

$$\frac{d\varepsilon_A}{dt} = \beta_u k_A \Delta\tilde{p}. \quad (36)$$

Здесь k_A — коэффициент передачи двигателя и стержня АР в β_u/c :

$$k_A = \frac{v_\Delta m_A}{\Delta}, \quad (37)$$

где $v_\Delta m_A = 0,08 \beta_u/c$, $\beta_u = 1,6 \cdot 10^{-4}$.

В модели динамики реактора ИБР-2 вместо уравнений АР (33)–(36) использованы полученные из них уравнения для дискретных моментов времени (38)–(40), в которых в качестве переменных использованы относительные отклонения:

$$\Delta\tilde{e}_{un} = \Delta\tilde{e}_{un-1} + \frac{1}{q}(\Delta e_{un} - \Delta\tilde{e}_{un-1}), \quad (38)$$

$$\delta\tilde{e}_{un} = \Delta\tilde{e}_u^0 - \Delta\tilde{e}_{un}, \quad (39)$$

$$\varepsilon_{An} = \varepsilon_{An-1} + \beta_u k_A T_u \delta\tilde{e}_{un-1}. \quad (40)$$

Суммарная реактивность реактора. Реактивность реактора, соответствующая n -му импульсу мощности, представлена суммой

$$\varepsilon_{mn} = \varepsilon_m^0 + \varepsilon_{Fn} + \varepsilon_{An} + \varepsilon_{\theta n}, \quad (41)$$

где ε_m^0 — базовое значение максимума реактивности в импульсе; ε_F , ε_A , ε_θ — соответственно реактивность, обусловленная внешними факторами, вносимая автоматическим регулятором и обусловленная мощностной обратной связью.

В модели динамики реактора ИБР-2 реактивность ε_F моделируется блоком возмущающей реактивности. Он позволяет формировать различные возмущения реактивности, вносимые перемещением органов управления, поперечными колебаниями основного и дополнительного подвижных отражателей и т. д.

Дискретные передаточные функции. Импульсы мощности в модели динамики представлены в виде дельта-функций, умноженных на относительные отклонения энергии импульсов от базового значения. Что касается прочих переменных, то в уравнениях динамики используются лишь их значения в дискретные моменты времени (в моменты появления импульсов мощности). Это дает возможность охарактеризовать каждый линейный элемент модели соответствующей дискретной передаточной функцией и тем самым использовать программы, позволяющие конструировать модульную систему из отдельных блоков, описанных в z -представлении. При моделировании исходные входные воздействия реактивности задаются во временной области, применительно к линейным блокам используется z -преобразование функций времени и, наконец, выходной сигнал (изменение мощности во времени) определяется с использованием обратного z -преобразования.

Дискретные передаточные функции получены из частотных импульсных передаточных функций (которые ранее были выведены для анализа устойчивости реактора [28, 30, 37]) путем замены переменной

$$z = \exp(j\omega T_u), \quad (42)$$

где ω — круговая частота в с^{-1} , причем ωT_u изменяется в пределах от 0 до π . Сомножитель j (в отличие от индекса j) равен $j = \sqrt{-1}$.

Уравнения запаздывающих нейтронов (19) и (20) соответствуют дискретные передаточные функции

$$W_s(z) = \frac{\Delta s(z)}{\Delta e(z)} = \sum_{i=1}^6 W_{si}(z), \quad (43)$$

$$W_{si}(z) = \frac{\Delta s_i(z)}{\Delta e(z)} = b_{si} \frac{z^{-1}}{a_{si} - z^{-1}},$$

где

$$a_{si} = \exp(\lambda_i T_u), \quad (44)$$

$$b_{si} = \frac{\mu_i \lambda_i}{\sum_{i=1}^6 \mu_i \lambda_i \frac{\exp(-\lambda_i T_u)}{1 - \exp(-\lambda_i T_u)}}.$$

Мощностной обратной связи соответствуют передаточные функции

$$W_{\theta_j}(z) = \frac{\rho_{\theta_j}(z)}{\Delta E(z)} = b_{\theta_j} \frac{z^{-1}}{a_{\theta_j} - z^{-1}}, \quad j = 1, \dots, 5, \quad (45)$$

где

$$a_{\theta_j} = \exp(T_u/T_{\theta_j}), \quad (46)$$

$$b_{\theta_j} = k_{\theta_j}/T_{\theta_j} \quad (\beta_u/\text{МДж}).$$

Для $j = 1, 2, 3$ под $\Delta E(z)$ в формуле (45) понимается функция $\Delta E_j(z)$, являющаяся z -изображением дискретной функции времени ΔE_{jn} , причем для $j = 1$ $\Delta E_{jn} = \Delta E_n(1 + c_j \rho_{\theta 1n})$, а для $j = 2, 3$ $\Delta E_{jn} = \Delta E_n(1 + c_j \rho_{\theta n})$.

Автоматическому регулятору соответствуют следующие дискретные передаточные функции:

$$W_{A1}(z) = \frac{\Delta \tilde{e}_u(z)}{\Delta e_u(z)} = \frac{b_{A1}}{a_{A1} - z^{-1}}, \tag{47}$$

$$W_{A2}(z) = \frac{\rho_A(z)}{\delta \tilde{e}_u(z)} = b_{A2} \frac{z^{-1}}{1 - z^{-1}}. \tag{48}$$

В уравнениях (47) и (48)

$$b_{A1} = \frac{1}{q - 1}, \quad a_{A1} = \frac{q}{q - 1}, \quad b_{A2} = k_A T_u, \tag{49}$$

где коэффициент передачи двигателя и стрелы АР k_A определяется формулой (37).

В настоящее время установлены следующие значения параметров АР реактора ИБР-2: $q = 8$, $\Delta = 0, 20$.

Член z^{-1} в числителях формул (43), (45) и (48) указывает на запаздывание выходных величин относительно входных на один период T_u .

Дискретная модель импульсного реактора ИБР-2 для моделирования переходных процессов. На рис. 7 показана блок-схема реактора ИБР-2, а на рис. 8–10 — блок-схемы входящих в нее элементов.

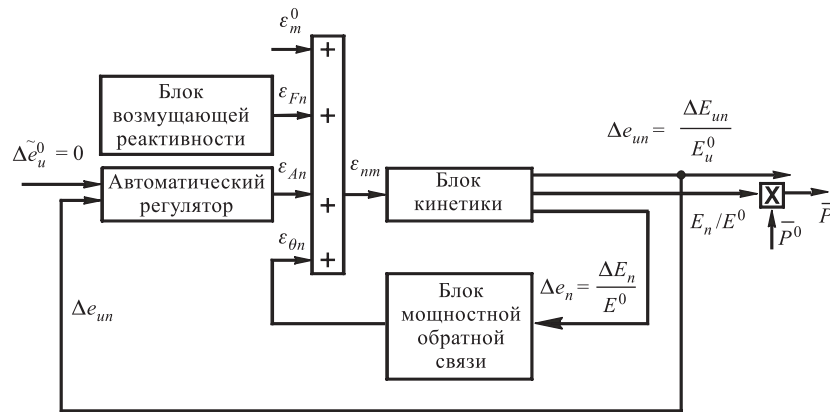


Рис. 7. Блок-схема реактора ИБР-2

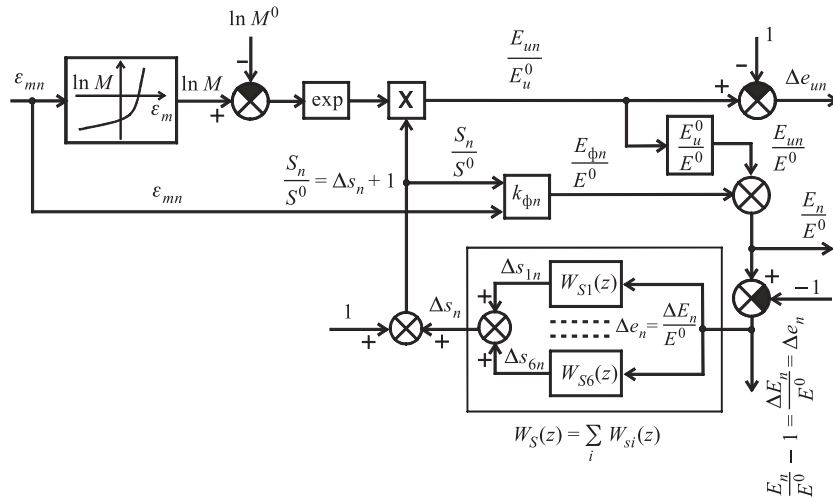


Рис. 8. Блок-схема кинетики реактора

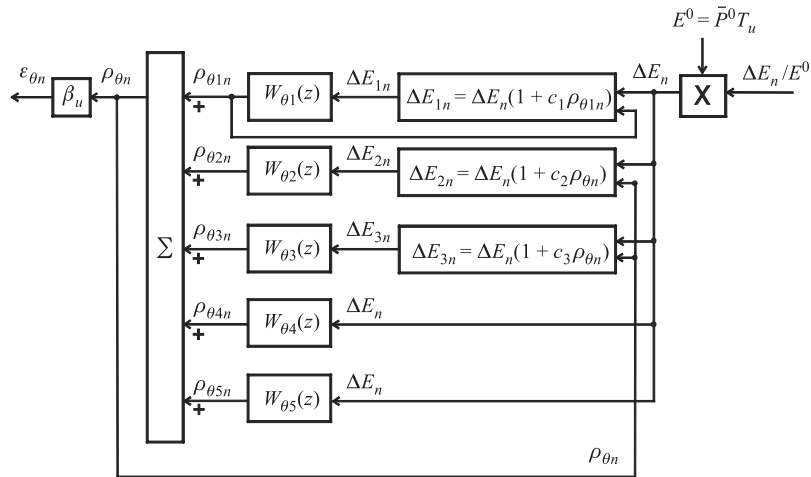


Рис. 9. Блок-схема мощностной обратной связи

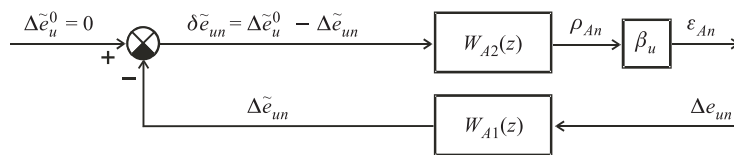
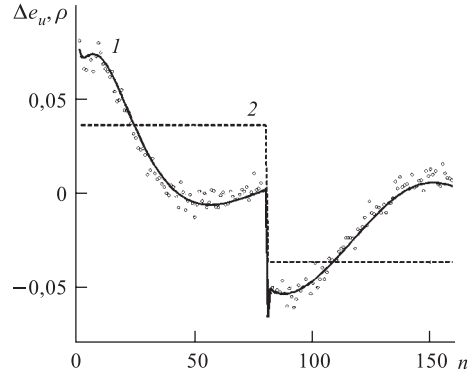


Рис. 10. Блок-схема автоматического регулятора

Примеры моделирования переходных процессов реактора ИБР-2. Режим саморегулирования. Для анализа изменений в динамике реактора ИБР-2 проводится измерение переходных процессов энергии импульсов мощности при прямоугольных колебаниях реактивности с выведенным из контура регулирования АР. По измеренным данным вычисляются значения параметров МОС, обеспечивающие наилучшее приближение вычисленного переходного процесса, соответствующего этим параметрам, к зарегистрированному.

Измеренные значения параметров МОС вводятся в модель динамики.

Рис. 11. Переходный процесс относительного отклонения энергии импульса мощности Δe_u (1) при прямоугольных колебаниях реактивности $\rho = \pm 0,0365 \beta_u$ (2) с периодом 160 импульсов, n — номер импульса. Средняя мощность реактора 1,415 МВт. \circ — экспериментальные значения Δe_u , кривые соответствуют десятому периоду колебаний



В качестве примера на рис. 11 приведен один из последних зарегистрированных переходных процессов. Там же приведен переходный процесс, полученный на модели, который и количественно, и качественно хорошо приближается к зарегистрированному. Переходный процесс соответствует эксперименту, проведенному в 2002 г. при мощности реактора 1,415 МВт, расходе теплоносителя 90 м³/ч и прямоугольных колебаниях реактивности $\pm 0,0365 \beta_u$. Смоделированный переходный процесс соответствует параметрам МОС, представленным в табл. 3.

Таблица 3. Параметры МОС для средней мощности реактора 1,415 МВт

j	1	2	3
Коэффициент передачи $k_{\theta j}, \beta_u/\text{МВт}$	-6,1	3,8	-0,44
Постоянная времени $T_{\theta j}, \text{с}$	7,9	4,8	0,19
Коэффициент нелинейности c_j, β_u^{-1}	-0,1	1,5	-9,9

Режим работы с автоматическим регулятором. Для реактора ИБР-2 при средней мощности 1,415 МВт и расходе теплоносителя 90 м³/ч с параметрами МОС, указанными в табл. 3, смоделированы переходные процессы

при различных комбинациях параметров автоматического регулятора (q и Δ) и различных вариантах возмущений реактивности:

а) скачок реактивности $\rho_F = -0,1 \beta_u$;

б) случайные возмущения реактивности с нормальным законом распределения с дисперсией $\sigma^2 = 0,05^2 \beta_u^2$;

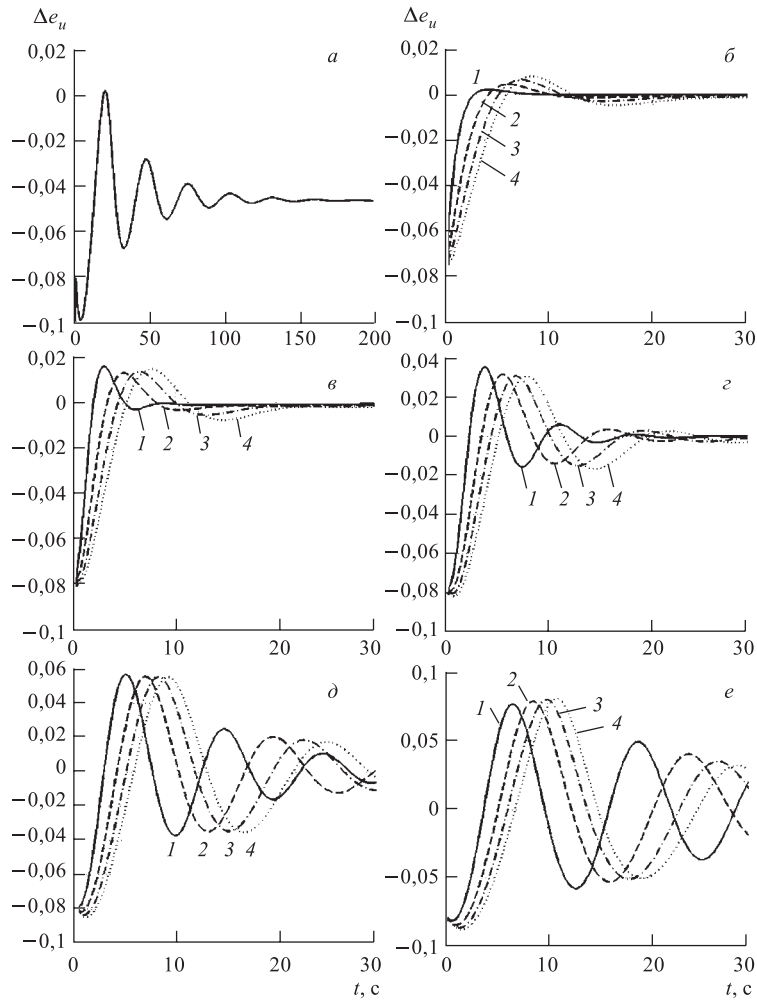


Рис. 12. Переходные процессы мощности ИБР-2 при скачке реактивности $-0,1 \beta_u$, средней мощности реактора 1,415 МВт и расходе теплоносителя $90 \text{ м}^3/\text{ч}$. а) АР отключен; б-е) АР включен, $q = 1$ (б); 4 (в); 8 (г); 16 (д); 32 (е). 1 — $\Delta = 0,05$; 2 — $\Delta = 0,10$; 3 — $\Delta = 0,15$; 4 — $\Delta = 0,20$

в) возмущение реактивности представляет собой сумму случайного возмущения согласно варианту (б) и одновременно четырех синусоидальных составляющих соответственно с амплитудами 0,03; 0,024; 0,009; 0,003 β_u , с частотами 0,8; 1,25; 1,6; 1,8 Гц и фазами (выбранными произвольно) 0; 0,4; 0,8; 1,2 рад. Такое возмущение близко к реальному для ИБР-2.

Моделировались процессы как при штатных значениях $q = 4, 8, 16$ и 32 , так и при $q = 1$, что соответствует отсутствию блока сглаживания. Для сравнения моделировались также переходные процессы при скачке реактивности с отключенным АР. Переходные процессы при скачке реактивности (вариант (а)) показаны на рис. 12, а (без АР) и на рис. 12, б–е (с АР).

Аналогичные переходные процессы смоделированы и для режима работы ИБР-2 со средней мощностью 1,87 МВт при расходе теплоносителя 80 м³/ч. Параметры МОС указаны в табл. 4.

Таблица 4. Параметры МОС для средней мощности реактора 1,87 МВт

j	1	2	3	4	5
Коэффициент передачи $k_{\theta j}, \beta_u/\text{МВт}$	-8,14	6,98	0	8,5	-15,49
Постоянная времени $T_{\theta j}, \text{с}$	5,8	4,5	—	450	820
Коэффициент нелинейности c_j, β_u^{-1}	-0,012	-0,27	0	—	—

Переходные процессы при скачке реактивности (вариант (а)) показаны на рис. 13, а (без АР) и на рис. 13, б–д (с АР).

В приведенных рисунках просматриваются следующие закономерности.

При фиксированных значениях q длительность переходного процесса увеличивается с ростом параметра Δ , т. е. с уменьшением скорости АР (рис. 12 и 13).

Наименьшие колебания соответствуют значению $q = 1$, т. е. наблюдаются при отсутствии блока сглаживания АР (рис. 12, б и 13, б). С увеличением q колебательность увеличивается (рис. 12, б–е и рис. 13, б–е). При средней мощности 1,87 МВт при $q = 16$ колебания раскачиваются (рис. 13, д), т. е. при таких соотношениях параметров модель реактора представляет собой неустойчивую систему и поэтому режим работы со средней мощностью 1,87 МВт и расходе теплоносителя 80 м³/ч следует рассматривать как нежелательный.

Таким образом, если учитывать лишь регулярные возмущения реактивности, то наилучшие переходные процессы наблюдаются при значениях параметров АР $q = 1$ и $\Delta = 0,05$.

На рис. 14 для режима работы ИБР-2 со средней мощностью 1,415 МВт при расходе теплоносителя 90 м³/ч показаны зависимости среднеквадратических отклонений энергии импульсов мощности σ , вычисленных за интер-

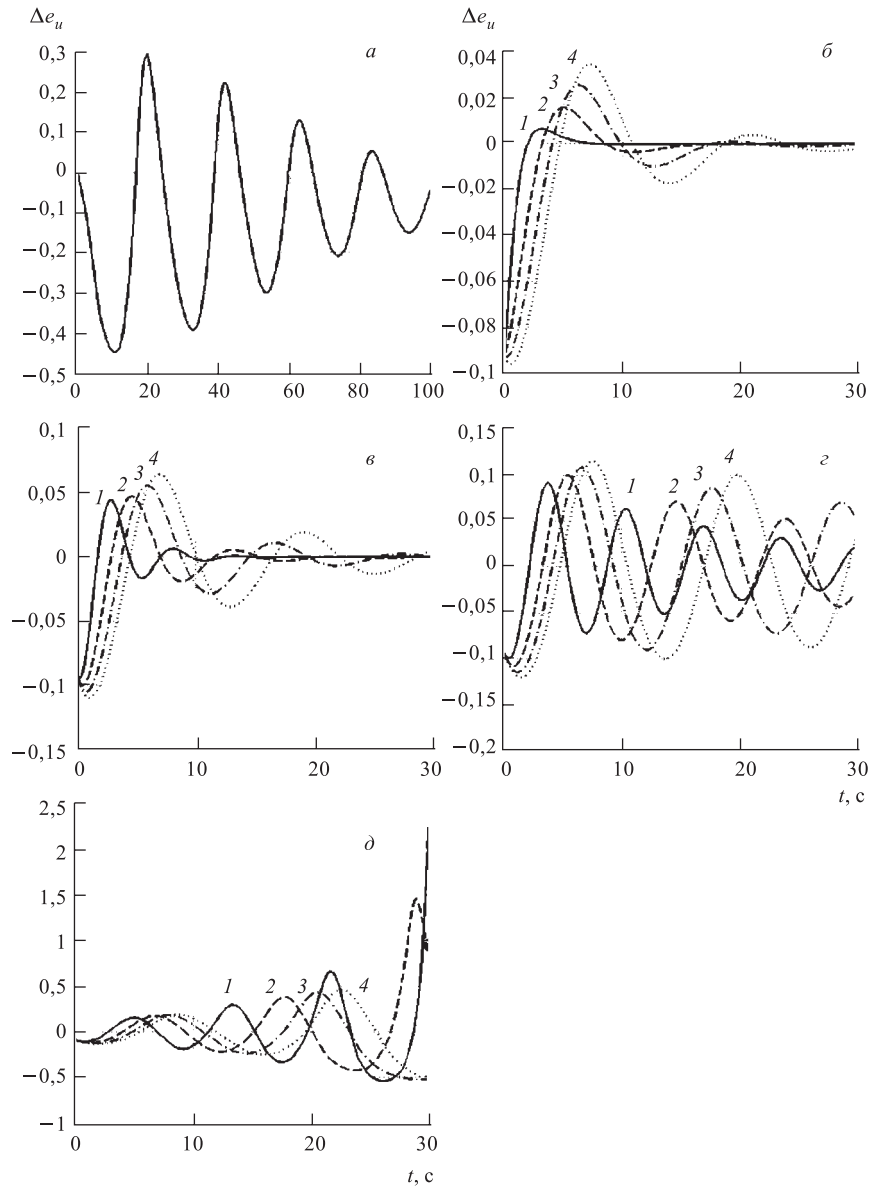
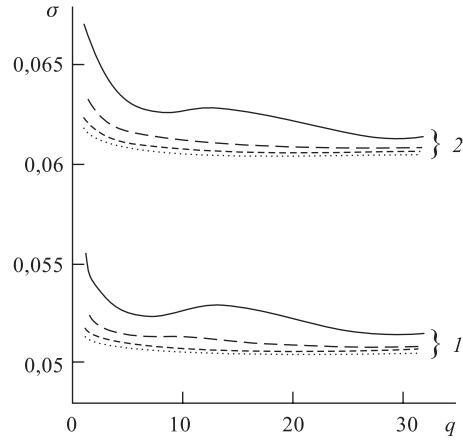


Рис. 13. Переходные процессы мощности ИБР-2 при скачке реактивности $-0,1 \beta_u$, средней мощности реактора 1,87 МВт и расходе теплоносителя $80 \text{ м}^3/\text{ч}$. а) АР отключен; б-г) АР включен, $q = 1$ (б); 4 (в); 8 (г); 16 (д). 1 — $\Delta = 0,05$; 2 — $\Delta = 0,10$; 3 — $\Delta = 0,15$; 4 — $\Delta = 0,20$

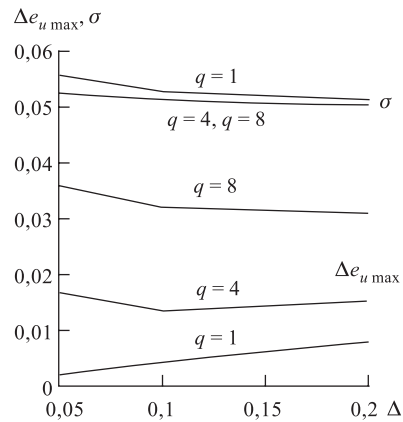
Рис. 14. Среднеквадратическое отклонение энергии импульсов мощности σ в зависимости от параметров АР q и Δ . Средняя мощность реактора 1,415 МВт, расход теплоносителя 90 м³/ч. Кривые 1 соответствуют случайному возмущению реактивности с дисперсией $0,05^2 \beta_u^2$. Кривые 2 соответствуют тому же случайному возмущению реактивности с добавлением регулярного возмущения в виде суммы четырех синусоидальных составляющих с амплитудами 0,03; 0,024; 0,009; 0,003 β_u , с частотами 0,8; 1,25; 1,6; 1,8 Гц и фазами 0; 0,4; 0,8; 1,2 рад. Сплошная кривая — $\Delta = 0,05$; штриховая — $\Delta = 0,10$; штрихпунктирная — $\Delta = 0,15$; точечная — $\Delta = 0,20$



вал времени 50 с при случайных возмущениях реактивности с дисперсией $\sigma_\rho^2 = 0,05^2 \beta_u^2$ и различных значениях параметров АР q и Δ . Для этого режима на рис. 15 для наглядности представлены показатели качества переходных процессов соответственно при случайных и скачкообразных возмущениях реактивности: среднеквадратическое отклонение σ и перерегулирование $\Delta e_{u \max}$ (при отрицательном скачке реактивности это наибольшее положительное отклонение Δe_u от установившегося значения).

Из рис. 14 и 15 видно, что при фиксированных q среднеквадратическое отклонение σ уменьшается с увеличением Δ . Однако этот выигрыш незначительный. Так, с изменением Δ от 0,05 до 0,20 при $q = 1$ изменение σ

Рис. 15. Зависимость показателей качества переходных процессов от параметров АР q и Δ . Средняя мощность реактора 1,415 МВт, расход теплоносителя 90 м³/ч, параметры мощностной обратной связи $k_{\theta j} = -6,1; 3,8; -0,44 \beta_u/\text{МВт}$, $T_{\theta j} = 7,9; 4,8; 0,19 \text{ с}$, $c_j = -0,1; 1,5; -9,9 \beta_u^{-1}$. σ — среднеквадратическое отклонение энергии импульсов мощности при случайном возмущении реактивности $0,05^2 \beta_u^{-2}$; $\Delta e_{u \max}$ — наибольшее положительное отклонение энергии импульсов мощности (перерегулирование) при скачкообразном возмущении реактивности $-0,1 \beta_u$



составляет 8 % (от 0,0556 до 0,0513), а при $q = 4$ равно 4 % (от 0,0528 до 0,0507).

Таким образом, если учитывать регулярные и случайные возмущения реактивности, то целесообразно выбирать $q = 1$ или 4 (во всяком случае, не следует выбирать $q > 4$). В связи с этим можно сделать вывод о том, что принятые в настоящее время на ИБР-2 значения параметров AP $q = 8$ и $\Delta = 0, 20$ нельзя считать полностью оптимальными (они оптимальны при учете лишь случайных составляющих реактивности).

На рис. 14 показаны также зависимости σ для варианта (в), в котором к случайным возмущениям реактивности добавлены регулярные возмущения в виде четырех синусоидальных сигналов. Такой вид шумов характерен для нормальной работы реактора. Из рис. 14 видно, что в этом случае характер σ не изменился по сравнению с вариантом (б) (характеризующимся только случайными возмущениями), но значение σ , естественно, увеличилось.

Непрерывная (аналоговая) модель динамики импульсного реактора ИБР-2 с усредненными по периоду переменными. *Обоснование создания модели.* В теории автоматического управления наиболее удобные методы исследования динамики систем разработаны для непрерывных систем автоматического управления. В связи с этим разработан вариант упрощенной непрерывной модели импульсного реактора ИБР-2, в которой в качестве переменных использованы непрерывные величины, полученные из дискретных путем усреднения их по периоду следования импульсов мощности. Непрерывная модель является упрощенным эквивалентом дискретной модели. В непрерывной модели нелинейная зависимость $M = f(\varepsilon_m)$ аппроксимирована экспонентой, что допустимо, когда энергия импульса мощности изменяется не более чем в 3–4 раза относительно базового значения. На реакторе ИБР-2 предусмотрено срабатывание аварийной защиты при изменении энергии импульса мощности на +100 и –50 % от базового уровня. Поэтому экспоненциальная аппроксимация применима для моделирования всех режимов работы реактора, в которых предполагается исправность аварийной защиты.

Блок-схемы. В дискретной модели в качестве переменных используются энергия импульса мощности, энергия фона и полная (суммарная) энергия, выделяемая за период. В непрерывной модели используются соответствующие им мощности, усредненные по периоду импульсов. Также по периоду усредняются и другие переменные. Регулируемой величиной в непрерывной модели является относительное отклонение мощности (обусловленной импульсом мощности) от своего базового значения

$$\Delta p_u = P_u / P_u^0, \quad (50)$$

которое численно равно относительному отклонению энергии импульса Δe_u , используемому в качестве регулируемой величины в дискретной модели.

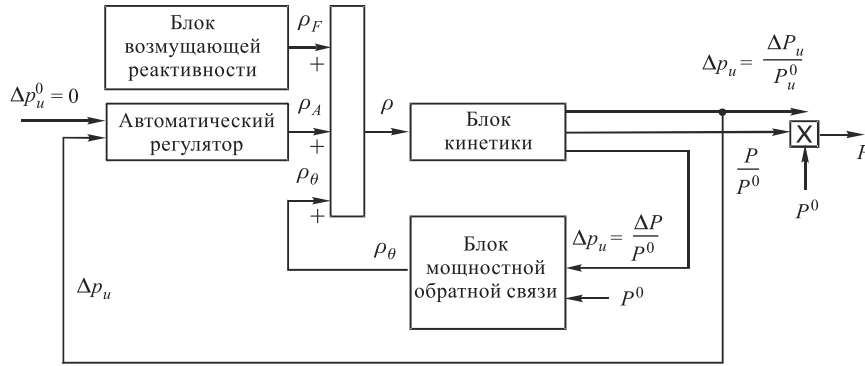


Рис. 16. Блок-схема реактора ИБР-2 с усредненными по периоду переменными

Блок-схемы реактора ИБР-2 для исследования его динамики показаны на рис. 16–19, где использованы следующие обозначения, причем верхним нулевым индексом помечены базовые значения переменных, соответствующие режиму со стабильными импульсами мощности: T_u — период следования импульсов мощности (в с); P_u , P_ϕ , $P = P_u + P_\phi$ — соответственно мощность, обусловленная импульсом мощности, фоном и полная (в МВт); $\Delta P_u = P_u - P_u^0$, $\Delta p_u = \Delta P_u / P_u^0$, $\Delta P = P - P^0$, $\Delta p = \Delta P / P^0$ — соответственно отклонение от своего базового значения мощности, обусловленной

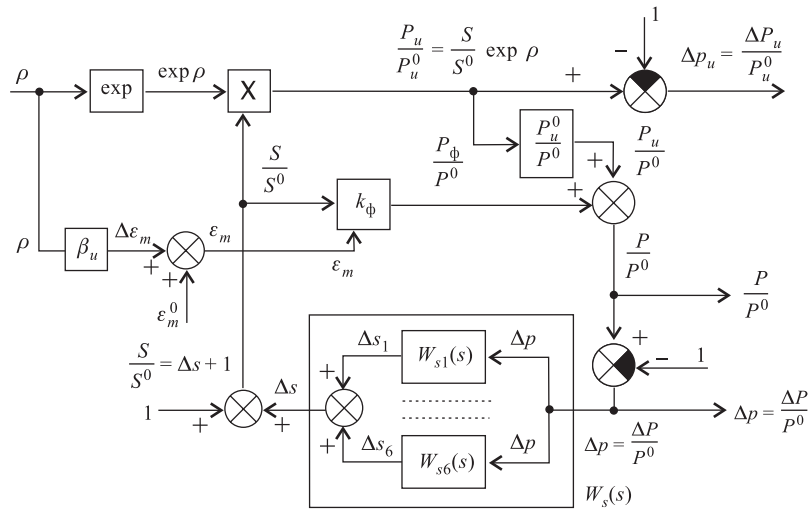


Рис. 17. Блок-схема кинетики для усредненной модели

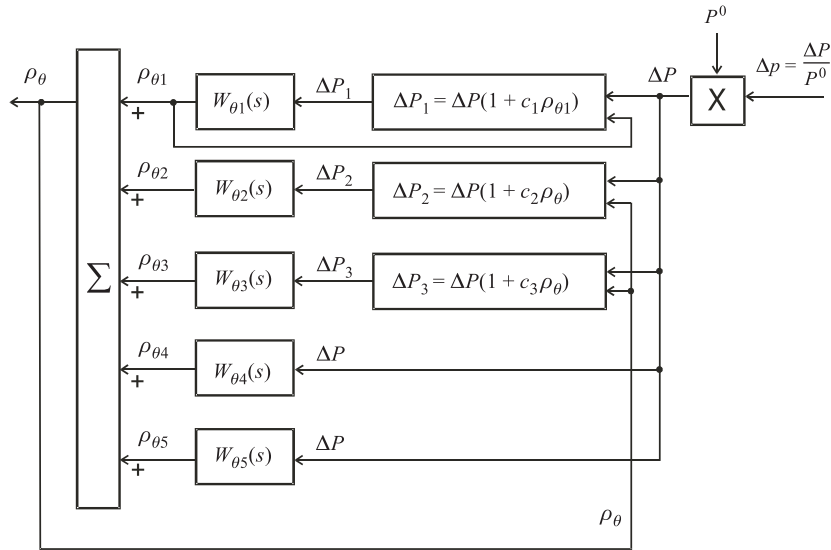


Рис. 18. Блок-схема МОС для усредненной модели

импульсом мощности (в МВт и в отн. ед.), и то же для полной мощности; $\Delta \tilde{p}_u$ — сглаженная величина относительного отклонения Δp_u ; $\varepsilon_m, \varepsilon_m^0$ — соответственно наибольшее значение реактивности в абс. ед. и ее базовое значение; β_u — импульсная доля запаздывающих нейтронов, равная для ИБР-2 $\beta_u = 1,6 \cdot 10^{-4}$; $\rho_F, \rho_A, \rho_{\theta}, \rho = \rho_F + \rho_A + \rho_{\theta}$ — соответственно реактивность в долях β_u , обусловленная внешними факторами (возмущением), автоматическим регулятором, мощностной обратной связью и суммарная; $\rho_{\theta 1} \div \rho_{\theta 5}$ — составляющие реактивности МОС (в долях β_u); c_1, c_2, c_3 — параметры нелинейности коэффициентов передачи МОС в β_u^{-1} ; $\Delta s_i = (S_i - S_i^0)/S^0$, $\Delta s = \sum_{i=1}^6 \Delta s_i = (S - S^0)/S$ — соответственно отклонение интенсивности ис-

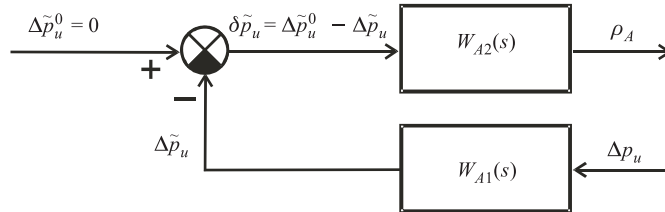


Рис. 19. Блок-схема АР для усредненной модели

точников запаздывающих нейтронов группы i (S_i) и суммарной интенсивности (S) от их базовых значений в отн. ед.; $\Delta P_1, \Delta P_2, \Delta P_3$ — промежуточные переменные, обусловленные нелинейностями коэффициентов передачи трех составляющих быстрой МОС; $k_{\Phi} = \frac{\beta T_u}{\Delta K_{MP} - \varepsilon_m} \sum_{i=1}^6 \mu_i \lambda_i \frac{\exp(-\lambda_i T_u)}{1 - \exp(-\lambda_i T_u)}$ — коэффициент передачи, связывающий мощность фона (в отн. ед.) с источниками запаздывающих нейтронов (в отн. ед.); $\Delta K_{MP} = 3,145 \cdot 10^{-2}$ — эффективность модулятора реактивности (ОПО и ДПО).

Передаточные функции. В передаточных функциях переменная преобразования Лапласа (аргумент) обозначена буквой s .

Запаздывающим нейтронам соответствуют следующие передаточные функции:

$$W_s(s) = \frac{\Delta s(s)}{\Delta p(s)} = \sum_{i=1}^6 W_{si}(s), \quad (51)$$

$$W_{si}(s) = \frac{\Delta s_i(s)}{\Delta p(s)} = \frac{\mu_i \exp(-\lambda_i T_u/2)}{T_{si}s + 1} \exp\left(-\frac{T_u}{2}s\right), \quad (52)$$

где $\mu_i \exp(-\lambda_i T_u/2)$ — коэффициент передачи, а $T_{si} = 1/\lambda_i$ — постоянная времени (в с) для i -й группы запаздывающих нейтронов.

Мощностной обратной связи соответствуют следующие передаточные функции:

$$W_{\theta j}(s) = \frac{\rho_{\theta j}(s)}{\Delta P(s)} = \frac{k_{\theta j} \exp(-0,5T_u/T_{\theta j})}{T_{\theta j}s + 1} \exp\left(-\frac{T_u}{2}s\right), \quad (53)$$

где $T_{\theta j}, k_{\theta j} \exp(-0,5T_u/T_{\theta j})$ — соответственно постоянная времени (в с) и коэффициент передачи (β_u /МВт) для j -й составляющей МОС, $j = 1, \dots, 5$.

В реакторе ИБР-2 при изменении энергии импульса мощности изменяется как интенсивность источников запаздывающих нейтронов, так и реактивность МОС. Эти изменения влияют на последующие импульсы мощности. Предполагается, что МОС не проявляет себя в текущем импульсе мощности. Предполагается, что изменение интенсивности источников запаздывающих нейтронов влияет как на последующие импульсы мощности, так и на текущий (последнее учтено при вычислении импульсного коэффициента умножения M). Результатом этих предположений является появление в передаточных функциях $W_{si}(s)$ и $W_{\theta j}(s)$ элементов чистого запаздывания на время $T_u/2$ (полупериод) в виде множителя $\exp(-0,5T_u s)$, а также некоторое уменьшение коэффициентов передачи, на что указывают множители $\exp(-\lambda_i T_u/2)$ и $\exp(-0,5T_u/T_{\theta j})$.

Автоматическому регулятору соответствуют следующие передаточные функции:

$$W_{A1}(s) = \frac{\Delta \tilde{p}_u(s)}{\Delta p_u(s)} = \frac{1}{T_A s + 1}, \quad (54)$$

$$W_{A2}(s) = \frac{\rho_A(s)}{\delta \tilde{p}_u(s)} = \frac{k_A}{s}, \quad (55)$$

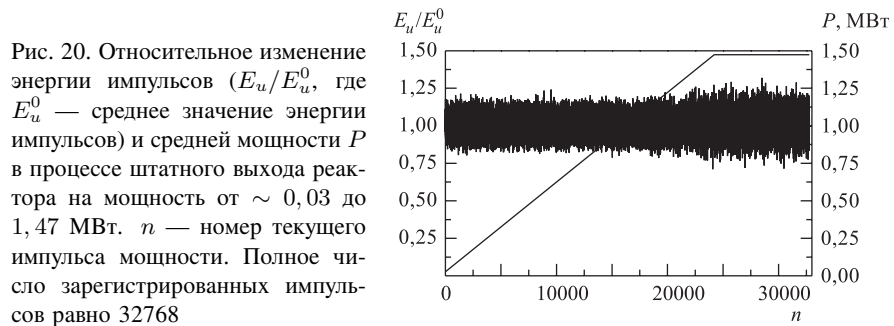
где T_A — постоянная времени блока сглаживания (в с) ($T_A = q$); q — параметр блока сглаживания входного сигнала АР (предусмотрен выбор одного из четыре возможных значений $q = 4, 8, 16, 32$); $k_A = 0,08/\Delta$ — коэффициент передачи двигателя и стержня АР в β_u/c ; Δ — скоростной параметр двигателя АР (предусмотрен выбор одного из четырех возможных значений $\Delta = 0,05; 0,10; 0,15; 0,20$); $\delta \tilde{p}_u = \Delta \tilde{p}_u^0 - \Delta \tilde{p}_u$ — сигнал рассогласования (ошибка регулирования), равный разности между базовым значением сглаженного относительного отклонения мощности ($\Delta \tilde{p}_u^0 = 0$), обусловленным импульсом мощности, и его текущим значением $\Delta \tilde{p}_u$.

Переходные процессы, смоделированные на непрерывной модели, практически совпадают с соответствующими процессами, полученными на дискретной модели.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК РЕАКТОРА ИБР-2

В процессе эксплуатации параметры реактора изменяются, что влияет на степень его устойчивости. В связи с этим периодически на реакторе проводятся эксперименты с целью получения динамического «портрета» реактора. Ниже приведены некоторые результаты экспериментов, проведенных в 2002 г.

Шумовое состояние реактора. Измерение реакторного шума позволяет определить особенности шумов мощности в зависимости от изменения состояния реактора, выделить из общего шума частотную область нестабильных колебаний и определить ее связь с реакторными параметрами. Измерения нейтронных шумов проводились с помощью ионизационной камеры деления с записью последовательности значений энергии нейтронных импульсов. Параллельно шумам мощности измерялись осевые отклонения основного и дополнительного подвижных отражателей (ОПО, ДПО), а также рассинхронизация угла между ОПО и ДПО. Длина временного ряда для каждого параметра составляла 8192 значения. По измеренным временным рядам указанных параметров проводилась статистическая обработка с вычислением флуктуаций реактивности и спектрального состава колебаний. Все спектры были нормированы на дисперсию σ_E^2 . В этом случае форма спектра не зависела от мощности и соответственно от уровня колебаний. Осевые колебания подвижных отражателей (ПО) в данном случае исследовались только для оценки их влияния на флуктуации мощности в нужных диапазонах частот с тем, чтобы вклад вибраций отражателей в шумовую мощность можно было отделить от других источников шумов, не измеряемых непосредственно. Парциальные колебания мощности, вызванные осевыми и крутильными колебаниями ПО, были выделены из полных колебаний с помощью функций когерентности.



Шумовое состояние реактора в процессе штатного выхода на мощность. Анализ реакторного шума в процессах штатного изменения мощности с помощью автоматического регулятора позволяет определить особенности шумов в области значений мощности, контролируемой АР. Исследовались временные ряды, зарегистрированные при линейном повышении мощности от 30 до 1475 кВт. На рис. 20, в качестве примера, приведено относительное изменение энергии нейтронных импульсов в процессе штатного подъема мощности, а на рис. 21 — спектры колебаний мощности. Рис. 20 отражает

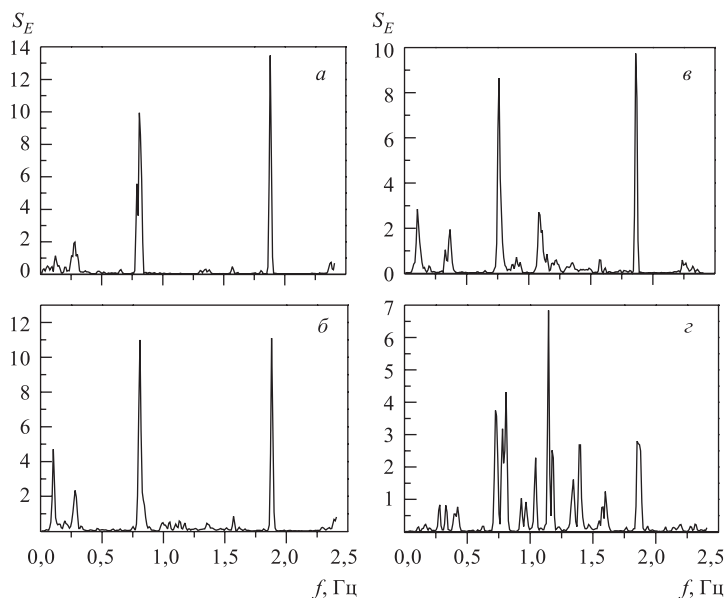


Рис. 21. Характерное изменение спектральной плотности флуктуации энергии импульсов S_E от частоты f в процессе штатного выхода на мощность от ~ 30 до 1475 кВт с равномерной скоростью при некоторых интервалах мощности: а) 30–130; б) 1120–1240; в) 1240–1360; г) 1475 кВт

возрастание шумов при мощности реактора выше 1,34 МВт. На рис. 21 видно появление пороговой компоненты шумов на частотах от 1,0 до 1,5 Гц и изменение низкочастотной компоненты на частоте 0,1 Гц. Пики на частотах $\sim 0,80$ и $\sim 1,87$ Гц вызваны вибрациями подвижных отражателей.

Шумовое состояние реактора на установившейся средней мощности (при достижении теплового равновесия). Определялись характеристики реакторных шумов при некоторых значениях установившейся средней мощности. Установившейся тепловой мощностью считалось ее значение, при котором температура натрия на входе в активную зону практически не менялась во время измерения (~ 30 мин). Все элементы активной зоны считались прогретыми полностью. Спектры колебаний энергии импульсов мощности приведены на рис. 22.

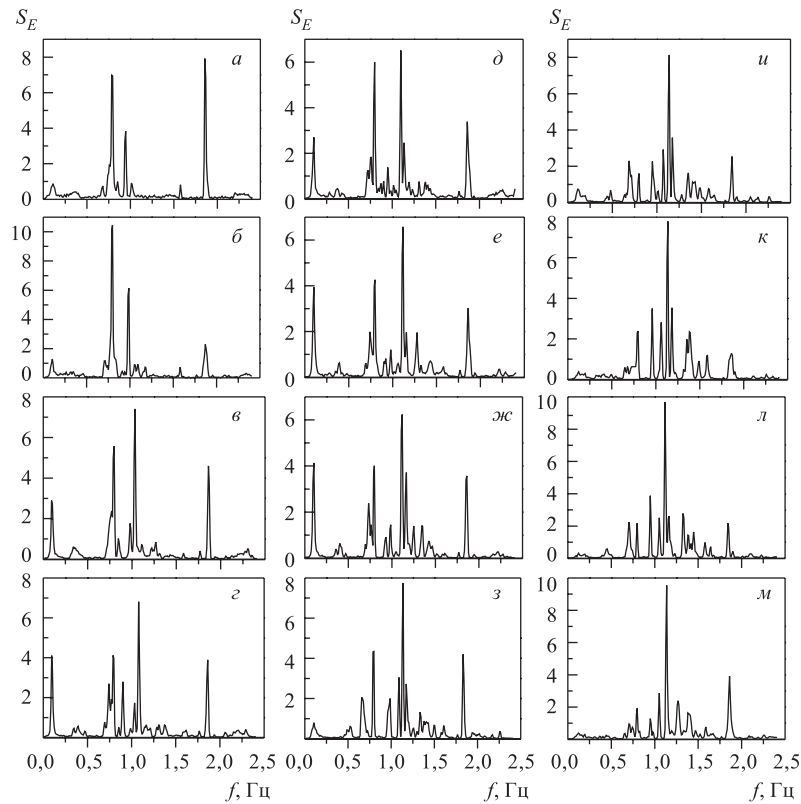
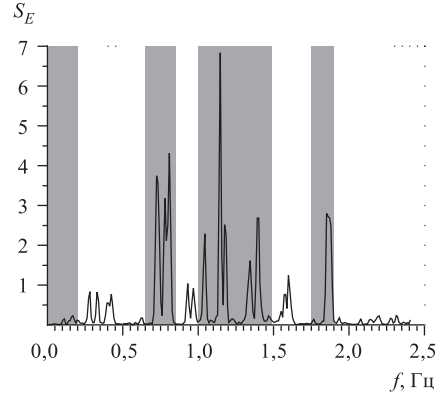


Рис. 22. Спектральная плотность флуктуации энергии импульсов S_E в функции частоты f при некоторых уровнях установившейся мощности: а) 1020; б) 1070; в) 1130; г) 1210; д) 1250; е) 1310; ж) 1330; з) 1375; и) 1410; к) 1450; л) 1510; м) 1560 кВт

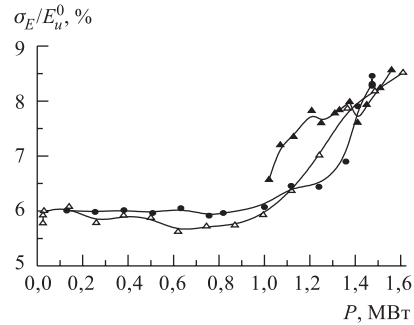
Из рис. 22 видно увеличение амплитуды основного пика с повышением мощности выше 1510 кВт и его сдвиг в область меньших частот с уменьшением мощности ниже 1250 кВт. В диапазоне мощности 1070–1370 кВт виден пик на частоте $\sim 0,1$ Гц, вызванный работой АР.

Рис. 23. Спектральная плотность флуктуации энергии импульсов мощности S_E в функции частоты f при средней мощности реактора 1475 кВт. Заштрихованы диапазоны частот в спектрах колебаний мощности, используемые при анализе парциальных флуктуаций: 0–0,25 Гц — низкочастотный диапазон для оценки работы АР; 0,65–0,85 и 1,75–1,90 Гц — компонента, корреляционно связанная с вибрациями ПО; 1,0–1,5 Гц — «пороговая» компонента шумов, резко меняющаяся с мощностью



Полные, «пороговые» и низкочастотные колебания мощности. Выделены уровни колебаний энергии импульсов в области изменения средней мощности, характеризующейся наибольшей шумовой нестабильностью. Отдельно приведены полные колебания мощности. Частотные диапазоны колебаний мощности, используемые для анализа, приведены на рис. 23, а на рис. 24 и 25 — изменение относительных колебаний энергии импульсов в зависимости от мощности.

Рис. 24. Полные относительные стандартные колебания энергии импульсов σ_E/E_u^0 в диапазоне частот 0–2,5 Гц в зависимости от уровня средней мощности P : ● — штатный подъем мощности; △ — штатное снижение мощности; ▲ — установившийся тепловой режим работы реактора



Существенные низкочастотные колебания. Ниже представлены некоторые данные по возникновению существенных низкочастотных колебаний мощности, зарегистрированных при переходе в режим ручного регулирования (РР), т. е. при отключении системы автоматического регулирования мощности в диапазоне мощности 1130–1305 кВт. Характерная частота этих колебаний,

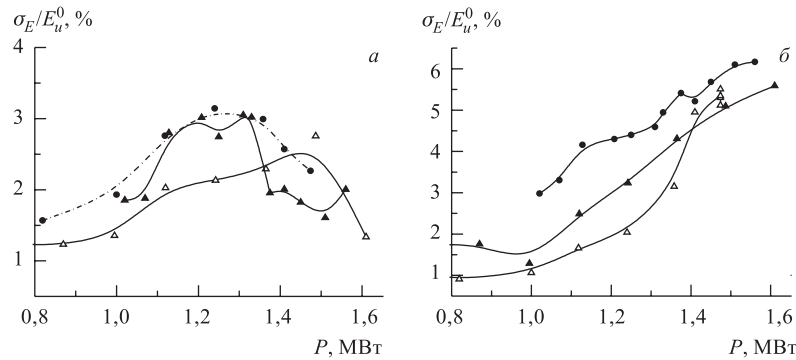


Рис. 25. Низкочастотные (0–0,25 Гц) относительные стандартные колебания мощности σ_E/E_u^0 , связанные с работой АР (а), и «пороговые» (1–1,5 Гц) относительные стандартные колебания мощности в области резкого возрастания шумов (б) в зависимости от уровня средней мощности P : ● — штатный подъем мощности; △ — штатное снижение мощности; ▲ — установившийся тепловой режим работы реактора

определенная из спектра колебаний мощности, не зависела от уровня мощности и составила 0,0329 Гц. Колебания возникали сразу после перехода в РР, а срыв происходил сразу после перехода в АР, т. е. при работе с АР реактор становился устойчивым. Пороговое значение мощности, при которой реактор уже не входил в режим низкочастотных колебаний на РР, но мощность была существенно нестационарной, равно 1070 кВт. Здесь слово «существенно»

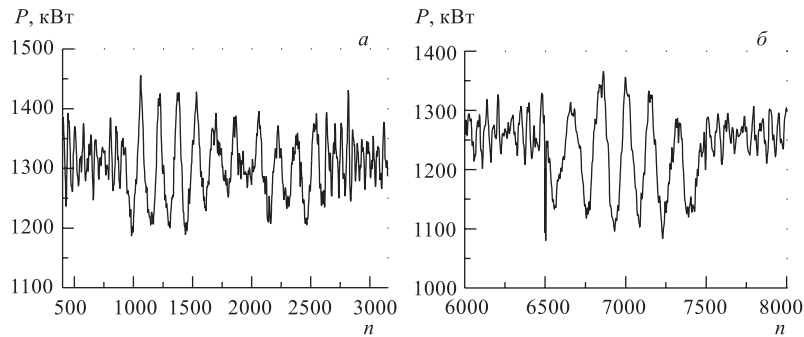


Рис. 26. Примеры колебаний мощности при переходе в режим ручного регулирования при некоторых значениях мощности. n — номер импульса мощности. Рисунки а и б соответствуют средним мощностям 1305 и 1250 кВт

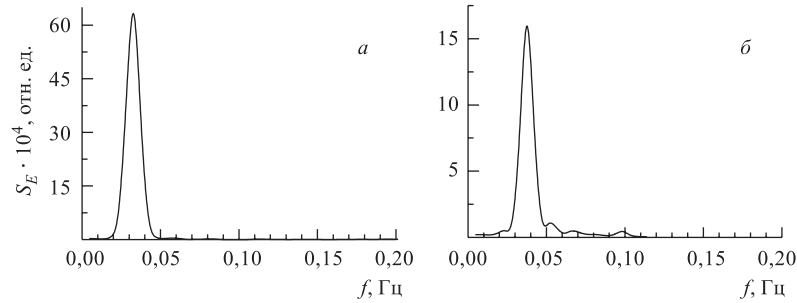


Рис. 27. Спектры низкочастотных колебаний мощности S_E в зависимости от частоты f в режиме ручного регулирования. Частота колебаний равна 0,0329 Гц. Рисунки *a* и *б* соответствуют средним мощностям 1250 и 1305 кВт

означает необходимость перехода в режим работы с АР. На рис. 26 даны примеры низкочастотных колебаний на некоторых уровнях средней мощности, а на рис. 27 показан спектральный состав колебаний.

Анализ результатов. Из рисунков видно, что в спектрах шумов мощности наблюдаются две области шумов, существенно зависящие от уровня мощности. Первая, низкочастотная, область (0–0,25 Гц) появляется в диапазоне 1,05–1,35 МВт и вторая (1,0–1,5 Гц) — выше 1,0 МВт. Нестабильность шумов второй области, по-видимому, вызвана вибрациями топливных кассет, поскольку, как видно из проведенных ранее исследований, зависит от расхода натрия через активную зону (частота колебаний увеличивается с расходом) и, кроме того, как видно из настоящих измерений, зависит от температуры активной зоны (с уменьшением мощности менее 1,25 МВт частота колебаний уменьшается). Низкочастотная компонента шумов, вероятнее всего, вызвана работой АР (прямых измерений положения АР не было). При переходе в режим ручного регулирования в диапазоне мощности 1,05–1,35 МВт в реакторе возникают существенные по амплитуде колебания мощности с низкой частотой 0,0329 Гц. На рис. 28 качественно проиллюстрировано поведение реактора при проведении измерений. Если реактор при выключенной системе АР находится на границе (сверху или снизу) области неустойчивости (P_1 , P_2), флуктуации мощности (реактивности), имеющие место при нормальной работе реактора и характеризующиеся среднеквадратическими отклонениями σ_1 и σ_2 (рис. 28), могут привести к возникновению в реакторе низкочастотных (0,0329 Гц) колебаний мощности с соответствующим изменением средней мощности (P'_1 — уменьшение или P'_2 — увеличение). В центре области неустойчивости при возникновении низкочастотных колебаний средняя мощность существенно не меняется. Диапазон мощности ΔP_{exp} , приведен-

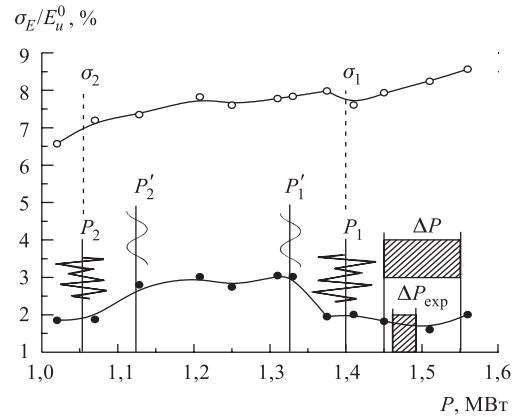


Рис. 28. Иллюстрация к поведению реактора в области низкочастотной неустойчивости. σ_E/E_u^0 — относительное среднеквадратическое отклонение энергии импульсов мощности; P — средняя мощность; ΔP — область мощности при эксплуатации реактора; ΔP_{exp} — область мощности при оценке устойчивости в прямых измерениях. \circ — полные флуктуации мощности в диапазоне частот 0–2,5 Гц; \bullet — флуктуации низкочастотной (0–0,25 Гц) компоненты шумов, связанные с работой автоматического регулятора мощности. Повышение уровня этих шумов позволяет выделить область мощности, при которой в реакторе при выключении системы АР возникают колебания с частотой 0,0329 Гц

ный на рис. 28, соответствует мощности при проведении прямых измерений неустойчивости, а ΔP — нормальное изменение мощности в одном цикле эксплуатации реактора.

Оценка устойчивости. Импульсные частотные передаточные функции. Ниже даны краткие пояснения к использованию формализма передаточных функций для исследования динамики импульсного реактора. Согласно этому формализму основные динамические свойства импульсного реактора, представленного в виде линеаризованной системы, могут быть определены, если известны его амплитудно-фазочастотные характеристики (АФЧХ), или, иначе, диаграммы Найквиста. Эти характеристики отражают амплитудную и фазовую связь между синусоидальными сигналами на входе и выходе реактора. АФЧХ есть график импульсной частотной передаточной функции реактора $W(j\omega) = U(\omega) + jV(\omega)$ на комплексной плоскости. Этой характеристике соответствует импульсная передаточная функция $W(z)$, используемая в модели, где $z = \exp(j\omega T_u)$. Частота исследуемых колебаний меняется от 0 до $0,5f_u$, где $f_u = 1/T_u$ — частота импульсов мощности, а безразмерная частота $\omega = 2\pi f T_u$ — от 0 до π . Длина вектора, проведенного из начала

координат в точку с частотой ω , равная $|W(j\omega)| = \sqrt{U^2(\omega) + V^2(\omega)}$, есть амплитудно-частотная характеристика (коэффициент усиления на разной частоте), а угол поворота вектора от действительной положительной полуоси $\varphi(\omega) = \arctg \frac{V(\omega)}{U(\omega)}$ есть фазочастотная характеристика реактора. Например, для АФЧХ импульсного реактора (эта характеристика будет подробнее обсуждаться ниже (рис. 31)) длина вектора, проведенного из начала координат в любую точку кривой, соответствующую частоте ω , равна отношению амплитуды синусоидального колебания энергии импульса мощности в относительных единицах $\Delta e_u = (E_u - E_u^0)/E_u^0$ (выходная величина) к амплитуде синусоидального колебания реактивности (входная величина), которая для ИБР-2 выражена в долях β_u . Здесь E_u, E_u^0 — энергия текущего импульса мощности и ее базовое значение. Угол поворота вектора относительно действительной положительной полуоси представляет собой фазовый сдвиг между колебаниями мощности и реактивности. Для оценки устойчивости по критерию Найквиста реактор представляется в виде замкнутой одноконтурной системы. Если разомкнутая система устойчива или нейтральна, то замкнутая система устойчива при условии, если АФЧХ разомкнутой системы не охватывает точку с координатами $(-1, j0)$. Запас устойчивости по амплитуде (усилению) показывает, во сколько раз надо увеличить коэффициент усиления разомкнутой системы, чтобы вывести замкнутую систему из устойчивого состояния на границу устойчивости $(-1, j0)$. Запас по фазе определяют как угол, при повороте на который конец вектора единичной длины окажется в точке с координатами $(-1, j0)$ и АФЧХ разомкнутой системы пройдет через эту точку, т. е. когда замкнутая система выйдет на границу устойчивости. Запас по фазе отражает возможное влияние дополнительной неучтенной инерционности системы. (Частотная характеристика разомкнутой системы, соответствующая реактору в режиме саморегулирования, будет обсуждаться ниже (рис. 32).)

Частотные характеристики, оценка устойчивости. Оценка устойчивости реактора на штатной мощности проводилась для режима саморегулирования (без АР) по диаграмме Найквиста, полученной как прямым путем (без применения модели реактора), так и на модели. В первом случае использовался усредненный период колебаний мощности, измеренных при различных периодах прямоугольных колебаний реактивности. Использовались амплитуда и фаза первой (основной) гармоники фурье-преобразования усредненного периода переходного процесса, т. е. влияние нелинейностей не учитывалось. Область частот основной гармоники составляла 0,008–2,40 Гц. Измерения проводились на мощности 1465–1495 кВт. Во всех измерениях амплитуда задающей реактивности равнялась 0,0365 β_u . Она была определена из переходного процесса мощности с наименьшей частотой колебаний, равной 0,008 Гц (рис. 29), когда можно было пренебречь изменением переменных в конце каждого полупериода из-за его большой продолжительности (62 с).

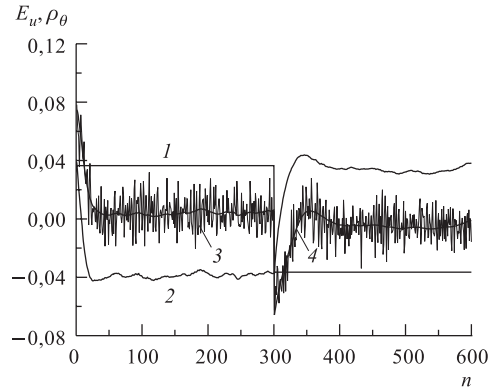


Рис. 29. Переходные процессы при прямоугольных колебаниях задающей реактивности (реактор работает без АР). 1 — задающая реактивность (β_u); 2 — реактивность МОС ρ_θ (β_u); 3 — зарегистрированное относительное отклонение энергии импульса мощности Δe_u ; 4 — отклонение энергии, вычисленное на модели; n — номер импульса мощности

На рис. 30 показаны вычисленные импульсные переходные характеристики МОС (в $\beta_u/\text{МДж}$), обусловленные действием только одного импульса мощности. Импульсные характеристики соответствуют случаю, когда импульс мощности достаточно мал, т. е. когда нелинейности МОС практически не проявляются. Характеристики на рис. 30 соответствуют экспериментам, в которых частота прямоугольных колебаний реактивности составляла 0,057 и 0,065 Гц.

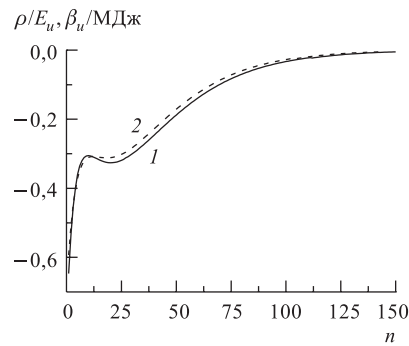


Рис. 30. Импульсные переходные характеристики мощностной обратной связи, соответствующие двум зарегистрированным переходным процессам мощности, вызванным прямоугольными колебаниями задающей реактивности: 1 — средняя мощность реактора 1490 кВт, частота 0,057 Гц; 2 — 1470 кВт, 0,065 Гц. n — номер импульса мощности

Для использования критерия устойчивости Найквиста реактор был представлен в виде одноконтурной системы. На рис. 31 показана амплитудно-фазочастотная характеристика реактора. Частотная характеристика разомкнутой части реактора (рис. 32) пересекает отрицательную действительную полуось лишь при частоте 2,4 Гц примерно в точке $-0,1$, т. е. запас устойчивости по амплитуде (усилению) равен ~ 10 . Это означает, что если бы общий коэффициент усиления МОС увеличился в 10 раз, то реактор вышел бы на границу устойчивости и в нем наблюдались бы незатухающие колебания с частотой 2,4 Гц. Этот же запас, но в децибелах ($\Delta L \approx 20$ дБ), указан на логарифмических характеристиках (рис. 33). Если для наглядности предпо-

Рис. 31. Диаграмма Найквиста реактора ИБР-2 в режиме саморегулирования (без автоматического регулятора мощности) на мощности 1465–1495 кВт. U и V — соответственно действительная и мнимая части импульсной частотной передаточной функции реактора. Точкам на рисунке соответствует частота в Гц

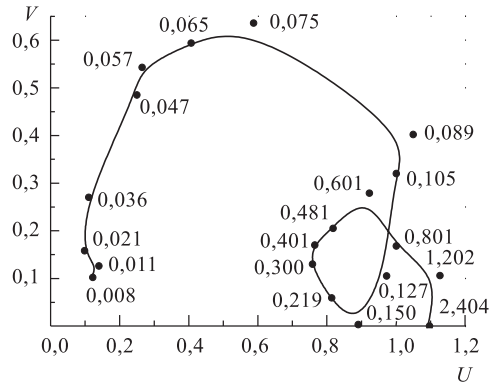


Рис. 32. Диаграмма Найквиста $W_{FB}(j\omega)$ (амплитудно-фазочастотная характеристика разомкнутой системы) реактора ИБР-2 на мощности 1465–1495 кВт для оценки устойчивости по критерию Найквиста в режиме саморегулирования (с отключенным автоматическим регулятором мощности)

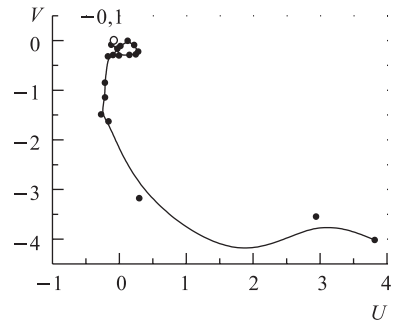
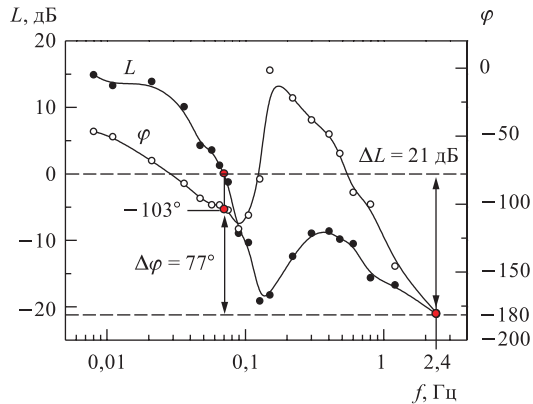


Рис. 33. Логарифмические частотные характеристики разомкнутой части системы для реактора ИБР-2 на номинальной мощности 1465–1495 кВт в режиме саморегулирования: амплитудно-частотная $L = 20 \lg |W_{FB}|$ (в дБ), фазочастотная φ (в градусах). ΔL и $\Delta\varphi$ — соответственно запасы устойчивости по амплитуде и по фазе



ложить, что постоянные времени МОС не зависят от уровня мощности, а коэффициенты передачи МОС пропорциональны мощности, то запас по амплитуде, равный 10 для средней мощности 1,5 МВт, означает, что реактор вышел бы на границу устойчивости при мощности 15 МВт. Запас по фазе $\Delta\varphi$, составляющий при частоте $f_0 = 0,07$ Гц ($\omega_0 = 0,44$ рад/с) 77° (1,34 рад) (см. рис. 33), означает, что реактор вышел бы на границу устойчивости, если

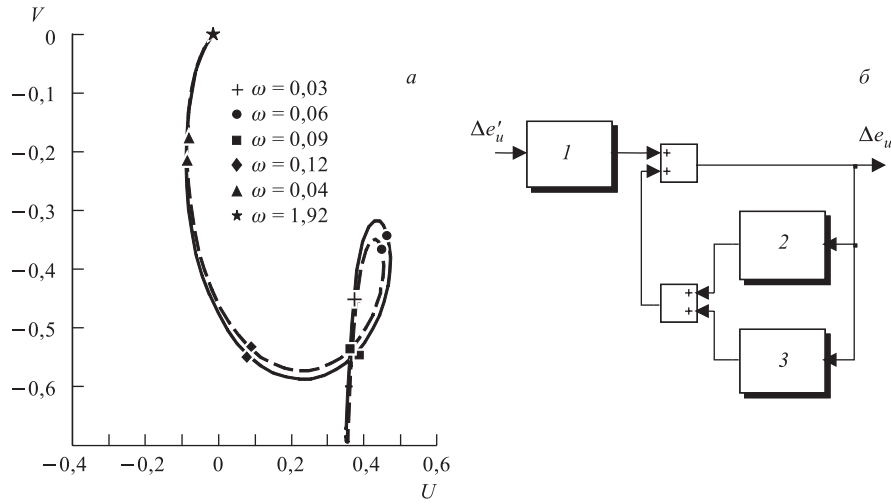


Рис. 34. а) Амплитудно-фазочастотная характеристика разомкнутой системы (U — действительная часть, V — мнимая часть), соответствующая реактору ИБР-2 с АР, для оценки устойчивости по критерию Найквиста. Помечены некоторые значения частоты $\omega = 2\pi/M$, где M — число импульсов мощности за период колебаний. Сплошная линия соответствует параметрам МОС, вычисленным при обработке эксперимента, проведенного при средней мощности реактора 1490 кВт и частоте прямоугольных колебаний задающей реактивности 0,057 Гц; пунктирная линия — эксперимент при мощности 1470 кВт и частоте 0,065 Гц. б) Блок-схема разомкнутой системы. $\Delta e'_u$, Δe_u — входной и выходной сигналы (относительное отклонение энергии импульса); 1 — АР; 2 — блок запаздывающих нейтронов; 3 — МОС

в цепи МОС помимо учтенной задержки сигнала в результате инерционности МОС появился бы элемент, осуществляющий дополнительную задержку сигнала (чистое запаздывание) на 3 с. Такие запасы по амплитуде и фазе можно считать приемлемыми.

На рис. 34 показаны диаграммы Найквиста, а на рис. 35 — логарифмические характеристики разомкнутой части системы (реактора с АР), вычисленные с помощью динамической модели реактора. Эти характеристики соответствуют параметрам МОС, вычисленным при математической обработке переходных процессов мощности, вызванных прямоугольными колебаниями реактивности с частотами 0,057 и 0,065 Гц.

Следует подчеркнуть, что изменение параметров приводит к изменению не только масштаба диаграммы Найквиста (рис. 32), но и к ее деформации (закручиванию ее по часовой стрелке). Это может привести к тому, что деформированная АФЧХ пересечет (или даже охватит) точку на комплексной

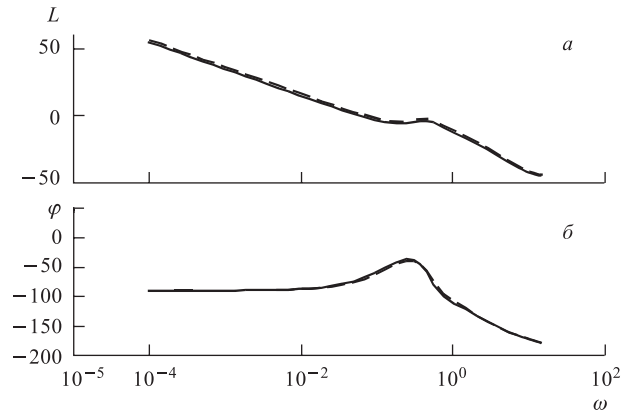


Рис. 35. Логарифмические амплитудные (L) и фазочастотные (φ) характеристики реактора ИБР-2 с АР как разомкнутой системы (рис. 34, б) для оценки устойчивости по критерию Найквиста. ω — круговая частота (рад/с). Характеристики соответствуют параметрам МОС, вычисленным при обработке экспериментов: сплошная кривая — средняя мощность реактора 1490 кВт, частота прямоугольных колебаний реактивности 0,057 Гц; штриховая — 1470 кВт, 0,065 Гц

плоскости с координатами $(-1, j0)$ при частоте существенно ниже предельной частоты 2,4 Гц. Это будет свидетельствовать о возникновении незатухающих (или расходящихся) колебаний с этой низкой частотой. На реальность возникновения такого режима указывает рис. 36, на котором показан переходный процесс мощности при прямоугольных колебаниях реактивности с той же частотой ($\sim 0,03$ Гц) и той же амплитудой, что и в других экспериментах, зарегистрированный 24 января 2002 г. при средней мощности реактора 1435 кВт.

Проведенные исследования показали, что в режиме саморегулирования (без АР) реактор достаточно устойчив при средней мощности 1,5–1,6 МВт. При включенном автоматическом регуляторе с соответствующими параметрами реактор устойчив в широком диапазоне средней мощности.

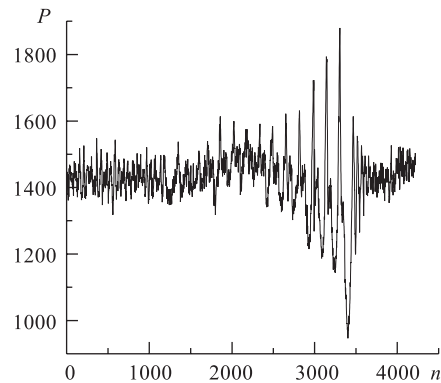


Рис. 36. Расходящийся переходный процесс мощности реактора ИБР-2 в режиме саморегулирования при прямоугольных колебаниях реактивности при средней мощности 1435 кВт. P — мощность (в кВт), n — номер импульса (1000 импульсов соответствуют 208 с)

3. МОДЕЛЬ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ДИНАМИКИ РЕАКТОРА ИБР-2 В ГИПОТЕТИЧЕСКОМ ВАРИАНТЕ БУСТЕРНОГО РЕЖИМА

Существует ряд проектов в Японии, Европе, Корее, Китае и России по разработке и созданию ИИН, ориентированных на получение мощных импульсных потоков нейтронов. Средняя мощность, генерируемая сборкой, может достигать нескольких мегаватт. Поэтому особый интерес представляет температурная динамика элементов сборки и, в первую очередь, температура делящегося материала (топлива) [39, 40]. Для подкритических мощных нейтронных источников температурная динамика может быть одним из основных факторов, определяющих надежную и безопасную работу всей установки в целом. Естественно, что решение этой задачи зависит от типа ИИН. С целью создания и отработки достаточно универсальной модели ИИН сделана попытка смоделировать температурную динамику мощных импульсных подкритических систем на примере гипотетической подкритической сборки, в которой уже действующий мощный протонный ускоритель с неразмножающей мишенью был бы объединен с активной зоной реактора ИБР-2, находящейся в подкритическом состоянии.

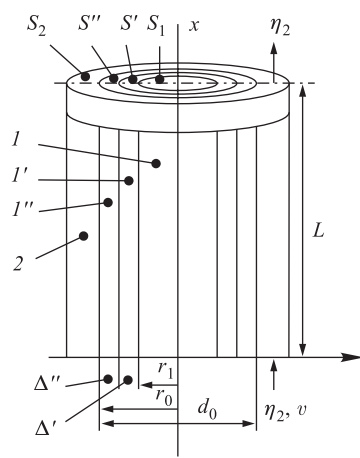


Рис. 37. Эквивалентный твэл: 1 — твэл; 1' — контактный слой; 1'' — оболочка; 2 — канал теплоносителя

Аналитическое представление процессов теплообмена. Подкритическая сборка из делящегося материала предназначена для размножения нейтронов, периодически генерируемых мишенью под действием ускорителя заряженных частиц. В центре сборки находится мишень, например, из вольфрама. Мишень окружена тепловыделяющими элементами (твэлами). Каждый твэл, представляющий собой стержень (или набор таблеток) из делящегося материала, заключен в герметическую металлическую оболочку. Между твэлом и оболочкой имеется контактный слой, заполненный, например, гелием. Твэлы по группам собраны в кассеты. Оболочка каждого твэла омывается теплоносителем, например, жидким натрием.

Эквивалентный твэл. Для аналитической оценки процессов теплообмена были приняты следующие допущения.

1. Сборка состоит из идентичных твэлов с одинаковым тепловыделением.
2. Плотность нейтронов одинаково распределена по всему объему твэла.
3. Переток тепла в осевом направлении отсутствует.

4. Поток теплоносителя равномерно распределен по технологическим каналам сборки, которые также считаются идентичными.

Сделанные предположения дают основание считать, что процессы в сборке тождественны процессам в эквивалентном твэле, показанном на рис. 37.

Поскольку сборка находится в состоянии глубокой подкритичности, можно отдельно не выделять влияние нагрева оболочки на изменение реактивности сборки. В связи с этим для упрощения анализа контактный слой и оболочка из-за малой толщины отнесены к твэлу.

В сборке из делящегося материала, работающей совместно с ускорителем заряженных частиц, процессы теплообмена аналогичны процессам в импульсном ядерном реакторе [29] и описаны для усредненных по радиусу температур.

Условиям теплового баланса соответствуют следующие уравнения в частных производных:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = a_1 P - a_2(\theta - \eta), \quad (56)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + v \frac{\partial \eta}{\partial x} = a_3(\theta - \eta). \quad (57)$$

В этих уравнениях P — мощность; θ, η — усредненные по радиусу температуры соответственно топлива (твэла) и теплоносителя; v — скорость теплоносителя; t — время; x — осевой (продольный) параметр твэла.

Параметры a_1, a_2, a_3 определяются формулами

$$a_1 = \frac{1}{NL(c_1\gamma_1 S_1 + c'\gamma'S' + c''\gamma''S'')}, \quad (58)$$

$$a_2 = ka_2^0, \quad (59)$$

$$a_2^0 = \frac{\pi d_0}{c_1\gamma_1 S_1 + c'\gamma'S' + c''\gamma''S''}, \quad (59a)$$

$$a_3 = ka_3^0, \quad (60)$$

$$a_3^0 = \frac{\pi d_0}{c_2\gamma_2 S_2}, \quad (60a)$$

где c_1, c', c'', c_2 — теплоемкости; $\gamma_1, \gamma', \gamma'', \gamma_2$ — плотности и S_1, S', S'', S_2 — площади поперечного сечения соответственно топлива, контактного слоя, оболочки и теплоносителя; N — количество твэлов; L — длина эквивалентного твэла; d_0 — наружный диаметр оболочки; k — коэффициент теплопередачи от топлива к теплоносителю, равный

$$k = \frac{1}{\frac{r_0}{4\lambda_1} + \frac{r_0}{r_1} \left(\frac{\Delta'}{\lambda'} + \frac{\Delta''}{\lambda''} \right) + \frac{1}{\alpha}}. \quad (61)$$

Здесь λ_1 , λ' , λ'' — коэффициенты теплопроводности соответственно топлива, контактного слоя и оболочки; α — коэффициент теплоотдачи от оболочки к теплоносителю; r_1 , r_0 — радиус твэла и наружный радиус оболочки; Δ' , Δ'' — толщины контактного слоя и оболочки. Формула (61) получена согласно традиционной методике [41]. В уравнении (57) граничными условиями для температуры η по высоте являются температуры теплоносителя на входе (η_1) и на выходе (η_2) канала (рис. 37).

Переход к обыкновенным дифференциальным уравнениям. После перехода к усредненным по высоте температурам $\bar{\theta}$ и $\bar{\eta}$ из уравнений (56) и (57) получены обыкновенные дифференциальные уравнения

$$\frac{d\bar{\theta}}{dt} = a_1 P - a_2(\bar{\theta} - \bar{\eta}), \quad (62)$$

$$\frac{d\bar{\eta}}{dt} = a_3(\bar{\theta} - \bar{\eta}) + a_4 v(\eta_1 - \eta_2), \quad (63)$$

где

$$a_4 = 1/L. \quad (64)$$

Чтобы сделать систему уравнений полной, к уравнениям (62) и (63) обычно добавляют уравнение

$$\bar{\eta} = 0,5(\eta_1 + \eta_2), \quad (65)$$

полагая, что средняя температура теплоносителя является среднеарифметической величиной от граничных температур.

Система уравнений (62), (63), (65) достаточно проста и удобна для анализа динамики. Однако она может оказаться недостаточной для анализа некоторых процессов. Так, из этой системы следует, что при скачке температуры теплоносителя на входе η_1 температура на выходе η_2 должна измениться скачком в противоположную сторону, поскольку согласно уравнению (63) средняя температура скачком измениться не может. Указанное противоречие снимается, если при переходе от исходных уравнений в частных производных воспользоваться аппроксимирующим полиномом Эрмита [42]. В результате два исходных уравнения в частных производных заменены семью обыкновенными дифференциальными уравнениями. Для удобства моделирования переходных процессов пять из них объединены в два дифференциальных уравнения (66) и (67) и два алгебраических (66а) и (67а):

$$\frac{d\psi}{dt} = -a_2\psi - \frac{d}{dt}(\eta_1 - \eta_2), \quad (66)$$

$$\frac{d}{dt}(\eta_1 - \eta_2) = a_3\psi + \gamma. \quad (67)$$

В уравнениях (66) и (67) переменные ψ и γ определяются следующими выражениями:

$$\psi = (\theta_1 - \eta_1) - (\theta_2 - \eta_2), \quad (66a)$$

$$\gamma = 12a_4v \left[\eta_1 - \bar{\eta} - \frac{1}{2}(\eta_1 - \eta_2) \right], \quad (67a)$$

где $\theta_1, \theta_2, \eta_1, \eta_2$ — соответственно граничные значения температур топлива и теплоносителя.

Итак, два исходных уравнения в частных производных (56) и (57) заменены четырьмя обыкновенными дифференциальными уравнениями (62), (63), (66), (67) и двумя алгебраическими (66a) и (67a).

Зависимость параметров от средней температуры топлива. Отметим особенности полученных уравнений. Для режимов работы сборки, характеризующихся несущественными изменениями температуры топлива, уравнения (66) и (67) можно объединить и систему уравнений (62), (63), (66) и (67) представить в следующем виде:

$$T_\theta \frac{d\bar{\theta}}{dt} + \bar{\theta} = k_P P + \bar{\eta}, \quad (68)$$

$$T_\eta \frac{d\bar{\eta}}{dt} + \bar{\eta} = \bar{\theta} + k_\eta v (\eta_1 - \eta_2), \quad (69)$$

$$T_\psi \frac{d^2}{dt^2} (\eta_1 - \eta_2) + \frac{d}{dt} (\eta_1 - \eta_2) = k_\psi \left(T_\theta \frac{d\gamma}{dt} + \gamma \right), \quad (70)$$

где введены обозначения постоянных времени

$$T_\theta = \frac{1}{a_2}, \quad T_\eta = \frac{1}{a_3}, \quad T_\psi = \frac{T_\theta T_\eta}{T_\theta + T_\eta} \quad (71)$$

и коэффициентов передачи

$$k_P = \frac{a_1}{a_2}, \quad k_\eta = \frac{a_4}{a_3}, \quad k_\psi = \frac{T_\eta}{T_\theta + T_\eta}. \quad (72)$$

Таблица 5. Параметры как функции температуры

$\bar{\theta}$, К	700	900	1100	1300	1500
λ_1 , Вт/(м·К)	2,9	2,4	2,0	1,7	1,4
k , Вт/(м ² ·К)	1020	950	870	810	730
T_θ , с	7,1	7,7	8,4	9,1	10
T_η , с	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4

Из соотношений (69), (70) и (59), (60) следует, что постоянные времени температуры топлива T_{θ} и теплоносителя T_{η} , а также коэффициенты передачи k_P и k_{η} обратно пропорциональны коэффициенту теплопередачи k , который является функцией коэффициента теплопроводности топлива λ_1 (61). В свою очередь, λ_1 заметно зависит от температуры топлива [43], иначе говоря, от мощности сборки. В качестве примера рассмотрена сборка, аналогичная активной зоне импульсного реактора ИБР-2, где в качестве топлива используется двуокись плутония. Различным температурам топлива соответствуют следующие значения параметров (табл. 5).

Структурная схема для моделирования температурной динамики при широком диапазоне изменения температуры топлива. Зависимость коэффициента теплопередачи от топлива к теплоносителю аппроксимирована экспонентой:

$$k = k^0 \exp(b\bar{\theta}), \quad (73)$$

где $k^0 = 1,38 \cdot 10^3 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; $b = -4,29 \cdot 10^{-4} \text{ К}^{-1}$; $\bar{\theta}$ — усредненная по высоте температура топлива (в К). Линейная аппроксимация оказалась неудовлетворительной, поскольку ей соответствовала неустойчивая модель.

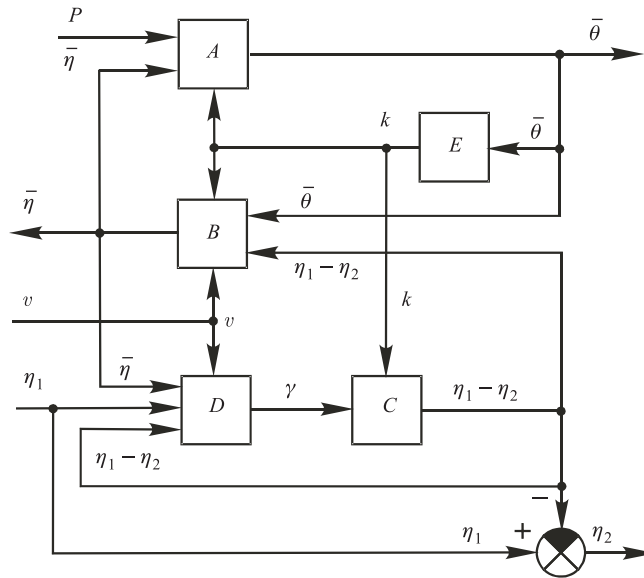


Рис. 38. Блок-схема для моделирования переходных процессов температур

На рис. 38 показана блок-схема модели, а на рис. 39 в развернутом виде показаны составляющие ее блок-схемы.

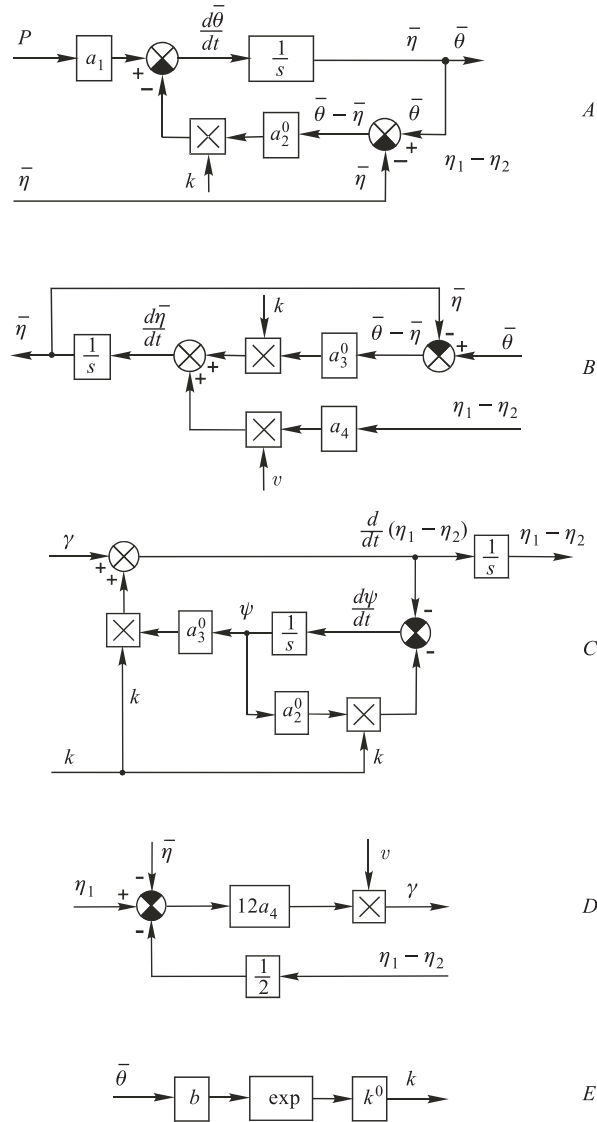


Рис. 39. Составляющие блок-схемы, показанной на рис. 38. \otimes — элемент умножения; \oplus — элемент алгебраического суммирования

Оценка параметров гипотетической подкритической сборки. Представим возможность объединения известных мощных импульсных источников нейтронов, состоящих из протонных ускорителей и неумножающих мишеней, с подкритической размножающей сборкой с параметрами активной зоны

быстрого реактора ИБР-2. В качестве известных импульсных источников с неразмножающей мишенью были рассмотрены источники ISIS (Великобритания, Чилтон) и MLNSC (США, Лос-Аламос) с параметрами [44], указанными в табл. 6.

Таблица 6. Параметры импульсных источников нейтронов

Источник	Год сооружения	Мощность мишени, кВт	Энергия пучка, МэВ	Длительность импульса, мкс	Частота, c^{-1}
ISIS	1985	160	800	20–30	50
MLNSC	1985	50	800	20–30	20

При объединении этих источников с размножающей сборкой, аналогичной активной зоне реактора ИБР-2, сборка характеризовалась бы параметрами, указанными в табл. 7. Было принято, что подкритичность на мгновенных нейтронах $\varepsilon = -0,05$, т. е. 5% (при этом умножение $Y = 1/|\varepsilon| = 20$), доля запаздывающих нейтронов $\beta = 2,16 \cdot 10^{-3}$ и эффективное время жизни мгновенных нейтронов $\tau = 6 \cdot 10^{-8}$ с.

Таблица 7. Параметры гипотетической сборки

Сборка	ISIS + активная зона ИБР-2	MLNSC + активная зона ИБР-2
Мощность мишени, кВт	160	50
Энергия, выделяемая в импульсе, кДж	64	50
Энергия, выделяемая между импульсами (энергия фона), кДж	3	2
Полная энергия за период импульсов, кДж	67	52
Доля энергии фона от полной энергии, %	4	4
Мощность сборки, МВт	3,3	1,0
Длительность импульса сборки, мкс	20–30	20–30
Частота импульсов, c^{-1}	50	20
Средняя температура топлива, К	~ 1500	~ 900

Таким образом, мощность подкритической сборки по сравнению с мощностью неразмножающей мишени увеличилась бы в 20 раз при сохранении длительности импульса. При этом 96% всей энергии выделится бы в импульсах. Очевидно, что при средней мощности сборки ~ 1 МВт и выше оценка температурной динамики становится весьма актуальной.

Примеры моделирования переходных процессов температур. Переходные процессы на рис. 40–42 соответствуют гипотетической подкритической сборке ISIS + ИБР-2. Эти процессы соответствуют наиболее напряженному

режиму (при средней температуре топлива ~ 1500 К). Значения параметров модели приняты следующими: $a_1 = 25,4$ К/МВт, $a_2^0 = 1,37 \cdot 10^{-4}$ м²·К/(Вт·с), $a_3^0 = 9,69 \cdot 10^{-4}$ м²·К/(Вт·с), $a_4 = 2,5$ м⁻¹, $k^0 = 1,38 \cdot 10^3$ Вт/(м²·К), $b = -4,29 \cdot 10^{-4}$ К⁻¹, $P = 3,3$ МВт, $\eta_1 = 573$ К, $v = 3$ м/с.

Рис. 40. Переходные процессы для модели, показанной на рис. 38 и 39, при включении ускорителя. P , $\bar{\theta}$, $\bar{\eta}$, η_2 , k — соответственно мощность (МВт), усредненные по высоте температуры топлива и теплоносителя, выходная температура теплоносителя (К) и коэффициент теплопередачи от топлива к теплоносителю (Вт/(м²·К)), t — время (с)

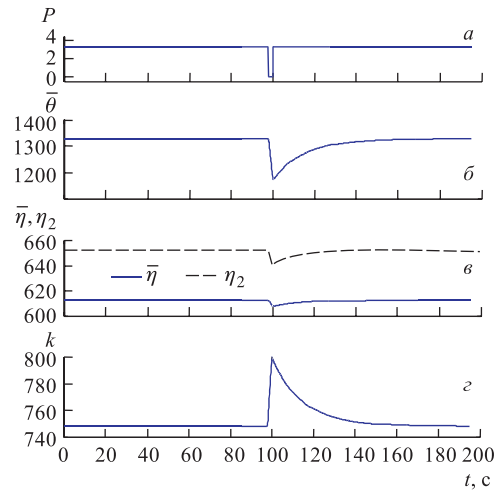
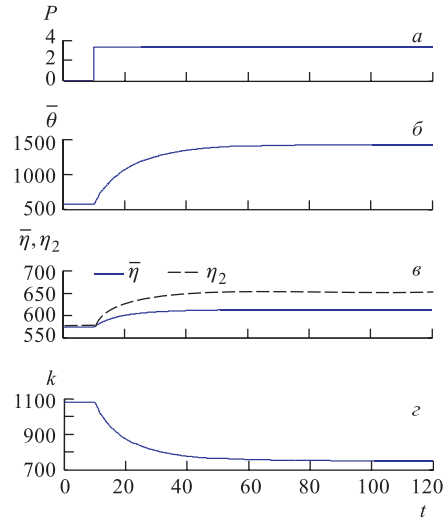


Рис. 41. Переходные процессы при кратковременном отключении ускорителя

На рис. 40–42 показаны переходные процессы при включении ускорителя, при кратковременном пропадании мощности и при уменьшении скачком в два раза скорости теплоносителя.

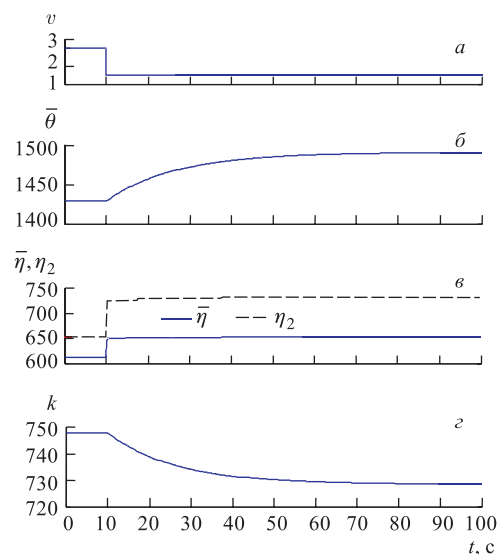


Рис. 42. Переходные процессы при скачке скорости теплоносителя v от 3 до 1,5 м/с

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведены эксперименты для исследования шумов энергии импульсов мощности реактора. Выявлены диапазоны частот, характеризующиеся повышенными амплитудами колебаний мощности, дана оценка возможных причин колебаний. Выявлена зависимость параметров этих колебаний от средней мощности реактора.

2. На реакторе, работавшем в режиме саморегулирования (без автоматического регулятора), проведены эксперименты по определению параметров обратной связи. Дана оценка степени устойчивости реактора. На основании анализа колебаний мощности с учетом их нелинейного характера получены уравнения мощностной обратной связи, оказывающей решающее влияние на степень устойчивости реактора.

3. Создана дискретная модель импульсного реактора ИБР-2 и ее программная реализация для моделирования переходных процессов. Линейные элементы модели описаны дискретными передаточными функциями, полученными в результате использования z -преобразования. Учтены нелинейные зависимости в блоках кинетики и мощностной обратной связи.

4. Создана непрерывная модель динамики реактора ИБР-2 с переменными, усредненными по периоду следования импульсов мощности. В непрерывной модели линейным звеньям соответствуют обычные (не дискретные)

передаточные функции, что позволяет при анализе динамики использовать более простой и обширный аппарат исследования динамических систем.

5. Мощностная обратная связь аналитически описана пятью составляющими: тремя нелинейными уравнениями (быстрая МОС), отражающими процессы, происходящие в активной зоне реактора в результате ее разогрева, и двумя линейными уравнениями (медленная МОС), отражающими, в частности, влияние разогрева контуров теплоносителя.

6. Проведено моделирование переходных процессов мощности реактора. Дана оценка влияния параметров автоматического регулятора на переходные процессы при регулярном (скачкообразном) возмущении реактивности, при случайном возмущении реактивности с нормальным законом распределения, а также при случайном возмущении с добавлением синусоидальных возмущений, характерных для ИБР-2. Результаты исследований позволяют выбрать оптимальные значения параметров автоматического регулятора.

7. Создана модель температурной динамики импульсной сборки из делящегося материала. Подчеркнута важность учета зависимости постоянных времени топлива и теплоносителя от температуры топлива. Дана оценка многократного усиления мощности импульсного источника нейтронов, представляющего собой мощный протонный ускоритель с неразмножающей мишенью, в случае его гипотетического объединения с размножающей подкритической сборкой, аналогичной активной зоне импульсного реактора ИБР-2.

В заключение авторы считают своим долгом выразить благодарность персоналу реактора ИБР-2 за помощь в проведении многочисленных экспериментов, Е. П. Шабалину и А. В. Виноградову за полезное обсуждение и ряд ценных замечаний, а также И. А. Кашулиной и Н. Ю. Казимировой за помощь.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Булкин Ю. М. и др. Импульсный ядерный реактор. Авт. свид. СССР № 270911; приоритет от 13.11.1968.
2. Pikelner L. B., Rudenko V. T. IBR — Pulsed Reactor with Injector // Proc. of «Research Applications of Nuclear Pulsed Systems», Dubna, July 1966. Vienna, 1967. P. 165.
3. Бунин Б. Н. и др. Пуск реактора ИБР-30 в режиме импульсного бустера. Сообщение ОИЯИ 13-6213. Дубна, 1972.
4. Ананьев В. Д. и др. Импульсный реактор с инжектором ИБР-2. Сообщение ОИЯИ 13-4392. Дубна, 1969; Докл., представленный на 5-й междунар. конф. по физике и технике исследовательских реакторов, Варшава, декабрь 1968 г.
5. Ананьев В. Д. и др. Особенности конструкции и оптимизация модулятора реактивности реактора ИБР-2 // АЭ. 1972. Т. 31, вып. 4. С. 352; Докл., представленный на 4-й междунар. конф. ООН по мирному использованию атомной энергии, Женева, 6–16 сент. 1971 г.
6. Ананьев В. Д. и др. Физический пуск реактора ИБР-2. Критическая сборка и измерение эффективности блоков системы управления и защиты. Сообщение ОИЯИ P13-12465. Дубна, 1979.

7. *Ананьев В. Д. и др.* Энергетический пуск реактора ИБР-2 и первые физические исследования на его пучках // АЭ. 1984. Т. 57, вып. 4. С. 227–234.
8. *Ananiev V. D., Vinogradov A. V.* The IBR-2 Pulsed Research Reactor: Status Report // Proc. of the Second Intern. Seminar «Advanced Pulsed Neutron Sources: Physics of/ at Advanced Pulsed Neutron Sources» (PANS-II), Dubna, June 14–17, 1994.
9. *Бондаренко И. И., Ставиский Ю. Я.* Импульсный режим работы быстрого реактора // АЭ. 1959. Т. 7, вып. 5. С. 417.
10. *Блохин Г. Е. и др.* Импульсный реактор на быстрых нейтронах // АЭ. 1961. Т. 10, вып. 5. С. 437.
11. *Raievski V.* The SORA reactor. EUR-1643. 1964.
12. *Raievski V.* The Pulsed Fast Reactor as a Source for Pulsed Neutron Experiments // Pulsed Neutron Research. Vienna, 1965. V. 2. P. 533.
13. *Wakabayashi H. et al.* Operational Experiences of YAYOI // Proc. of US/Japan Seminar on Fast Pulse Reactors, Tokai, Japan, Jan. 19–23, 1976.
14. *Шабалин Е. П.* Импульсные реакторы на быстрых нейтронах. М.: Атомиздат, 1976.
15. *Кипин Дж. Р.* Физические основы кинетики ядерных реакторов: Пер. с англ. М.: Атомиздат, 1967.
16. *Шульц М. А.* Регулирование энергетических ядерных реакторов: Пер. с англ. М.: Изд-во иностр. лит., 1957.
17. *Сандмайер А. Г.* Кинетика и стабильность реакторов на быстрых нейтронах: Пер. с англ. М.: Госатомиздат, 1963.
18. *Шабалин Е. П.* Методы расчета и оптимизация импульсного реактора периодического действия как источника нейтронов для физических исследований: Автореф. дис. Препринт ОИЯИ 11-5663. Дубна, 1971.
19. *Попов А. К.* Импульсный коэффициент передачи реактора ИБР-2. Сообщение ОИЯИ Р3-95-463. Дубна, 1995.
20. *Попов А. К., Рогов А. Д., Руденко В. Т.* Оценочные частотные характеристики и передаточная функция импульсного реактора ИБР-30. Сообщение ОИЯИ 13-80-95. Дубна, 1980.
21. *Денисов В. Д., Попов А. К., Руденко В. Т.* Частотная характеристика мощностной обратной связи импульсного реактора ИБР-30. Сообщение ОИЯИ Р13-81-656. Дубна, 1981.
22. *Пепельшев Ю. Н., Попов А. К., Рогов А. Д.* Частотные характеристики быстрой мощностной обратной связи импульсного реактора ИБР-2. Сообщение ОИЯИ Р13-83-471. Дубна, 1983.
23. *Шабалин Е. П. и др.* Импульсная характеристика обратной связи в ИБР-2 // АЭ. 1991. Т. 70, вып. 5. С. 326–329; Препринт ОИЯИ Р3-90-29. Дубна, 1990.
24. *Попов А. К.* Частотная и импульсная переходная характеристики мощностной обратной связи импульсного реактора ИБР-2. Сообщение ОИЯИ Р13-90-203. Дубна, 1990.
25. *Попов А. К.* Оценка импульсной переходной характеристики мощностной обратной связи импульсного реактора ИБР-2 частотным методом. Сообщение ОИЯИ Р13-92-551. Дубна, 1992.
26. *Камионский В. Л.* Нелинейность мощностной обратной связи в реакторе ИБР-2. Сообщение ОИЯИ Р13-93-95. Дубна, 1993.
27. *Попов А. К.* Упрощенная нелинейная модель мощностной обратной связи реактора ИБР-2. Сообщение ОИЯИ Р13-95-464. Дубна, 1995.
28. *Попов А. К.* Анализ устойчивости импульсного реактора ИБР-2 при девятипараметрической модели мощностной обратной связи. Сообщение ОИЯИ Р13-96-297. Дубна, 1996.

29. *Попов А. К., Рогов А. Д.* Программа для моделирования на ЭВМ динамики импульсного реактора. Дубна, 1976. Деп. ОИЯИ Б1-11-10120.
30. *Попов А. К.* Анализ длительного колебательного переходного процесса мощности импульсного реактора ИБР-2. Сообщение ОИЯИ Р13-97-361. Дубна, 1997.
31. *Бондарченко Е. А., Пепельшев Ю. Н., Попов А. К.* Модель импульсного реактора периодического действия ИБР-2 для исследования переходных процессов. Препринт ОИЯИ Р13-99-127. Дубна, 1999.
32. *Бондарченко Е. А., Пепельшев Ю. Н., Попов А. К.* Влияние параметров автоматического регулятора на переходные процессы мощности реактора ИБР-2. Препринт ОИЯИ Р13-99-200. Дубна, 1999.
33. *Popov A. K., Pelyolyshev Yu. N., Bondarchenko E. A.* The Model of the IBR-2 Pulsed Reactor of Periodic Operation for Investigations of Transitional Processes // *Ann. Nucl. Ener.* 2000. V. 27. P. 563–574.
34. *Bondarchenko E. A., Pelyolyshev Yu. N., Popov A. K.* Influence of Automatic Regulator Parameters on Power Transitional Processes of the IBR-Reactor // *Ann. Nucl. Ener.* 2001. V. 28. P. 63–78.
35. *Popov A. K., Pelyolyshev Yu. N., Bondarchenko E. A.* The Model of the IBR-2 Pulsed Reactor Dynamics and Investigation of Pulse Energy Stabilization // *Nucl. Techn.* 2002. V. 139, No. 1. P. 21–29.
36. *Попов А. К.* О статистически оптимальном регулировании энергии импульсов быстрого реактора // *АЭ.* 1971. Т. 31, вып. 3. С. 269.
37. *Попов А. К.* Анализ устойчивости импульсного реактора ИБР-2 при включенном автоматическом регуляторе. Сообщение ОИЯИ Р13-98-275. Дубна, 1998.
38. *Китовски Я., Пепельшев Ю. Н.* Применение метода распознавания образов для исследования статистических параметров реактора ИБР-2. Сообщение ОИЯИ Р13-85-657. Дубна, 1985.
39. *Бондарченко Е. А., Пепельшев Ю. Н., Попов А. К.* Модель температурной динамики импульсной сборки из делящегося материала. Препринт ОИЯИ Р13-2002-271. Дубна, 2002.
40. *Bondarchenko E. A., Pelyolyshev Yu. N., Popov A. K.* Temperature Dynamics Model of a Pulsed Fission Material Assembly // *Ann. Nucl. Ener.* 2004. V. 31. P. 601–617.
41. *Arhan R.* SORA Dynamics and Control System Studies Using Mean-Value Neutron Kinetics Equations. EUR-4408. 1970.
42. *Дорри М. Х.* Приближенное решение некоторых уравнений теплообмена в частных производных на аналоговой вычислительной машине // *Автоматика и телемеханика.* 1966. № 8. С. 124–130.
43. *Чиркин В. С.* Теплофизические свойства материалов ядерной техники. М., 1968. С. 130.
44. *Aksenov V. L.* Modern Neutron Sources // *Surface Investigation.* 1998. V. 14. P. 151–159.